



03 a 05 de dezembro de 2025

As Engenharias na Transformação Digital das PMEs

Uso de adsorventes na remoção de poluentes atmosféricos: Análise bibliométrica

João Vitor Isidoro dos Santos

Centro de Tecnologia - CTEC – Universidade Federal de Alagoas - UFAL

Anamalia Ferreira da Silva

Centro de Tecnologia - CTEC – Universidade Federal de Alagoas - UFAL

Resumo: O aumento das emissões de poluentes atmosféricos é um desafio global que afeta a saúde humana e os ecossistemas. O uso de adsorventes destaca-se como estratégia promissora para remover gases e partículas, despertando crescente interesse científico. Este estudo consolida o conhecimento sobre adsorventes na mitigação de poluentes, identifica lacunas e mapeia tendências de pesquisa por meio de análise bibliométrica. A busca sistemática na Web of Science (1999–2026) via portal CAPES, com triagem de 131 artigos, permitiu extrair dados sobre tipos de adsorventes, poluentes-alvo, distribuição geográfica, instituições e periódicos. Observou-se predominância de carvão ativado e zeólitas na captura de CO₂ e VOCs, com crescimento das publicações a partir de 2017, lideradas por China, Índia, França e Estados Unidos. Materiais emergentes como biochar, MOFs e óxido de grafeno aparecem menos, evidenciando potencial de inovação. Persistem lacunas em poluentes regionais (NO_x, SO₂ e material particulado) e desigualdade geográfica da pesquisa, reforçando a necessidade de novos estudos e apoio a políticas ambientais.

Palavras-chave: Adsorventes, Poluição atmosférica, Análise bibliométrica, desenvolvimento sustentável.

Adsorbents in the Removal of Atmospheric Pollutants: A Bibliometric Analysis

Abstract: The increase in atmospheric pollutant emissions is a global challenge that affects human health and ecosystems. The use of adsorbents stands out as a promising strategy for removing gases and particles, attracting growing scientific interest. This study consolidates current knowledge on adsorbents for pollutant mitigation, identifies research gaps, and maps trends through bibliometric analysis. A systematic search in the Web of Science (1999–2026) via the CAPES portal, with screening of 131 articles, enabled the extraction of data on adsorbent types, target pollutants, geographical distribution, institutions, and journals. Activated carbon and zeolites were found to predominate in the capture of CO₂ and VOCs, with a marked increase in publications from 2017 onward, led by China, India, France, and the United States. Emerging materials such as biochar, MOFs, and graphene oxide appeared less frequently, highlighting their potential for innovation. Gaps remain in studies addressing regional pollutants (NO_x, SO₂, and particulate matter) and in the geographical distribution of research, underscoring the need for further studies and support for environmental policy development.

Keywords: Adsorbents, Air pollution, Bibliometric analysis, Sustainable development.

1. Introdução

O processo de urbanização global vem se intensificando de forma acelerada nas últimas décadas, modificando profundamente a relação entre sociedade e meio ambiente. Embora as áreas urbanas ocupem menos de 2% da superfície terrestre, nelas já vive mais de 50% da população mundial, número que em 1900 era de apenas 14%. Esse crescimento, que tende a se concentrar principalmente em países em desenvolvimento, tem como consequência a intensificação das emissões de poluentes atmosféricos de origem antrópica, gerando impactos negativos na qualidade do ar, no aumento das temperaturas devido ao efeito de ilha de calor urbana e no agravamento de problemas de saúde física e mental da população (KERSHAW, 2017).

Diante disto, a poluição atmosférica exerce impactos extensos e multifacetados sobre a qualidade do ar, a saúde humana e os ecossistemas. Poluentes como material particulado (PM_{2.5} e PM₁₀), dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, compostos orgânicos voláteis e gases de efeito estufa não só degradam a visibilidade e alteram a composição química da atmosfera, mas também infiltram-se nos pulmões, sistema circulatório e nervoso, contribuindo para doenças respiratórias, cardiovasculares e até efeitos neurológicos (PRINGER, 2025). Além disso, esses contaminantes se depositam em solos, superfícies aquáticas e vegetação, afetando a produtividade vegetal, biodiversidade, equilíbrio de ecossistemas e, por meio da cadeia alimentar, podem causar impactos indiretos sobre os seres humanos (UFES, 2013).

Entretanto, diversos tipos de adsorventes, como carvão ativado, zeólitas e materiais organometálicos (MOFs), são empregados para remover poluentes atmosféricos. Esses materiais capturam substâncias como óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), compostos orgânicos voláteis (VOCs) e material particulado (PM), contribuindo para a melhoria da qualidade do ar e a proteção da saúde humana (QUEIROZ, 2011).

Adsorventes são materiais sólidos, geralmente porosos, que possuem a capacidade de atrair e reter moléculas de substâncias presentes na fase gasosa ou líquida em sua superfície. No contexto da poluição atmosférica, os adsorventes desempenham um papel crucial na remoção de poluentes como compostos orgânicos voláteis (COVs), dióxido de enxofre (SO₂), amônia (NH₃) e outros gases ácidos (Silva, 2025). Essa remoção é fundamental para a melhoria da qualidade do ar, especialmente em ambientes urbanos e industriais, onde as emissões de poluentes são elevadas. (REIMERINK, 1999).

O desenvolvimento de adsorventes eficazes enfrenta desafios significativos, incluindo o alto custo de materiais avançados, a necessidade de regeneração eficiente e a manutenção de alta capacidade de adsorção ao longo do tempo. Embora materiais como carvão ativado e zeólitas sejam amplamente utilizados, a regeneração desses adsorventes pode ser complexa e dispendiosa, afetando a viabilidade econômica dos processos (Nascimento, 2020).

Embora já existam diversas revisões na literatura sobre materiais adsorventes aplicados à remoção de poluentes atmosféricos, a maioria concentra-se em aplicações específicas ou em classes particulares de materiais, como o carvão ativado, as zeólitas ou os frameworks metal-orgânicos (MOFs), o que limita uma compreensão abrangente do campo e dificulta a identificação de tendências, lacunas e oportunidades de pesquisa de forma integrada (ZHANG, 2023). Nesse cenário, observa-se a ausência de análises bibliométricas mais amplas que sistematizem o conhecimento existente, permitindo mapear a evolução das publicações, os materiais mais investigados, os principais poluentes abordados e as contribuições científicas mais relevantes.

Diante disso, o presente estudo propõe-se a preencher essa lacuna ao apresentar uma análise bibliométrica consolidada sobre o uso de adsorventes na mitigação da poluição

atmosférica. Ao identificar padrões, destacar lacunas temáticas e apontar potenciais caminhos de inovação, a pesquisa contribui para o avanço científico e tecnológico do campo, incentivando o desenvolvimento de soluções mais eficientes e ambientalmente responsáveis. Nesse sentido, os resultados obtidos oferecem subsídios relevantes para orientar pesquisas futuras, apoiar decisões industriais e embasar políticas públicas voltadas à melhoria da qualidade do ar e à promoção da saúde coletiva, em consonância com os princípios do desenvolvimento sustentável.

2. Referencial Teórico

2.1 Adsorventes e caracterização para remoção de poluentes atmosféricos

Os adsorventes desempenham papel central na mitigação de poluentes atmosféricos devido à sua elevada área superficial e capacidade de interagir com gases e partículas. Materiais clássicos, como carvão ativado, zeólitas e sílica gel, têm sido amplamente estudados por sua eficácia na remoção de compostos orgânicos voláteis (COVs), óxidos de nitrogênio (NOx) e dióxido de enxofre (SO₂). Esses materiais atuam principalmente por fisiossorção e quimiossorção, processos condicionados por fatores ambientais como temperatura, umidade e composição química do ar (Nascimento, 2014).

Além dos adsorventes convencionais, estudos recentes têm explorado materiais sustentáveis, incluindo bioadsorventes derivados de resíduos agroindustriais, que apresentam custo reduzido e menor impacto ambiental. Esses materiais emergentes, como cascas de frutas, resíduos de madeira e biochar, mostram potencial significativo para remoção de poluentes e alinham-se aos princípios da engenharia da sustentabilidade. Contudo, a literatura ainda evidencia lacunas quanto à eficiência comparativa desses adsorventes e à sua aplicabilidade em larga escala, apontando para oportunidades de pesquisa futura (Carneiro, 2024).

A caracterização detalhada dos adsorventes é essencial para compreender sua eficiência e orientar melhorias. Técnicas como adsorção de nitrogênio a 77 K, utilizando o método BET para determinação de área superficial e o método BJH para distribuição de poros, permitem avaliar propriedades texturais críticas (Sing, 2001). Complementarmente, FTIR identifica grupos funcionais que participam da interação com poluentes, enquanto XRD fornece informações sobre cristalinidade e estrutura dos materiais (Ryu et al., 1999). Microscopia eletrônica de varredura (SEM) e análise de Pore Size Distribution permitem investigar a morfologia e a distribuição dos poros, oferecendo dados essenciais para otimização e desenvolvimento de adsorventes de alta performance.

A integração de adsorventes eficientes, materiais emergentes e técnicas avançadas de caracterização reforça a complexidade do campo e a necessidade de abordagens multidisciplinares. Apesar dos avanços, ainda há escassez de estudos que relacionem propriedades estruturais à eficácia na remoção de poluentes em diferentes condições ambientais. Superar essa lacuna é essencial para o desenvolvimento de tecnologias mais eficazes e sustentáveis, com potencial de impacto positivo na qualidade do ar e na saúde pública (REIS, 2022).

2.2 Panorama científico e bibliométrico sobre adsorventes

A produção científica sobre adsorventes na remoção de poluentes atmosféricos tem crescido de forma expressiva nas últimas décadas, refletindo o aumento da preocupação global com qualidade do ar e mudanças climáticas. Estudos bibliométricos revelam concentração significativa de pesquisas em países como China, Índia, França e Estados Unidos, demonstrando a influência de políticas nacionais, investimentos em ciência e desafios ambientais locais sobre a produção científica (CHEN, 2024).

A análise das tendências temáticas indica predominância de pesquisas voltadas para carvão ativado e zeólitas, focando principalmente na captura de CO₂ e compostos orgânicos voláteis (VOCs), enquanto materiais emergentes como MOFs, biochar e óxido de grafeno ainda apresentam menor frequência. Essa assimetria evidencia oportunidades de inovação tecnológica e a necessidade de diversificação de estudos para outros poluentes de interesse ambiental, como NO_x, SO₂ e particulados (Jabloka et al., 2022).

Estudos bibliométricos também destacam a predominância do idioma inglês, a centralização em grandes editoras internacionais e a diversificação das áreas do conhecimento envolvidas, como química, engenharia ambiental e ciência de materiais. Essa configuração evidencia a natureza multidisciplinar do campo e a importância da integração entre caracterização de materiais, processos de adsorção e aplicação prática em mitigação de poluentes (HAUNSCHILD, 2016).

Apesar do crescimento da literatura, lacunas importantes permanecem. Observa-se escassez de estudos em regiões da América Latina, África e Oriente Médio, bem como limitações na avaliação comparativa de desempenho entre adsorventes convencionais e emergentes. Tais lacunas reforçam a necessidade de análises sistemáticas que consolidem o conhecimento, mapeiem tendências globais e regionais e orientem futuras pesquisas, políticas públicas e aplicações industriais (JABLONKA 2020).

3. Metodologia

A metodologia deste estudo teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica sobre o uso de adsorventes na remoção de poluentes atmosféricos, permitindo mapear tendências, lacunas e evolução das publicações científicas na área. Para tanto, o levantamento de artigos foi realizado na base Web of Science, acessada via portal CAPES, reconhecida por sua abrangência internacional e pela indexação de periódicos de alto impacto.

3.1 Definir os objetivos da pesquisa

O objetivo central desta pesquisa foi realizar uma análise bibliométrica abrangente sobre o uso de adsorventes na remoção de poluentes atmosféricos, a fim de mapear as tendências científicas e tecnológicas do tema. Buscou-se identificar as principais classes de adsorventes investigadas, os poluentes-alvo mais recorrentes, bem como os países, instituições e periódicos que mais contribuem para o avanço desse campo. Essa definição visou preencher lacunas na literatura, oferecendo uma visão consolidada que apoie futuras pesquisas e aplicações industriais. Para garantir relevância, os objetivos específicos incluíram: (i) caracterizar a evolução temporal das publicações de 1990 a 2025; (ii) identificar os principais hotspots de pesquisa, como novos materiais adsorventes.

3.2 Busca de Títulos e Palavras-chaves

A estratégia de busca foi conduzida na base de dados Web of Science Core Collection, escolhida por sua ampla cobertura multidisciplinar e rigor nos critérios de indexação. Foram aplicados termos-chave em inglês, como “adsorbent” AND “air pollutant*” OR “gaseous pollutants*”, utilizando operadores booleanos e filtros temporais entre 1990 e 2025. Ao final do processo, identificou-se um total de 258 registros de artigos.

3.3 Revisão de texto completo

Os títulos e resumos foram inicialmente triados de forma sistemática, com o objetivo de eliminar publicações irrelevantes, como aquelas voltadas à adsorção em meio aquoso ou a poluentes não atmosféricos. Essa etapa foi realizada por dois revisores independentes, a fim de reduzir vieses de seleção, sendo as divergências registradas e resolvidas por consenso. Como resultado, do total de 258 registros, cerca de 25 artigos foram excluídos por não atenderem aos critérios de inclusão, garantindo que o conjunto de estudos retido

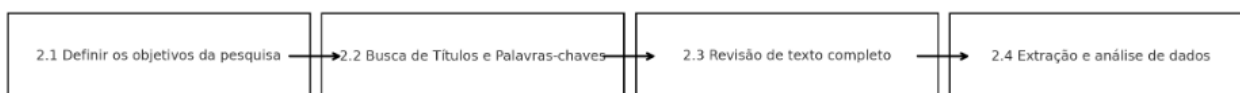
refletisse com maior precisão as pesquisas sobre a remoção de poluentes atmosféricos por adsorventes.

Na sequência, os artigos potencialmente elegíveis foram avaliados em texto completo para confirmar sua aderência ao escopo da pesquisa. Essa etapa possibilitou a obtenção de informações não explicitadas nos resumos, como a caracterização dos materiais adsorventes e as condições experimentais de remoção. Assim, dos 233 artigos triados, 131 foram aprovados para a análise final após a leitura integral. Nesse processo, foram excluídos trabalhos que se limitavam a modelagem teórica sem validação experimental ou que não apresentavam de forma clara os poluentes atmosféricos investigados.

3.4 Extração e análise de dados

Para cada artigo selecionado, foram extraídos dados bibliométricos e técnicos referentes ao ano de publicação, país de origem, instituição vinculada, periódico, tipo de poluente investigado, classe de adsorvente (como carvão ativado, metal-organic frameworks – MOFs – e zeólitas) e desempenho obtido no processo de remoção. As informações foram sistematicamente organizadas em planilhas padronizadas, de modo a possibilitar análises quantitativas de frequência, coocorrência de palavras-chave e mapeamento de redes de coautoria, com o apoio de softwares especializados, a exemplo do Bibliometrix.

Figura 1 - Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Autor (2025)

04. Discursão e Resultados

4.1 Tendência temporal das publicações e áreas do conhecimento

A evolução do número de publicações entre 1990 e 2025 evidencia a consolidação e a crescente relevância do tema “adsorventes para remoção de poluentes atmosféricos” no cenário científico internacional (Figura 2). No período de 1999 a 2016, a produção foi incipiente, com média de apenas 2 a 3 artigos anuais, refletindo o estágio inicial do desenvolvimento tecnológico e o reconhecimento ainda limitado da problemática ambiental.

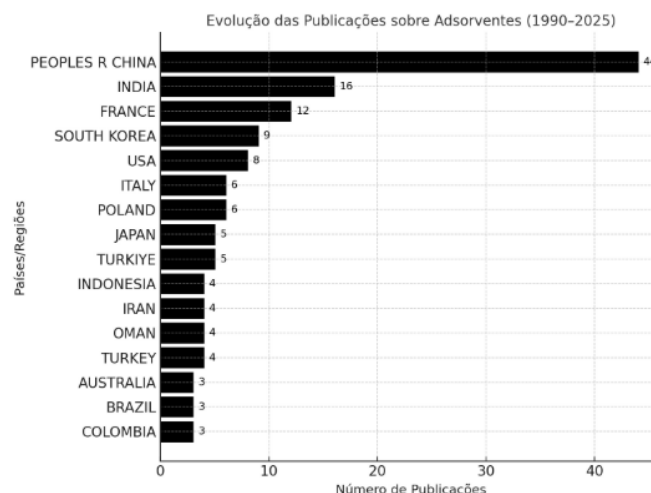
Cabe destacar que países e regiões como Egito, Inglaterra, Malásia, Arábia Saudita, Singapura, Espanha, Taiwan e Tunísia não foram incluídos no gráfico em virtude do número reduzido de publicações (≤ 3), o que dificultaria a análise comparativa em relação aos países com maior volume de estudos.

A partir de 2017 observa-se um crescimento expressivo, com 92 publicações acumuladas entre 2017 e 2025, correspondendo a uma média de 11,5 artigos por ano e a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de aproximadamente 31%. Esse aumento reflete a intensificação das pesquisas, possivelmente impulsionada pelo avanço no desenvolvimento de materiais porosos de alto desempenho, como zeólitas e materiais de estrutura metal-orgânica (MOFs), bem como pelo fortalecimento de regulamentações globais sobre emissões atmosféricas. O ápice da produção foi registrado em 2023, com 21 artigos, seguido de 20 em 2025. A aparente redução observada no mesmo ano (13 publicações) deve ser interpretada com cautela, pois é comum a defasagem de indexação em bases bibliográficas para períodos mais recentes.

A análise do tipo de documento corrobora o processo de amadurecimento do campo. Os artigos originais representam 106 registros (80,9% do total), seguidos de 23 artigos de

revisão (17,6%), 8 trabalhos em anais de congresso (5,9%) e um número residual de capítulos de livros, publicações em acesso antecipado e uma retratação. O crescimento da produção de artigos de revisão, especialmente nos últimos anos, é característico de áreas em consolidação, refletindo a necessidade de sistematização do conhecimento e de estabelecimento de diretrizes para aplicações industriais e formulação de políticas públicas.

Figura 2 - Evolução anual do número de publicações (1999–2025) sobre adsorventes aplicados à remoção de poluentes atmosféricos



Fonte: Autor (2025)

Por fim, destaca-se o caráter pioneiro do primeiro artigo identificado, publicado em 1999, que investigou a utilização das zeólitas ZSM-5 e MCM-41 na adsorção de hidrocarbonetos e óxidos de carbono e nitrogênio. Esse trabalho inaugural antecipa tendências atualmente consolidadas, como a busca por adsorventes de elevada capacidade e seletividade, marcando o início de uma trajetória de mais de duas décadas de expansão contínua na área.

4.2 Distribuição geográfica e institucional

A produção científica identificada apresenta forte concentração em determinados polos de pesquisa. A China destaca-se de forma expressiva, com 44 publicações (cerca de um terço do total), confirmando seu protagonismo em estudos sobre materiais avançados e tecnologias de controle de poluentes atmosféricos (Tabela 1). Esse desempenho pode ser atribuído tanto ao intenso processo de industrialização e urbanização, que acentua os desafios relacionados à qualidade do ar nos grandes centros urbanos, quanto ao elevado investimento nacional em ciência e tecnologia, exemplificado por políticas como o Air Pollution Action Plan.

Em seguida, a Índia ocupa a segunda posição, com 16 publicações, refletindo um contexto ambiental igualmente desafiador. O país convive com episódios recorrentes de elevada concentração de material particulado e gases tóxicos em áreas densamente povoadas, o que impulsiona a busca por soluções de mitigação de poluentes. A França aparece em terceiro lugar, com 12 artigos, evidenciando o engajamento da União Europeia em iniciativas de tecnologias limpas e projetos colaborativos em engenharia química e ciência de materiais.

Na sequência, Coreia do Sul (9 publicações) e Estados Unidos (8) reforçam o caráter global do tema. Enquanto a Coreia do Sul mantém tradição em inovação tecnológica, os Estados

Unidos, historicamente protagonistas em ciência de materiais, contribuem para a diversificação dos métodos e adsorventes empregados. Outros países, como Itália e Polônia (6 publicações cada), além de Japão e Turquia (5 cada), complementam o bloco de maior produção, evidenciando a participação tanto de economias emergentes quanto de nações industrializadas da Europa e da Ásia.

Na América Latina, o Brasil se destaca com 3 artigos, patamar semelhante ao de países de porte econômico e científico comparável, como Austrália, Egito e Espanha. Embora ainda modesta, essa contribuição sinaliza potencial de expansão, considerando os desafios relacionados à qualidade do ar em regiões metropolitanas e o fortalecimento de grupos de pesquisa em engenharia ambiental. Outros países latino-americanos, como Colômbia (3 publicações) e Argentina (1), demonstram que, mesmo em menor escala, o interesse pela temática também se manifesta no continente.

Tabela 1 – Distribuição da produção científica por país em estudos sobre materiais avançados e tecnologias de controle de poluentes atmosféricos

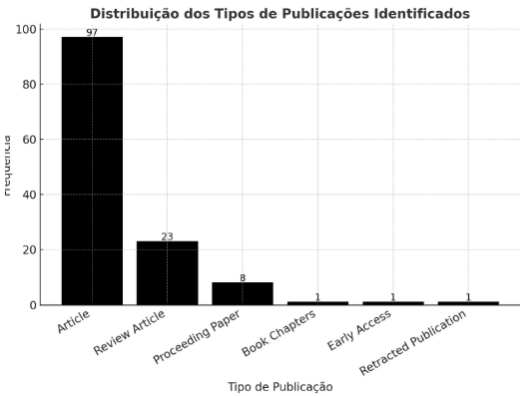
Região	Quantidade	Percentual
República Popular da		
China	44	23,2%
Índia	16	8,4%
França	12	6,3%
Coreia do Sul	9	4,7%
Estados Unidos	8	4,2%
Itália e Polônia	6	3,2%
Japão e Turquia	5	2,6%
Outros (4)	4	2,1%
Brasil e Outros (10)	3	1,6%
Outros (19)	1	1,6%

Fonte: Autor (2025)

4.3 Tipos de documentos e idioma

A análise bibliométrica revelou predominância de artigos originais (97 registros), seguidos por artigos de revisão (23), trabalhos em anais de conferências (8) e, de forma pontual, um capítulo de livro, uma publicação em estágio inicial (early access) e uma retratação (Figura 3). Essa distribuição confirma o caráter consolidado da área, na qual os artigos científicos constituem o núcleo da produção. A presença expressiva de artigos de revisão, embora em menor proporção, indica a necessidade de sistematizar o conhecimento acumulado, identificar lacunas e propor novas direções de investigação. Já os trabalhos apresentados em conferências evidenciam o papel do intercâmbio acadêmico em fases preliminares de pesquisa, antes da publicação em periódicos de maior impacto.

Figura 3 - Tipos de publicações identificadas na análise bibliométrica



Fonte: Autor (2025)

A diversidade de áreas de indexação reforça a natureza multidisciplinar do campo (Tabela 2). As publicações concentram-se principalmente em Química (48 registros), Engenharia (40) e Ciências Ambientais/Ecologia (35), seguidas por Ciência de Materiais (25) e Energia e Combustíveis (19). Essa distribuição evidencia que o avanço no uso de adsorventes para poluentes atmosféricos depende tanto do desenvolvimento de novos materiais quanto de sua aplicação em processos de engenharia e em estratégias de mitigação ambiental.

Tabela 2 – Distribuição das publicações por área de conhecimento

Áreas do conhecimento	Quantidade	Percentual
Química	48	28,7%
Engenharia	40	24,0%
Ciências Ambientais/Ecologia	35	21,0%
Ciências de Materiais	25	15,0%
Energia e Combustíveis	19	11,4%

Fonte: Autor (2025)

No que se refere ao idioma, observa-se predominância marcante do inglês (128 registros), contrastando com ocorrências pontuais em francês, português e espanhol. Esse resultado reforça a consolidação do inglês como língua franca da comunicação científica, sobretudo em áreas de interface tecnológica e ambiental. Tal predominância, entretanto, não reflete apenas uma tendência linguística, mas também o processo de internacionalização da ciência e a busca por maior visibilidade e impacto das pesquisas.

4.4 Temas e palavras-chave mais frequentes

A análise das palavras-chave evidenciou a predominância de termos relacionados à caracterização de materiais, com destaque para “Surface área” (80 ocorrências), “Nitrogen adsorption” (42), “Porosity” (22), “FTIR” (28), “BET” (29) e “XRD” (18). Termos mais específicos, como “Scanning electron microscopy” (9) e “Pore size distribution” (6), também aparecem, embora com menor frequência. Esses dados revelam a centralidade das técnicas analíticas na avaliação da eficiência dos adsorventes aplicados à remoção de poluentes atmosféricos.

Tabela 4 – Palavras-chaves mais frequentes identificadas

Palavras chaves	Quantidade	Percentual
Surface area	80	34,2%
Nitrogen adsorption	42	17,9%
porosity	22	9,4%
FTIR	28	12,0%
BET	29	12,4%
XRD	18	7,7%
Scanning electron microscopy	9	3,8%
Pore size distribution	6	2,6%

Fonte: Autor (2025)

A ênfase em “Surface área” como palavra-chave principal reforça a importância da área superficial específica como parâmetro determinante na eficácia dos adsorventes. A distribuição geográfica das publicações sobre esse tema mostra predominância de países asiáticos, com China (25), Índia (11) e Coreia do Sul (7) à frente, seguidos por nações europeias como França, Itália e Polônia.

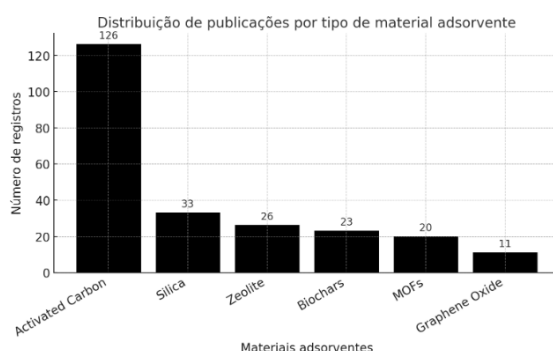
4.5 Materiais adsorventes e poluentes alvo

A análise dos artigos permitiu mapear os principais adsorventes empregados na remoção de poluentes atmosféricos, destacando-se materiais amplamente estudados como carvão ativado, biochar, zeólita, estruturas metal-orgânicas (MOFs), sílica, argilas e óxido de grafeno. Quanto aos poluentes-alvo, prevaleceram CO₂, NO_x, SO₂, compostos orgânicos voláteis (VOCs) e material particulado. O carvão ativado apresentou maior número de

registros (126), evidenciando sua consolidação devido à alta área superficial, custo reduzido e disponibilidade de precursores. Sílica (33) e zeólita (26) também foram amplamente abordadas, confirmando sua versatilidade em aplicações ambientais.

Por outro lado, materiais emergentes como Biochar (23), MOFs (20) e Óxido de grafeno (11) indicam tendências de inovação na engenharia de materiais para adsorção, com foco em compósitos funcionais, modificações químicas e estratégias para aumentar seletividade, capacidade e estabilidade dos sistemas. Esses avanços refletem uma busca crescente por soluções mais eficazes na remoção de gases e VOCs, com apoio em pesquisas recentes (CHAO et al., 2024; JIN, 2024; SIVARANJANEE, 2024; ANEGBE, 2024; ARANGO HOYOS, 2023).

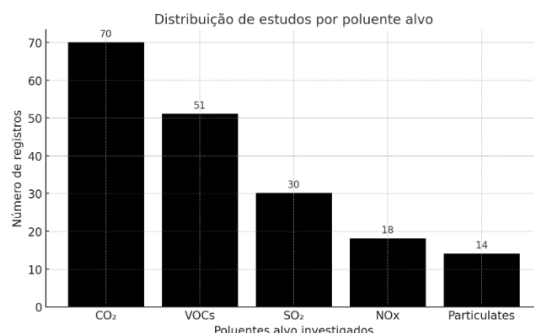
Figura 4 - Tipos de publicações identificadas na análise bibliométrica



Fonte: Autor (2025)

A distribuição dos poluentes alvo investigados revela ênfase marcante no CO₂, com 70 ocorrências, sinalizando a centralidade das discussões sobre mudanças climáticas e mitigação do efeito estufa. A expressiva quantidade de estudos voltados para VOCs (51 resultados) destaca preocupações crescentes com poluentes relacionados a emissões industriais e qualidade do ar em ambientes urbanos. Já os registros para SO₂ (30 resultados) e NOx (18 resultados) refletem o interesse contínuo em gases tradicionalmente associados à poluição atmosférica e à chuva ácida, enquanto os “particulates”(14 resultados) indicam foco específico em estudos relacionados a partículas em suspensão, ainda que em menor escala.

Figura 5 - Distribuição de estudos segundo o poluente alvo investigado.



Fonte: Autor (2025)

4.6 Limitações e lacunas da literatura

A análise bibliométrica revelou tendências consolidadas e lacunas importantes na literatura sobre adsorção de poluentes atmosféricos. Observa-se a predominância do uso de carvão

ativado e outros adsorventes tradicionais, em detrimento de materiais emergentes como MOFs e óxido de grafeno, que ainda apresentam número reduzido de estudos. Essa assimetria sugere uma ancoragem em tecnologias convencionais, o que pode limitar a diversificação de abordagens. Além disso, embora CO₂ e compostos orgânicos voláteis (VOCs) sejam amplamente investigados, poluentes como NO_x, SO₂ e material particulado permanecem pouco explorados, indicando lacunas temáticas influenciadas por agendas de pesquisa centradas nas mudanças climáticas globais.

Do ponto de vista geográfico, a produção científica concentra-se em países com maior financiamento e infraestrutura, enquanto regiões de baixa renda, como partes da América Latina, África e Oriente Médio, seguem sub-representadas no debate acadêmico sobre poluição atmosférica (WANG, 2025). Esse desequilíbrio limita a inclusão de desafios ambientais locais nas agendas globais e evidencia disparidades no acesso a redes colaborativas e capacidade de pesquisa (CHEN, 2024).

5. Conclusões

Este estudo analisou a produção científica internacional sobre o uso de adsorventes na remoção de poluentes atmosféricos, com o objetivo de mapear tendências, lacunas e perspectivas do campo, considerando seu papel estratégico na mitigação dos impactos ambientais e na promoção da saúde pública. A partir de uma análise bibliométrica realizada sobre publicações indexadas na base Web of Science, foram identificados e examinados 131 artigos publicados entre 1990 e 2025, permitindo traçar um panorama abrangente da evolução da pesquisa na área.

Os resultados indicam um crescimento significativo das publicações a partir de 2017, com destaque para a liderança de países como China, Índia, França e Estados Unidos. Observou-se a predominância do uso de adsorventes convencionais, como carvão ativado e zeólitas, geralmente aplicados na captura de CO₂, enquanto materiais emergentes, como biochar, MOFs e óxido de grafeno, além de poluentes como NO_x, SO₂ e material particulado, permanecem subexplorados. Tais achados revelam uma concentração temática em soluções consolidadas, ao mesmo tempo em que evidenciam oportunidades de inovação tecnológica.

A presente análise contribui para o desenvolvimento sustentável ao oferecer uma base empírica que pode subsidiar a tomada de decisões mais eficazes na escolha de materiais adsorventes, promovendo tecnologias mais limpas e eficientes para o controle da poluição atmosférica. Ao identificar lacunas e assimetrias no campo, o estudo também fomenta a diversificação de estratégias de pesquisa alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles relacionados à saúde ambiental, inovação e ação climática. No entanto, ressalta-se que a metodologia bibliométrica, embora eficaz para traçar padrões científicos e tecnológicos, não contempla dados experimentais de desempenho dos materiais, limitando-se à análise de publicações indexadas.

Como recomendação para pesquisas futuras, sugere-se a ampliação da investigação para outras bases de dados, bem como a integração com estudos experimentais que analisem a eficácia dos diferentes adsorventes em condições reais de operação. Essa abordagem integrada poderá fortalecer o elo entre ciência, tecnologia e políticas públicas, contribuindo de forma mais robusta para o enfrentamento dos desafios ambientais contemporâneos.

Referências

ANEGBE, B. Graphene oxide synthesis and applications in emerging.... Environmental Sciences Europe, 2024. DOI: conforme SpringerOpen. Disponível em: https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-023-00814-4?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 30 set. 2025.

ARANGO HOYOS, B. E.; et al. Exploring the capture and desorption of CO₂ on graphene-based materials. *Scientific Reports*, 2023. DOI: disponível na Nature/Scientific Reports.

WANG, Wei; XU, Yi; ZHANG, Shujie; XU, Yongdong; XUE, Xiao. Bibliometric insights into pollution research: trends, geographical disparities, and emerging environmental challenges. *Environmental Research Communications*, v. 7, 2025. DOI: 10.1088/2515-7620/xxxxxx. Disponível em: https://doaj.org/article/745265493acd47879df086c3dbbc6cfa?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 30 set. 2025.

CARNEIRO, A. O. Bioadsorventes de resíduos da agroindústria para remoção de contaminantes. *Química Nova*, v. 47, n. 5, p. 651-659, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/fwCXbnBLT8Fz8v8stN3MXHP/?lang=pt>. Acesso em: 29 set. 2025.

CHAO, Y.; DENG, N.; ZHOU, Z. A review of recent advances in metal–organic frameworks materials for zero-energy passive adsorption of chemical pollutants in indoor environments. *Science of The Total Environment*, v. 953, p. 175926, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175926. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969724060820>. Acesso em: 30 set. 2025.

CHEN, Jing et al. Unveiling trends and hotspots in air pollution control: A bibliometric analysis. *Atmosphere*, [S.l.], v. 15, n. 6, p. 630, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/15/6/630>. Acesso em: 30 set. 2025.

HAUNSCHILD, R.; BORNMANN, L.; MARX, W. Climate Change Research in View of Bibliometrics. *PLOS ONE*, v. 11, n. 2, e0149771, 2016. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1602.03834>. Acesso em: 29 set. 2025.

JABLONKA, K. M.; ONGARI, D.; MOOSAVI, S. M.; SMIT, B. Big-Data Science in Porous Materials: Materials Genomics and Machine Learning. *Joule*, v. 4, n. 1, p. 1-21, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2001.06728>. Acesso em: 29 set. 2025.

JABLOKA, M. et al. Characterization of porous materials for environmental applications. *Journal of Environmental Management*, v. 234, p. 1-10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.054>. Acesso em: 29 set. 2025.

JIN, Y. Metal-Organic Frameworks for Air Pollution Purification. *Advanced Functional Materials*, 2024. DOI: conforme Wiley Online Library. Disponível em: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.202304773>. Acesso em: 30 set. 2025.

KERSHAW, Tristan. Climate change resilience in the urban environment. In: *Climate Change and Its Impacts*. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2017. p. 1-27.

MATERIAL particulado na atmosfera urbana e suas interações com saúde humana. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2013.

NASCIMENTO, R. F. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. 2. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Carla-Vidal-7/publication/343583922_Adsorcao_Aspectos_Teoricos_e_Aplicacoes_Ambientais_2ed/links/5f32a8fda6fdcccc43c03d65/Adsorcao-Aspectos-Teoricos-e-Aplicacoes-Ambientais-2ed.pdf. Acesso em: 25 set. 2025.

NASCIMENTO, R. F. Adsorventes: Materiais e Aplicações. Fortaleza: Editora UFC, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/19569/1/2014-liv_rfnascimento.pdf. Acesso em: 29 set. 2025.

PRINGER, Sylvester Chibueze Izah; Matthew Chidozie Ogwu; Abbas Shahsavani (eds.). Air Pollutants in the Context of One Health: Fundamentals, Sources, and Impacts. Cham: Springer, 2025. SpringerLink.

QUEIROZ, B. C. Determinação quantitativa de benzeno em ambientes internos. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/15813/1/Bruna_CQ DISSERT.pdf. Acesso em: 25 set. 2025.

REIMERINK, W. Air pollution control by adsorption. [S.l.]: [s.n.], 1999. Disponível em: (link). Acesso em: dia mês ano.

REIS, J. M. dos. Técnicas de remoção de metais de águas residuárias. RSD Journal, v. 11, n. 3, p. 22830, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/26100/22830>. Acesso em: 29 set. 2025.

RYU, Z. et al. Characterization of pore size distributions on carbonaceous adsorbents. Carbon, v. 37, n. 12, p. 1915–1921, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00322-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00322-4). Acesso em: 29 set. 2025.

SILVA, T. P. Poluição do ar. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/36515/3/Polui%C3%A7%C3%A3oDoAr.pdf>. Acesso em: 25 set. 2025.

SING, K. S. W. The use of nitrogen adsorption for the characterisation of porous materials. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 187-188, p. 3-9, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)00612-4](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)00612-4). Acesso em: 29 set. 2025.

SIVARANJANEE, R. A critical review on biochar for the removal of toxic.... Science of the Total Environment, 2024. DOI: conforme SciDirect. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004565352401275X>. Acesso em: 30 set. 2025.

ZHANG, Y. et al. Biochar as the effective adsorbent to combustion gaseous pollutants: Preparation, activation, functionalization and the adsorption mechanisms. Progress in Energy and Combustion Science, v. 96, p. 101069, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036012852300028X>. Acesso em: 30 set. 2025.