

METAMATERIAIS E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Amanda de Cássia Toledo Almeida Braga – amanda@unifei.edu.br
Jesús Antonio García Sánchez – jesus@unifei.edu.br
Jeniffer de Nadae – jeniffer.nadae@unifei.edu.br

Palavras-chave: metamateriais, IA, inteligência artificial.

1. INTRODUÇÃO

O interesse em metamateriais (MMs) é crescente, impulsionado por seu potencial de aplicação em diversos ramos da engenharia. Um MM é projetado para adquirir propriedades únicas não disponíveis na natureza (Brûlé et al., 2020). Por apresentarem desafios associados à sua modelagem, o uso de recursos computacionais ajuda a reduzir experimentos e acelera o desenvolvimento dos MMs (Mora et al., 2024).

Dentre os diversos tipos de ferramentas existentes, destaca-se o emprego de inteligência artificial (IA) como instrumento para auxiliar na concepção e otimização dessas estruturas. De forma geral, a IA representa a capacidade de um computador realizar tarefas que normalmente seriam executadas por seres humanos (Lei et al., 2023).

Diante desse cenário, a pesquisa pretende examinar as produções científicas dos últimos cinco anos (2021-2025) envolvendo MMs e IA. Tal recorte temporal reflete as tendências recentes das pesquisas nos dois campos, permitindo compreender como a integração entre essas áreas vem se consolidando, identificando as oportunidades nos domínios em estudo.

2. DESENVOLVIMENTO

O presente tópico visa demonstrar os conceitos norteadores dos campos em estudo, por meio de uma breve exposição ao referencial teórico, seguido da apresentação da metodologia adotada no trabalho.

2.1 Referencial teórico

Metamateriais consistem em estruturas projetadas artificialmente que exibem propriedades não convencionais (Lee et al., 2023) que não ocorrem naturalmente. Com a crescente complexidade dos sistemas de materiais, tornou-se necessário a transição para métodos baseados em IA que pudessem impulsionar a descoberta e a inovação (Chávez-Angel et al., 2025).

A aplicação da IA otimiza parâmetros de projeto que não podem ser alcançados usando métodos tradicionais e agiliza a análise de grandes conjuntos de dados por meio de modelos generativos (Tezsezen et al., 2024). Nesse aspecto, Maurizi et al. (2022) demonstraram que redes neurais gráficas podem aprender condições de carga que correlacionam a forma deformada e o campo de tensão em MMs.

Já Liu et al. (2023), utilizaram *deep learning* em MMs acústicos para atenuar o ruído em ambientes e Isanaka et al. (2022) empregaram *machine learning* para identificar o padrão de falha de uma estrutura para fortalecer as regiões críticas. Assim, diante da expansão dos temas em áreas interdisciplinares, torna-se relevante avaliar o progresso das pesquisas envolvendo IA no *design* de MMs, tanto em termos de produção quanto em redes de colaboração.

2.2 Metodologia

A abordagem metodológica abrangeu aspectos quantitativos a partir de uma revisão bibliométrica e uma breve conceitualização teórica sobre as principais ideias que norteavam a pesquisa. O intuito foi analisar o progresso na literatura envolvendo MMs e IA, identificando os autores e países que se destacavam no tema, examinando a evolução desse campo ao longo dos anos, contagem de publicações, frequência de palavras-chave bem como tendências e perspectivas futuras.

Os critérios de elegibilidade incluíram uma pesquisa na base de dados da plataforma Scopus e as palavras-chave escolhidas foram *metamaterial** e *AI* ou “*artificial intelligence*”. A pesquisa englobou documentos do tipo artigos, artigos de conferência, revisões da literatura, livros e capítulos de livros, limitando-se a publicações em inglês nos anos de 2021 a 2025, retornando 241 documentos. Em seguida, os resultados obtidos foram exportados para o pacote Bibliometrix no

software R e examinou-se as informações coletadas, visto que a ferramenta permite um abrangente mapeamento científico da literatura (Aria & Cuccurullo, 2017), Figura 1.

Figura 1 - Percurso metodológico.



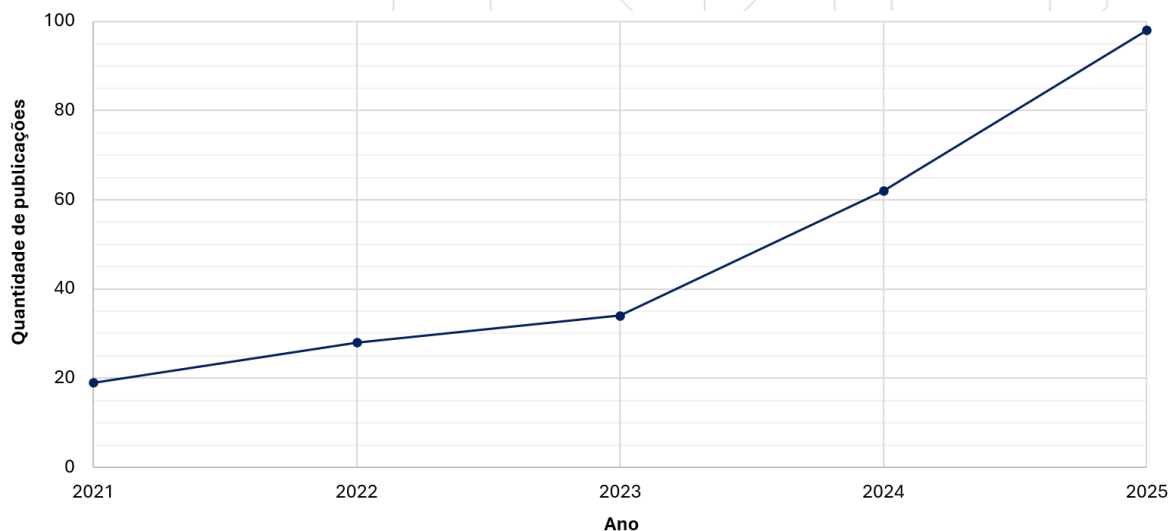
Fonte: Autores.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa no banco de dados Scopus retornou 355 documentos relacionados a temática. Porém, com os parâmetros de filtragem estabelecidos, esse número reduziu para 241 arquivos, englobando: 122 artigos, 44 artigos de conferência, 60 revisões da literatura, 4 livros e 11 capítulos de livros.

Em relação ao número de publicações ao ano, observa-se um crescimento acelerado ao longo dos últimos 5 anos, tornando-se particularmente significativo a partir de 2023, refletindo a expansão do tema. O ano de 2025 foi aquele que apresentou uma alta demanda na produção científica, com 98 documentos, Figura 2. Pode-se dizer, portanto, que o tópico segue uma tendência de crescimento exponencial.

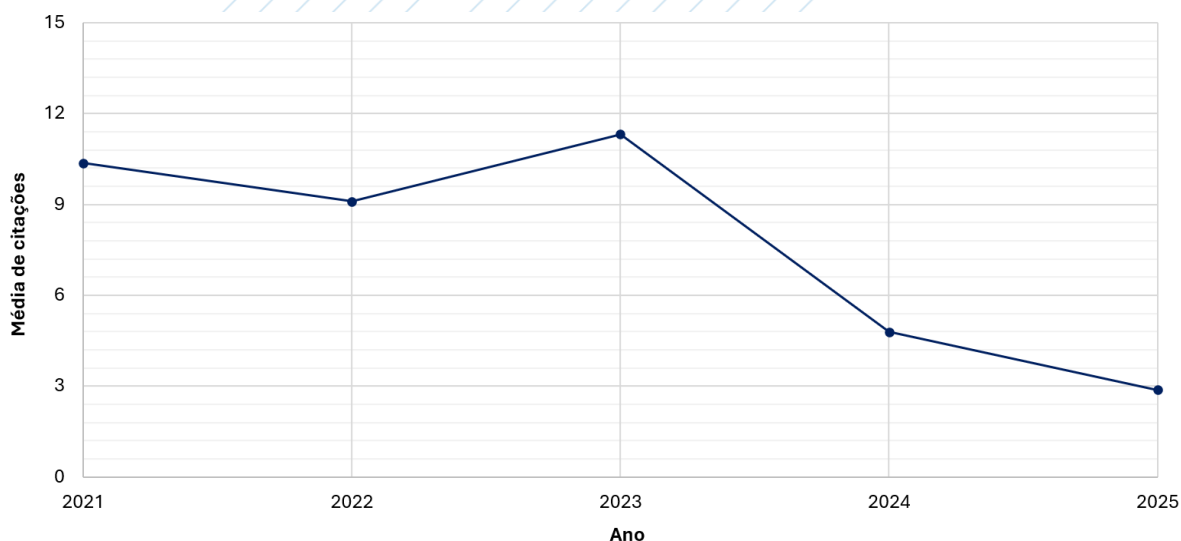
Figura 2 - Produção científica anualmente.



Fonte: Autores.

Partindo para as médias de citações por ano, 2023 se destacou com 11,32 citações seguido de 2022 com 10,37. O ano de 2025, em contrapartida, teve a média de somente 2,88 citações, Figura 3. A discrepância desses números é esperada, uma vez que os estudos mais recentes ainda não tiveram tempo suficiente para acumular citações.

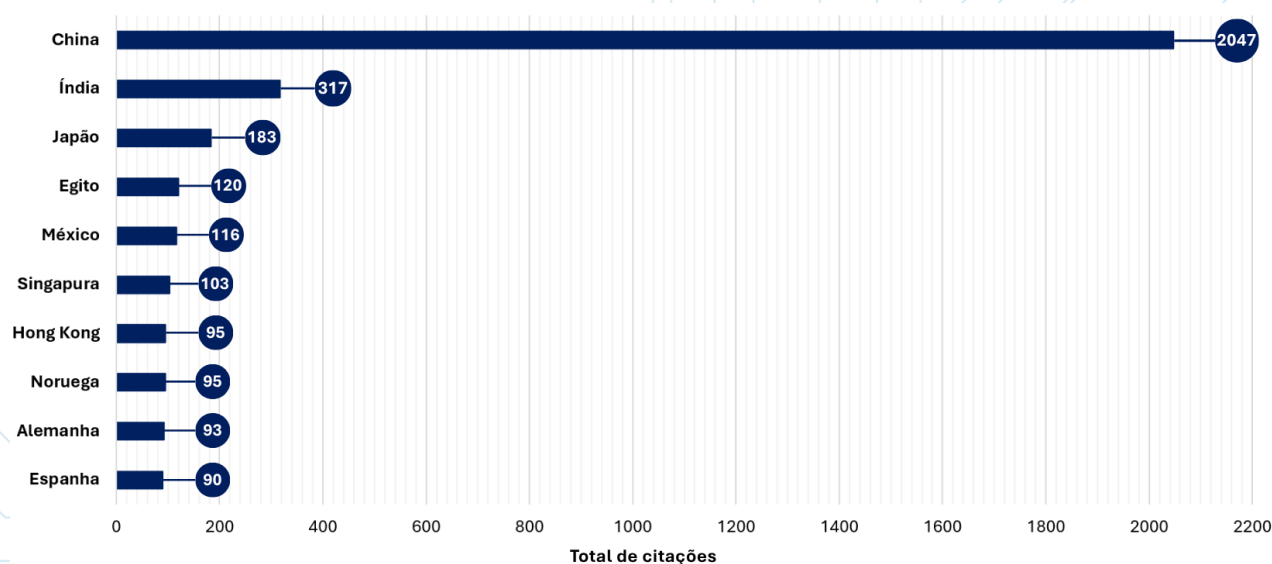
Figura 3 - Citações médias anualmente.



Fonte: Autores.

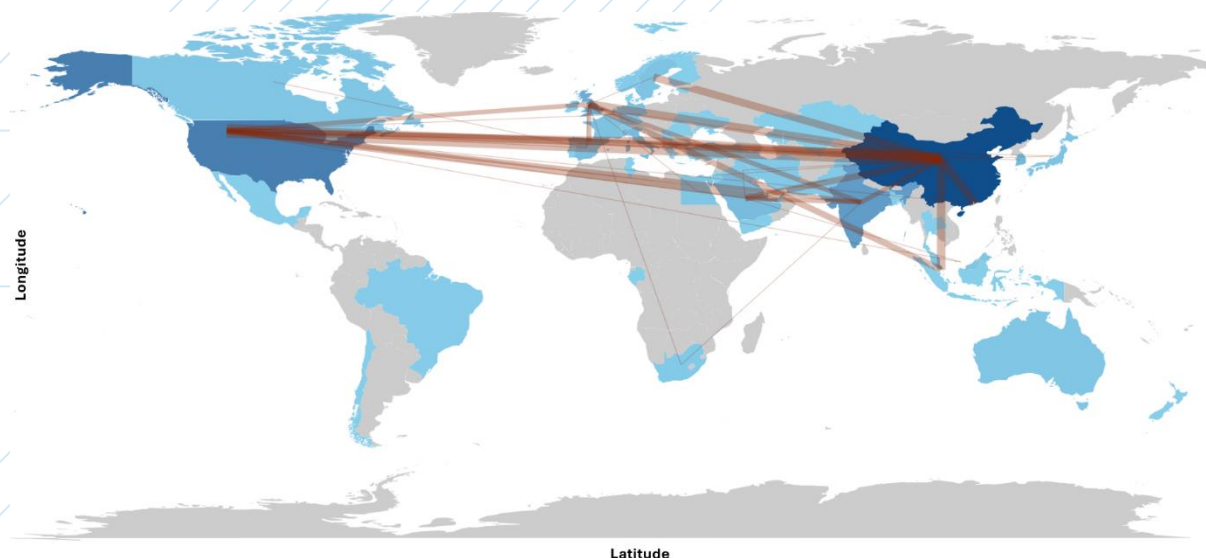
No que diz respeito ao total de citações por país, verifica-se uma forte concentração na China, totalizando 2047 citações. Em seguida, destacam-se Índia e Japão com 317 e 183 citações, respectivamente (Figura 4). Em relação a contribuição entre países, China, Estados Unidos e Reino Unido possuem uma rede de conexão mais robusta em relação as demais localidades (Figura 5). A rede evidencia ainda a baixa representatividade de países do sul global.

Figura 4 - Total de citações por cada país.



Fonte: Autores.

Figura 5 - Mapa da colaboração internacional.



Fonte: Autores.

Figura 6 - Nuvem de palavras relacionadas aos termos em estudo

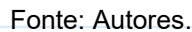
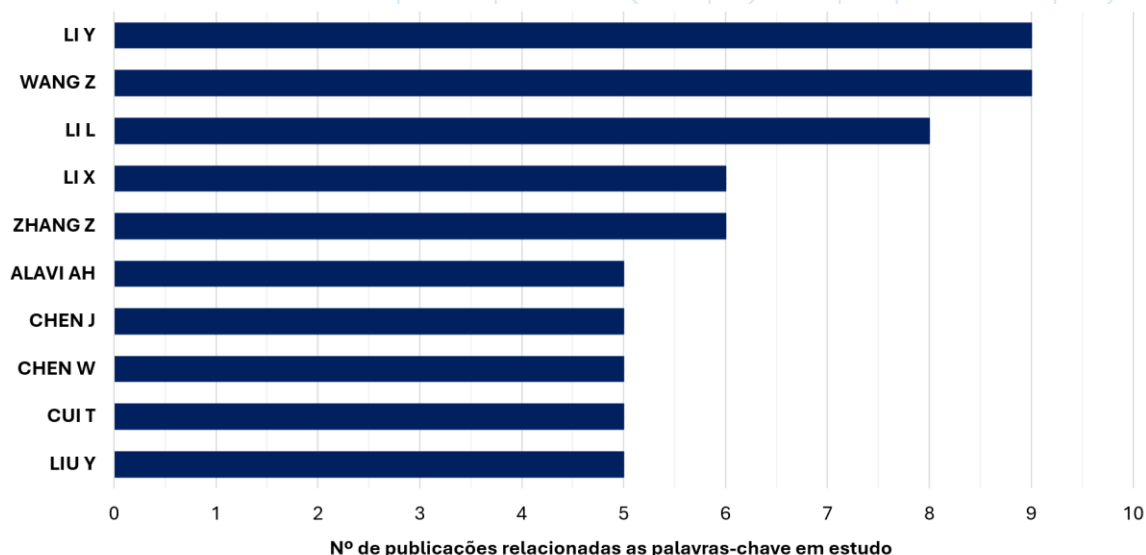
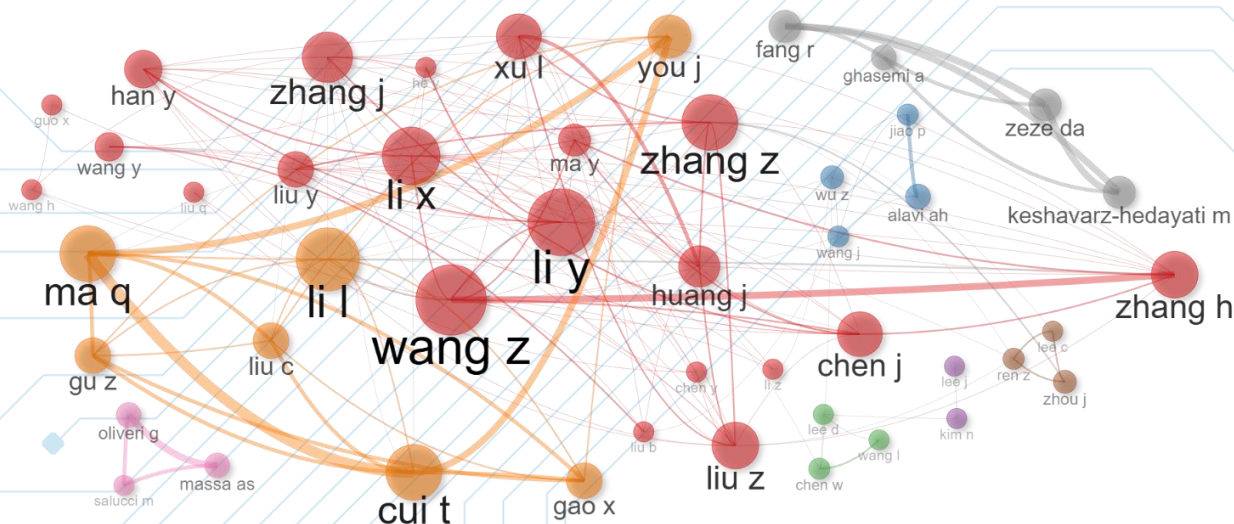


Figura 7 - Autores relevantes no tema.



Fonte: Autores.

Figura 8 - Rede de colaboração entre autores.



Fonte: Autores.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho evidenciou o crescimento expressivo da produção científica relacionada à aplicação de IA em estudos sobre MMs nos últimos cinco anos. Os resultados apontaram uma tendência ascendente de publicações a partir de 2023, além da forte presença e conexão entre autores asiáticos, sobretudo chineses, como principais polos de pesquisa na área.

Contudo, constatou-se um desequilíbrio regional, com menor integração de países do hemisfério sul, reforçando as desigualdades no acesso à infraestrutura científica e tecnológica. O mesmo ocorreu na colaboração entre autores onde, embora haja núcleos consolidados, a rede apresenta fragmentação, indicando oportunidades para integração a grupos de outras regiões.

Ademais, observou-se uma redução nas citações médias por publicação nos anos mais recentes, o que pode estar relacionado ao caráter emergente do tema e à rápida expansão de novos estudos que ainda não acumularam impacto expressivo. Assim, devido ao aumento no volume de publicações, a tendência é dispersar as citações.

Por fim, apesar do potencial da IA para solucionar problemas envolvendo MMs, os campos ainda são considerados emergentes, sendo fundamental que futuros trabalhos venham a debater a complexidade entre os temas, sobretudo promovendo abordagens que integrem aspectos sociais e ambientais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq., Brasil pelo apoio através do Processo 131025/2024-4, Bolsa de Longa Duração na modalidade Mestrado.

REFERÊNCIAS

Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>

Brûlé, S., Enoch, S., & Guenneau, S. (2020). Emergence of seismic metamaterials: Current state and future perspectives. In *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics* (Vol. 384, Issue 1). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2019.126034>

Chávez-Angel, E., Eriksen, M. B., Castro-Alvarez, A., Garcia, J. H., Botifoll, M., Avalos-Ovando, O., Arbiol, J., & Mugarza, A. (2025). Applied Artificial Intelligence in Materials Science and Material Design. *Advanced Intelligent Systems*, 7(8), 1–26. <https://doi.org/10.1002/aisy.202400986>

Isanaka, B. R., Mukhopadhyay, T., Varma, R. K., & Kushvaha, V. (2022). On exploiting machine learning for failure pattern driven strength enhancement of honeycomb lattices. *Acta Materialia*, 239, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.118226>

Lee, G., Lee, S.-J., Rho, J., & Kim, M. (2023). Acoustic and mechanical metamaterials for energy harvesting and self-powered sensing applications. *Materials Today Energy*, 37, 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2023.101387>

Lei, C., Song, J., Li, S., Zhu, Y., Liu, M., Wan, M., Mu, Z., Tay, F. R., & Niu, L. (2023). Advances in materials-based therapeutic strategies against osteoporosis. *Biomaterials*, 296, 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2023.122066>

Liu, T.-W., Chan, C.-T., & Wu, R.-T. (2023). Deep-Learning-Based Acoustic Metamaterial Design for Attenuating Structure-Borne Noise in Auditory Frequency Bands. *Materials*, 16(5), 1–23. <https://doi.org/10.3390/ma16051879>

Maurizi, M., Gao, C., & Berto, F. (2022). Predicting stress, strain and deformation fields in materials and structures with graph neural networks. *Scientific Reports*, 12(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26424-3>

Mora, A., Herrera-Ramos, G., Ramirez-Gutierrez, D. L., Sanchez-Ante, G., Batres, R., Roman-Flores, A., Fuentes-Aguilar, R. Q., Molina, A., & Cuan-Urquizo, E. (2024). Modeling and design of architected structures and metamaterials assisted with artificial intelligence. *Materials Research Express*, 11(12), 1–54. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad9dbc>

Tezsezen, E., Yigci, D., Ahmadpour, A., & Tasoglu, S. (2024). AI-Based Metamaterial Design. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(23), 29547–29569. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c04486>