

Estado del arte de la microscopía electrónica de barrido y sus aplicaciones en la ciencia de materiales: un análisis bibliométrico

J. C. Terán, A. M. Turatti, M. A. Villarreal*

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Instituto de Matemática, Estatística e Física, Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil.

*Autor responsable, E-mail: mavu8473@gmail.com

Resumen

Este análisis bibliométrico explora el estado del arte de la microscopía electrónica de barrido (MEB) y sus aplicaciones en la ciencia de materiales, empleando datos recopilados de la base de datos *Web of Science* entre 2003 y 2024, y la herramienta *Bibliometrix*. El objetivo es identificar tendencias emergentes y destacar las áreas de investigación más relevantes en la ciencia de materiales. Los resultados revelan un crecimiento anual promedio del 7.59% en la producción de publicaciones científicas, con China, India y Estados Unidos liderando la contribución académica en este campo. Entre las principales áreas de investigación identificadas se encuentran la síntesis y caracterización de materiales, la resistencia a la corrosión, la nanotecnología, los materiales compuestos y los biomateriales. Asimismo, se observa un aumento significativo en los estudios relacionados con nanotecnología, biomateriales y el uso de técnicas complementarias a la MEB, como la espectroscopía Raman. En conclusión, la MEB se consolida como una herramienta esencial para la caracterización de materiales, con aplicaciones cada vez más diversificadas en múltiples disciplinas y su papel en el desarrollo de tecnologías innovadoras. Además, el estudio subraya la utilidad del análisis bibliométrico como un método eficaz para evaluar la producción científica y resaltar datos clave en un dominio científico.

Palabras claves: Microscopía electrónica de barrido, análisis bibliométrico, producción científica, ciencia de materiales, tendencias de investigación, colaboración internacional.

Abstract

This bibliometric analysis explores the state of the art of scanning electron microscopy (SEM) and its applications in materials science, using data collected from the Web of Science database between 2003 and 2024, and the Bibliometrix tool. The objective is to identify emerging trends and highlight the most relevant research areas in materials science. The results reveal an average annual growth of 7.59% in the production of scientific publications, with China, India and the United States leading the academic contribution in this field. Among the main research areas identified are materials synthesis and characterization, corrosion resistance, nanotechnology, composite materials, and biomaterials. Likewise, a significant increase is observed in studies related to nanotechnology, biomaterials, and the use of complementary techniques to SEM, such as Raman spectroscopy. In conclusion, SEM is consolidated as an essential tool for the materials characterization, with increasingly diverse applications across multiple disciplines and its role in the development of innovative technologies. Furthermore, the study highlights the usefulness of bibliometric analysis as an effective method for evaluating scientific production and highlight key data in a scientific field.

Keywords: Scanning electron microscopy, bibliometric analysis, scientific production, materials science, research trends, international collaboration.

Introducción

La microscopía electrónica de barrido (MEB) es una herramienta esencial en la física y la ciencia de materiales, destacada por su capacidad para visualizar con alta resolución la microestructura y morfología superficial de diversos materiales (Özdoğan y Tosun, 2022). Esta técnica utiliza un haz de electrones que se enfoca sobre una muestra y se desplaza siguiendo un patrón de líneas paralelas. Durante este proceso, el impacto de los electrones genera diferentes señales, como electrones secundarios, electrones retrodispersados y rayos X característicos. Los electrones secundarios permiten obtener imágenes de alta resolución, mientras que los rayos X característicos, analizados mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS), proporcionan información sobre la composición elemental de la superficie. Así, la interacción entre el haz de electrones y la muestra genera micrografías, espectros y otros datos que, analizados correctamente, revelan información detallada sobre la estructura y la composición del material.

Aunque los resultados de la MEB puedan parecer simples a primera vista, encierran un gran volumen de datos que requieren un análisis meticuloso. Para obtener resultados satisfactorios, es fundamental un sólido conocimiento en áreas como la óptica electrónica, la interacción entre electrones y la muestra, el funcionamiento de los detectores, y el procesamiento de señales e imágenes (Bogner et al., 2007). Este marco interdisciplinario es clave para llevar a cabo análisis exhaustivos y extraer conclusiones significativas.

La microscopía electrónica de transmisión (MET) ha sido, en general, la técnica que más ha impulsado los avances y el desarrollo de nuevas metodologías, consolidándose como un referente de progreso en la instrumentación dentro del campo de la microscopía electrónica. Gracias a su capacidad para alcanzar resoluciones a nivel atómico, la MET ha motivado la creación de enfoques innovadores orientados a maximizar este potencial, entre los que destacan:

- La Microscopia Electrónica de Transmisión Criogénica (Cryo-TEM): es una técnica avanzada de MET utilizada principalmente en biología estructural (ganadora del premio Nobel de Química en 2017).
- La Tomografía Electrónica (Electron Tomography): es una técnica avanzada utilizada principalmente en MET que permite obtener reconstrucciones 3D de muestras a escala nanométrica.
- La Microscopia Electrónica de Transmisión en modo de Barrido (STEM): es una técnica que combina la MET y el barrido para mejorar el contraste y la resolución de las imágenes. Uno de los puntos fuertes de esta técnica es que permite usar distintos detectores simultáneamente.
- La Microscopia Electrónica de Transmisión con corrección de aberraciones (Aberration-corrected TEM): es una versión avanzada de la MET que utiliza ópticas electrónicas corregidas para eliminar o minimizar las aberraciones del sistema de lentes (principalmente la aberración esférica) y poder observar estructuras aún más finas.

En comparación, la MEB también ha tenido desarrollos, fundamentalmente en la facilidad de uso, imágenes 3D superficiales y análisis químicos con detectores EDX, pero su evolución ha sido más gradual que disruptiva. Entre sus variantes actuales se destacan:

- La Microscopia Electrónica de Barrido por Emisión de Campo (FE-SEM): es un tipo de MEB que utiliza una fuente de emisión de electrones por efecto campo en lugar de una fuente convencional de electrones. Así, se puede obtener una mejor resolución (nanométrica), un mejor contraste en muestras no conductoras y la posibilidad de trabajar con bajas energías, reduciendo el daño a las muestras.
- La Microscopia Electrónica de Barrido por Haz de Iones Enfocado (FIB-SEM): es una combinación de la MEB con un haz de iones enfocado, generalmente de Galio, que permite modificar o “cortar la muestra” a nivel nanométrico mientras ésta es observada a través de la MEB.

La revisión de la producción científica y el análisis bibliométrico son métodos ampliamente utilizados para examinar grandes volúmenes de datos científicos. Estos permiten comprender la evolución de un campo específico y, al mismo tiempo, identificar áreas emergentes dentro del mismo (Donthu et al., 2021). Para localizar y analizar los documentos presentes en bases de datos científicas, se utiliza una herramienta de código abierto diseñada para la investigación

cuantitativa en cienciometría y bibliometría, basada en métodos de análisis bibliométrico. En particular, mediante el uso de las aplicaciones *R* y *Rstudio*, se incorpora la biblioteca *Bibliometrix*, desarrollada específicamente para estos fines, la cual facilita la creación de mapas científicos (Aria y Cuccurullo, 2017). Esta herramienta ha sido aplicada en múltiples proyectos de investigación y en diversas disciplinas que requieren análisis de este tipo (Kilicoglu y Mehmetcik, 2021; Shikoh y Polyakov, 2020; Tauchen et al., 2023; Terán et al., 2021).

Existen numerosos enfoques para resumir la cantidad de actividad científica dentro de un dominio, pero la bibliometría se destaca por su capacidad para introducir un proceso de revisión sistemático, transparente y reproducible. Este método permite identificar datos relevantes, como la co-citación, el acoplamiento bibliográfico, el análisis de colaboración científica y el uso de palabras clave reportadas por autores o revistas, entre otros (Aria et al., 2020). Además, *Bibliometrix* permite realizar rutinas avanzadas de importación de datos bibliográficos desde bases de datos como *Scopus*, *Clarivate Analytics*, *Web of Science*, y *Cochrane*. A partir de estos datos, se generan matrices que posibilitan sintetizar los hallazgos de investigaciones previas y evaluar el progreso en una línea de investigación específica.

En este estudio, se realizó un análisis bibliométrico para explorar el estado del arte de la microscopía electrónica de barrido y sus aplicaciones en la ciencia de materiales, con el fin de identificar las tendencias emergentes, los patrones de colaboración científica y las áreas de investigación de mayor impacto en el campo.

Metodología

El análisis bibliométrico se desarrolló en cuatro etapas, estableciendo una línea de investigación basada en la evidencia:

1. Selección de documentos: los documentos fueron seleccionados de la base de datos *Web of Science* (WoS) siguiendo criterios establecidos, y los datos se exportaron en formato TXT.
2. Descripción y análisis estadístico: se realizó una caracterización detallada del conjunto de datos resultante y su posterior análisis estadístico.
3. Visualización de relaciones: mediante el uso de las herramientas *R* y *Bibliometrix*, se generaron visualizaciones que representaron las relaciones bibliométricas.
4. Análisis de los resultados y conclusiones: se interpretaron los hallazgos obtenidos para extraer conclusiones relevantes.

En la primera etapa, el acceso a los documentos se obtuvo gracias a un permiso gestionado a través del *Portal de Jornais CAPES/MEC* (Portal.periodicos.CAPES, 2024) que permitió la consulta remota de contenido suscrito por la Universidade Federal do Rio Grande (FURG). La búsqueda se delimitó a 3 criterios: (a) período de las publicaciones, desde 2003 hasta 2024, (b) uso del descriptor MEB y, (c) condición de la función lógica aplicada $F: (scanning\ electron\ microscopy) \cap (materials\ science) \rightarrow Documents$ en el campo de registro (título, resumen, palabras clave del autor, palabras clave de la base de datos). La Tabla 1 presenta un resumen de los documentos encontrados, clasificados principalmente como artículos científicos.

Descriptores	Filtro	N° de Documentos	Link
"Scanning electron microscopy" AND "materials science"		837	Link_WoS
"Scanning electron microscopy" AND "materials science"	Artículos	707	Link_WoS
"Scanning electron microscopy" AND "materials science"	"Artículos" AND "2003-2024"	687	Link_WoS

Tabla 1. Resultados de la consulta en la base de datos Web of Science.

En la segunda etapa, los datos recuperados se analizaron utilizando *RStudio* 2023.09.1+494 junto con el paquete *bibliometrix* de *R*. Los datos se importaron a *RStudio* y se transformaron en una tabla bibliográfica que abarcó los 687 artículos seleccionados para el estudio. Posteriormente, los datos se normalizaron y analizaron por duplicado para obtener resultados descriptivos relacionados con las citaciones, la información científica y la productividad.

En la tercera etapa, se llevaron a cabo análisis duplicados utilizando funciones específicas para calcular y visualizar redes bibliométricas, incluyendo citaciones, autores, países, palabras clave de los autores y coocurrencias de palabras clave en la base de datos. Asimismo, se analizaron redes de acoplamiento bibliográfico, como la citación conjunta y las coocurrencias de palabras clave, en una red bibliométrica direccional y bipartita (matrices rectangulares de Artículos x Atributos). Se generó un modelo gráfico de todas estas redes mediante algoritmos del grupo de Lovain (Blondel et al., 2008), implementados en la función *networkPlot* del paquete *R*. Todas las redes se normalizaron utilizando diversos coeficientes y métricas, como el índice de inclusión de Simpson, el índice de proximidad (fuerza de asociación), el índice de similitud de Jaccard y el coeficiente de coseno de Salton. Además, se utilizó un algoritmo de derivación de Porter para reducir las palabras flexionadas a su forma raíz.

En la cuarta etapa, además del análisis cuantitativo, se efectuó un análisis interpretativo de los cinco artículos más citados en el período estudiado. Para ello, se empleó el Análisis de Contenido (Bardin, 2011), de acuerdo con las siguientes fases: pro-análisis, lectura de los títulos y resúmenes de los artículos seleccionados según los descriptores proporcionados; exploración del material, selección de segmentos relevantes, codificación y definición de unidades de registro y significado; tratamiento de resultados, categorización, inferencia, interpretación y sistematización de los hallazgos. Finalmente, se elaboró el meta-texto que sintetizó los resultados, discusiones y conclusiones del estudio, destacando tendencias clave en MEB.

Resultados y discusiones

Se analizaron un total de 687 artículos publicados entre 2003 y 2024, provenientes de 258 revistas diferentes, con una tasa de crecimiento anual del 7.59%. En este período, 3343 autores contribuyeron a la producción científica sobre MEB en ciencias de materiales, con una media de 5.56 coautores por documento y un 28.82% de colaboración internacional. Además, se identificaron 2641 palabras clave y 28246 referencias bibliográficas en el corpus analizado. Cada documento recibió, en promedio, 24.09 citas.

La Figura 1 presenta el análisis del comportamiento anual de la producción científica (2003-2024), que muestra una tendencia polinómica de grado 6 y destaca un crecimiento sostenido en el número de publicaciones sobre MEB en ciencia de materiales a lo largo del período. Aunque se observaron fluctuaciones anuales, la línea de producción representada por la línea azul continua señala un aumento progresivo. Es relevante destacar que la curva de tendencia polinómica (línea punteada) sugiere una desaceleración en el crecimiento entre 2018 y 2021, posiblemente atribuible al impacto de la pandemia COVID-19. Sin embargo, los datos más recientes, correspondientes a los años 2022 a 2024, evidencian un nuevo impulso en la producción científica, superando incluso las predicciones iniciales del modelo polinómico. Este repunte sugiere una recuperación activa y un renovado interés en la investigación en este campo.

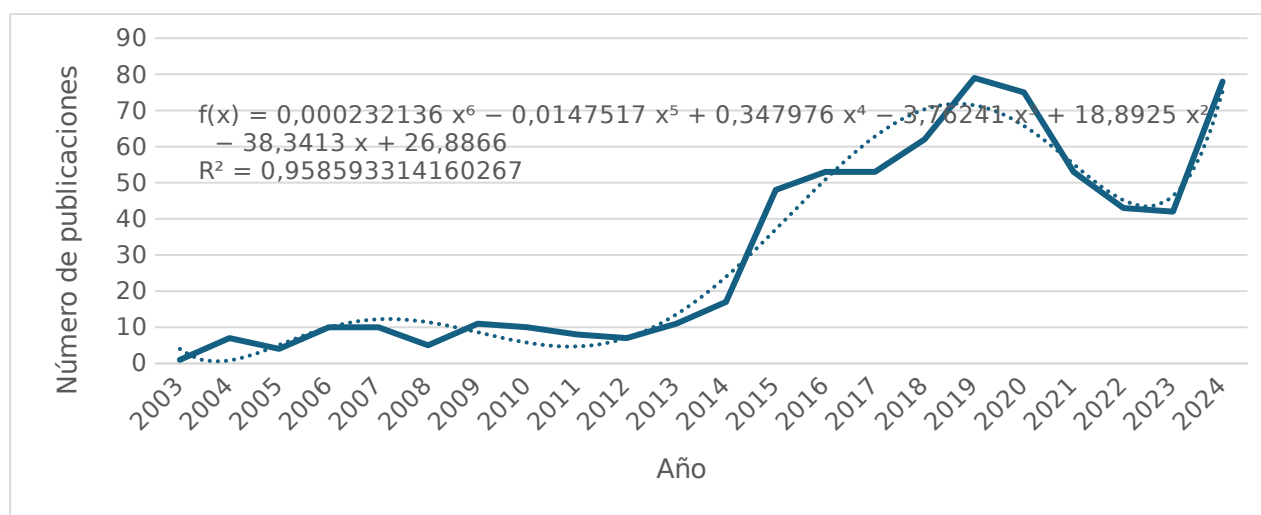


Fig. 1. Producción científica anual que utiliza la MEB y sus aplicaciones en ciencia de materiales.

En la Figura 2 se observan las revistas con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema, que el repositorio WoS también permitió identificar. Las principales fueron *Journal of Materials Science and Technology* y *Heliyon*, con 241 y 51 artículos, respectivamente.

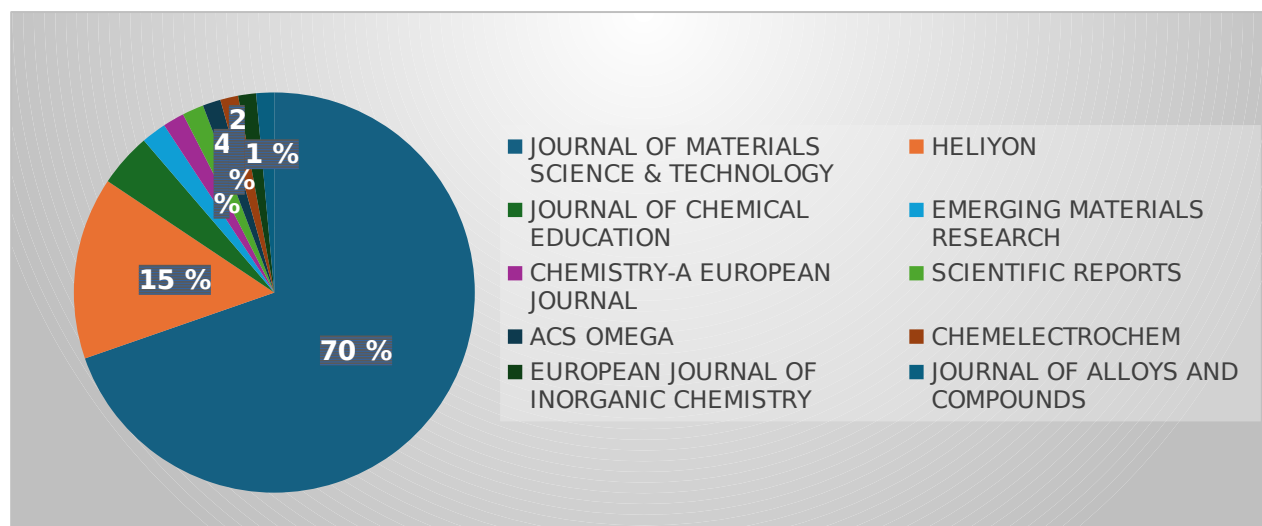


Fig. 2. Revistas con mayor número de publicaciones que utilizan la MEB y sus aplicaciones en ciencia de materiales.

La Figura 3 presenta el análisis de la red social de colaboración entre países en las 687 publicaciones científicas seleccionadas, se observa que la red azul, en la cual se sitúa Brasil, muestra conexiones más intensas con España, seguida de Alemania e Irán. Analizando la producción científica total por país, se identificó que 37.12% de los artículos se localizan en China, 8.30% en India, 6.40% en Estados Unidos, 4.66% en Alemania, 3.64% en Rusia, mientras que Brasil representa el 1.75% de la producción total. Cabe señalar que el 30.13% restante se distribuye entre los otros países que participan en estas redes de colaboración. En resumen, más del 50% de la producción que utilizan la MEB y sus aplicaciones se concentra en los tres primeros países (China, India y Estados Unidos) de un total de 65 países que contribuyeron al tema durante el período estudiado. Sin embargo, cuando se analizan las producciones en coautoría, se identificó que 47.06% de los artículos se localizan en Reino Unido, 41.67% en Italia, 37.50% en Alemania, 36.84% en Corea, 28.57% en Irán y un 25% en Brasil, observándose que los países que más producen no siempre son los que más colaboran con otros países. En este sentido, Vanz y Stumpf (2010) aclaran que "la coautoría es sólo una faceta de la colaboración científica, ya que no mide la colaboración en su totalidad y complejidad" (Vanz & Stumpf, 2010).

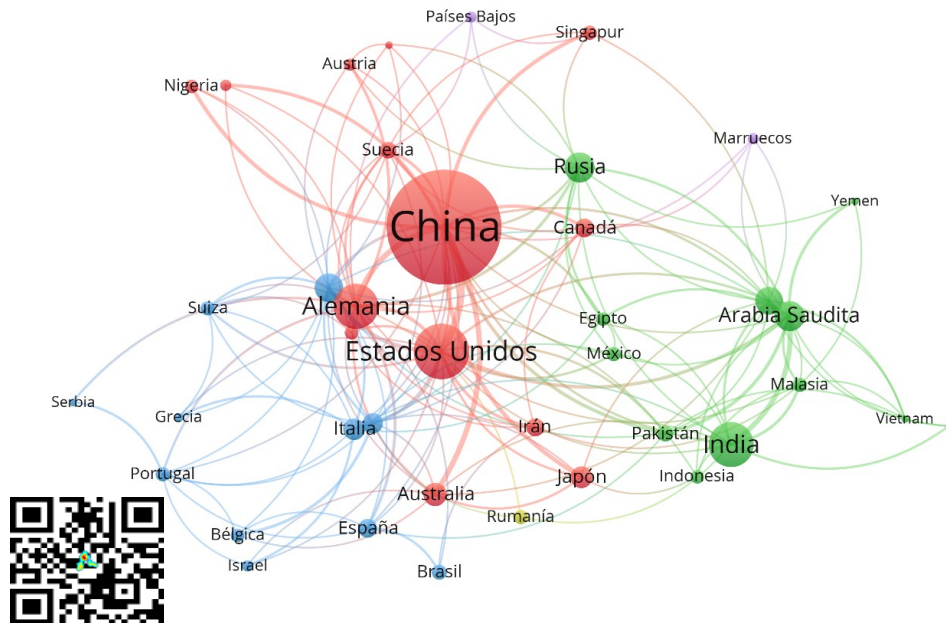


Fig. 3. Redes de colaboración entre países. Método estándar de análisis de redes, algoritmo de agrupamiento de Louvan, fuerza de repulsión 0.1.

El análisis de las palabras clave utilizadas en los documentos seleccionados permite considerar posibilidades de creación de redes de colaboración científica derivadas de la proximidad temática de los objetos de investigación, como también monitorizar la expansión de las temáticas a lo largo del período analizado. La Figura 4 presenta la red de co-ocurrencia de palabras clave en artículos que utilizan la MEB y sus aplicaciones en la ciencia de materiales, y revela una fuerte centralidad del tema "ciencia de materiales", conectada a áreas como "nanotecnología", "química de materiales" y "microscopía electrónica de barrido". Se observan clústeres temáticos bien definidos (descritos en la Tabla 2), como el relacionado con "corrosión", "aleación de magnesio" y "recubrimientos", otro con "grafeno" y "nanotubos de carbono", y uno más asociado a "biomineralización" y "polímeros". La presencia de nodos como "espectroscopía Raman" y "DRX (difracción de rayos X)" indica la complementariedad de técnicas analíticas en este campo. Finalmente, la red muestra la relevancia de la MEB en aplicaciones que van desde la "microestructura" y "propiedades mecánicas" hasta la "fisicoquímica" y "propiedades ópticas" de los materiales.

A partir de la identificación de los clústeres, es posible analizar el mapa temático categorizando los temas de investigación según su relevancia (centralidad) y grado de desarrollo (densidad). Esto permite identificar tanto temas emergentes como áreas en declive dentro de un campo científico específico, en este caso, la ciencia de materiales. La Figura 5 presenta el mapa temático basado en los títulos de los artículos, ilustrando las relaciones entre distintas áreas de investigación dentro del ámbito de la ciencia de materiales y la nanotecnología. Los temas ubicados en la parte superior derecha del mapa, como "síntesis y caracterización de nanopartículas" y "efecto de corrosión de la aleación", corresponden a áreas de investigación maduras y centrales en este campo.

Por otra parte, los temas en la parte inferior izquierda, como "crecimiento de películas por ablación láser" y "propiedades estructurales y mecánicas", se asocian con áreas emergentes o en declive. Asimismo, los temas en la parte superior izquierda, como "microscopía electrónica en materiales", representan nichos bien desarrollados, mientras que aquellos en la parte inferior derecha, como "compuestos basados en carbono", corresponden a áreas fundamentales que sirven de base para investigaciones más amplias en este campo.

sus objetivos se orientan a explorar las propiedades únicas de estos materiales en diversas aplicaciones, con una concentración en biomedicina/salud, energía, electrónica y ciencia de materiales. El uso emergente de herramientas computacionales, como el aprendizaje automático para el análisis de datos complejos, también es visible.

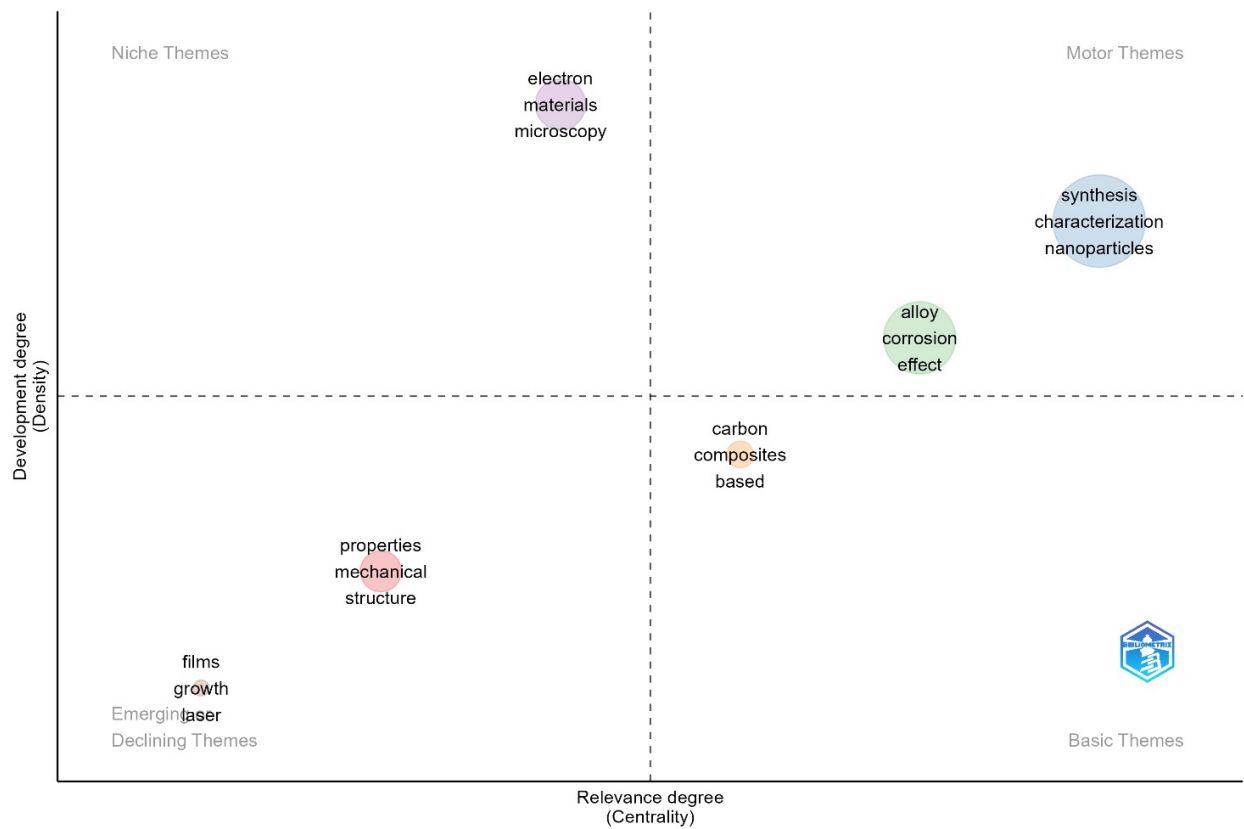


Fig. 5. Mapa temático - títulos de los documentos, considerando palabras individuales de las 250 palabras más frecuentes, con un mínimo de 5 ocurrencias por cada mil documentos. Tres palabras por clúster, algoritmo de agrupamiento de Louvan, fuerza de repulsión 0.

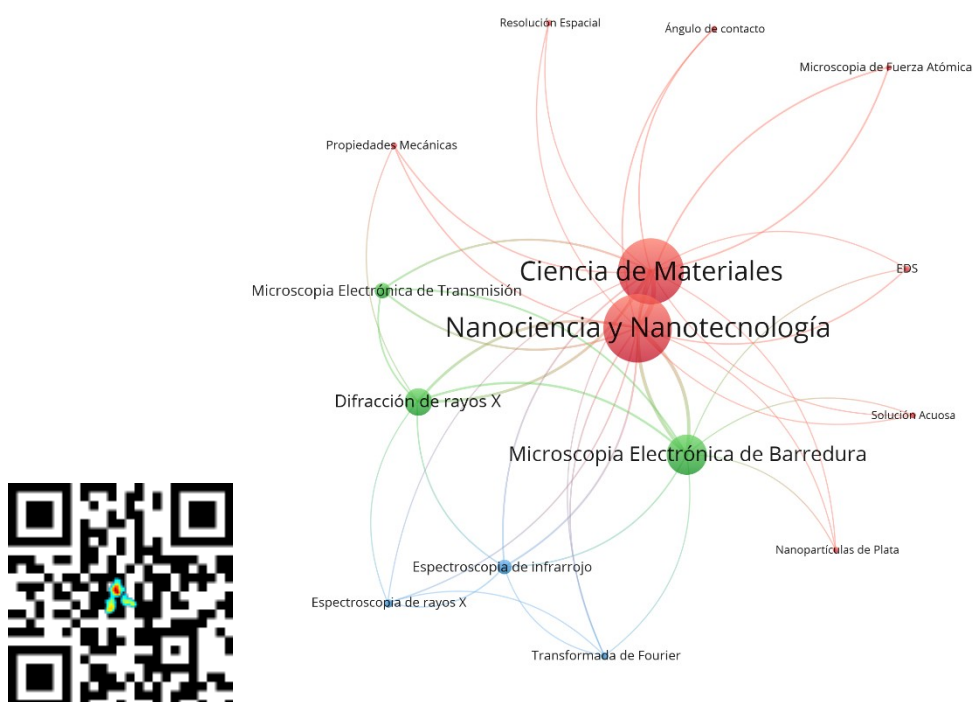


Fig. 6. Red de co-ocurrencia, resumen de artículos de 2003 a 2024 en la categoría “Nanociencia y Nanotecnología”. Método de análisis de redes, algoritmo de agrupamiento de Louvan, fuerza de repulsión 0.1, número mínimo de aristas 2.

La Tabla 3 presenta los 5 artículos más citados durante el período de estudio, según la base de datos Web of Science, junto con un análisis de citaciones basado en el método de análisis de citaciones globales normalizadas (CGN). En este contexto, el número de citaciones locales (CL) corresponde a las citaciones recibidas exclusivamente de los artículos incluidos en el conjunto analizado, mientras que el número de citaciones globales (CG) representa las citaciones recibidas de cualquier artículo indexado en la Web of Science. Este enfoque permite comparar el impacto de un artículo con el promedio de citaciones de otros artículos publicados en el mismo campo y año. El cociente CL/CG indica el porcentaje de citaciones que son locales, mientras que el indicador CGN normaliza las citaciones globales en función del promedio del campo, proporcionando una medida comparativa del impacto.

El análisis de citaciones resulta fundamental para identificar los artículos más influyentes en un campo de investigación. El número de citaciones que recibe un artículo refleja su visibilidad, impacto y reconocimiento dentro de la comunidad científica. Diversos factores, como la originalidad y relevancia del tema, la calidad metodológica, la claridad en la redacción y la difusión del artículo, influyen en el volumen de citaciones recibido. En general, un mayor número de citaciones está asociado con un impacto más significativo y una contribución más destacada al avance del conocimiento.

Documento	DOI	Citaciones Locales (CL)	Citaciones Globales (CG)	Cociente CL/CG (%)	CGN
(HOLZER et al., 2004)	10.1111/j.0022-2720.2004.01397.x	2	305	0.656	3.477
(Cui et al., 2017)	10.1016/j.jmst.2017.10.010	3	86	3.488	2.751
(Zhang et al., 2015)	10.1016/j.jmst.2015.09.003	3	90	3.333	2.440
(Chen et al., 2015)	10.1016/j.jmst.2014.09.016	3	36	8.333	0.977
(Lu et al., 2015)	10.1016/j.jmst.2014.10.013	3	25	12.000	0.680

Tabla 3. Artículos más citados según la Web of Science. Método de Análisis de Citaciones Globales Normalizada.

A continuación, se presenta una breve descripción de los aportes y principales conclusiones de cada uno de los cinco artículos más citados, según la Web of Science.

Holzer et al. (2004) exploran la nanotomografía por haz de iones focalizado (FIB) como técnica complementaria a la MEB para la caracterización tridimensional de estructuras a nivel micro y nanométrico. Esta técnica permite obtener información detallada sobre la distribución de tamaños de partículas y poros, superando las limitaciones de métodos tradicionales. En su estudio, aplicaron la nanotomografía FIB al análisis de cerámicas porosas de BaTiO_3 , revelando diferencias significativas en las distribuciones de tamaño de partículas y espacio poroso en comparación con los métodos convencionales. Esta información es crucial para el modelado computacional de procesos de transporte y degradación en materiales, así como para la predicción y optimización de propiedades como la resistencia mecánica, la conductividad térmica y la permeabilidad.

Cui et al. (2017) investigan la efectividad de un recubrimiento superhidrofóbico de oxidación por micro arco (MAO) para mejorar la resistencia a la corrosión de la aleación Mg-4Li-1Ca. Utilizando MEB, caracterizaron las propiedades del recubrimiento y observaron una mejora significativa en la resistencia a la corrosión. El recubrimiento superhidrofóbico reduce el contacto entre la superficie del material y los agentes corrosivos, contribuyendo significativamente a su durabilidad. Los mecanismos de protección contra la corrosión se basan en la formación de una capa porosa que, modificada con ZnSA superhidrofóbico, reduce la energía superficial y sella las porosidades.

Zhang et al. (2015) presentan la fabricación de superficies superhidrofóbicas en la aleación de magnesio AZ31 mediante un tratamiento hidrotérmico combinado con la modificación con ácido esteárico (SA). Este proceso mejora significativamente la resistencia a la oxidación. La MEB permitió observar la formación de una estructura en forma de pétalo, la cual mejora las propiedades superhidrofóbicas y la resistencia a la corrosión del recubrimiento, ofreciendo un gran potencial para diversas aplicaciones industriales.

Chen et al. (2015) investigan la formación de películas de conversión de hidrotalcita (HT) de Mg-Al en aleaciones de Mg con bajo contenido de Al (AZ31) mediante un proceso de crecimiento *in situ* en un tiempo de tratamiento corto. Analizaron cómo los parámetros de tratamiento afectan las propiedades de las películas. La MEB permitió revelar detalles de la superficie, como la compactación, continuidad y presencia de microgrietas. Los resultados identificaron un proceso "óptimo" para sintetizar este tipo de películas con mejores propiedades.

Lu et al. (2015) analizan los procesos de corrosión en acero de baja aleación (acero al carbono aleado con 3% de Ni y 0,3% de Cu) en soluciones bicarbonatadas desairadas, un aspecto crítico en el diseño de materiales para el almacenamiento de residuos nucleares de alto nivel. Utilizando MEB, observaron la formación de una película de productos de corrosión en la superficie del acero, promovida principalmente por la presencia de trazas de oxígeno.

En conjunto, estos estudios destacan la versatilidad de la MEB como herramienta clave para la caracterización de materiales y el desarrollo de recubrimientos avanzados con propiedades mejoradas. La MEB facilita el análisis detallado de la morfología y la microestructura de los

materiales, proporcionando información crucial para comprender su comportamiento y optimizar su desempeño en diversas aplicaciones.

Conclusiones

El análisis bibliométrico se presenta como una herramienta valiosa para evaluar la producción científica y su impacto en cualquier área del conocimiento. La bibliometría demuestra su potencial al identificar datos clave dentro de un campo científico, lo que permite revelar tendencias, colaboraciones internacionales y áreas emergentes de investigación que impulsan el avance del conocimiento.

El estudio bibliométrico realizado evidencia un notable crecimiento en la producción científica, con un incremento anual promedio del 7.59% en el número de artículos publicados entre 2003 y 2024. Este crecimiento ha estado acompañado por una destacada colaboración internacional, reflejada en que el 28.82% de los documentos analizados cuentan con coautoría entre investigadores de diferentes países. Este desarrollo sostenido y la diversificación temática sugieren que la MEB continuará desempeñando un papel fundamental en el futuro de la disciplina. Entre los países con mayor producción científica relacionada con la MEB y sus aplicaciones destacan China, India, Estados Unidos, Alemania, Rusia, Corea del Sur y Brasil. En cuanto a la colaboración internacional, sobresalen naciones como el Reino Unido, Italia, Alemania, Corea del Sur, Irán y Brasil.

Las tendencias emergentes en el uso de la MEB apuntan hacia campos como la nanotecnología, los biomateriales, los recubrimientos y películas delgadas, así como la integración de técnicas complementarias. Estas líneas de investigación reflejan un enfoque multidisciplinario en el que la combinación de metodologías y áreas de estudio está impulsando avances significativos en la ciencia de materiales.

El análisis de los cinco artículos más citados en este estudio pone de manifiesto la versatilidad de la MEB como herramienta esencial para la caracterización de la microestructura y morfología de diversos materiales. En este contexto, la MEB se consolida como una técnica clave en la ciencia de materiales, al proporcionar información crítica sobre las propiedades estructurales de los materiales, lo cual es determinante para el desarrollo científico y tecnológico del área.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar el apoyo recibido por el Instituto de Matemática, Estadística e Física (IMEF) de la Universidade Federal do Rio Grande (FURG), a través del proyecto EXT-2564.

Referencias

- 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>
- Aria, M., Misuraca, M., & Spano, M. (2020). Mapping the evolution of social research and data science on 30 years of social indicators research. *Social indicators research*, 149, 803-831. <https://doi.org/10.1007/s11205-020-02281-3>
- Bardin, L. (2011). *Análise de conteúdo*. Edições 70.
- Blondel, V. D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R., & Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008(10), P10008. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2008/10/p10008>
- Bogner, A., Jouneau, P. H., Thollet, G., Basset, D. M., & Gauthier, C. (2007). A history of scanning electron microscopy developments: Towards "wet-STEM" imaging. *Micron*, 38(4), 390-401. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2006.06.008>

- Chen, J., Song, Y., Shan, D., & Han, E.-H. (2015). In Situ Growth Process of Mg-Al Hydrotalcite Conversion Film on AZ31 Mg Alloy. *Journal of Materials Science & Technology*, 31(4), 384–390. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.09.016>
- Cui, L.-Y., Liu, H.-P., Zhang, W.-L., Han, Z.-Z., Deng, M.-X., Zeng, R.-C., Li, S.-Q., & Wang, Z.-L. (2017). Corrosion resistance of a superhydrophobic micro-arc oxidation coating on Mg-4Li-1Ca alloy. *Journal of Materials Science & Technology*, 33(11), 1263–1271. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.10.010>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Holzer, L., Indutnyi, F., Gasser, P. H., Münch, B., & Wegmann, M. (2004). Three-dimensional analysis of porous BaTiO₃ ceramics using FIB nanotomography. *Journal of Microscopy*, 216(1), 84–95. <https://doi.org/10.1111/j.0022-2720.2004.01397.x>
- Kilicoglu, O., & Mehmetcik, H. (2021). Science mapping for radiation shielding research. *RADIATION PHYSICS AND CHEMISTRY*, 189, 109721. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109721>
- Lu, Y., Dong, J., & Ke, W. (2015). Corrosion Evolution of Low Alloy Steel in Deaerated Bicarbonate Solutions. *Journal of Materials Science & Technology*, 31(10), 1047–1058. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.10.013>
- Özdoğan, A., & Tosun, B. (2022). Effects of Different Polishing Procedures on the Surface Roughness and Hardness of Polyether Ether Ketone (PEEK). *Odontos-International Journal of Dental Sciences*, 23(3), 66–74. <https://doi.org/10.15517/ijds.2021.45014>
- Portal.periodicos.CAPES. (2024). *CAPES/MEC: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior*.
- Shikoh, A. S., & Polyakov, A. (2020). A Quantitative Analysis of the Research Trends in Perovskite Solar Cells in 2009–2019. *PHYSICA STATUS SOLIDI A-APPLICATIONS AND MATERIALS SCIENCE*, 217(23), 2000441. <https://doi.org/10.1002/pssa.202000441>
- Tauchen, G., Teran Briceño, J. C., & Simões Borges, D. (2023). Internacionalização da educação superior: redes sociais e preocupações emergentes. *Educação*, 46, e44654. <https://doi.org/10.15448/1981-2582.2023.1.44654>
- Terán, J., Tauchen, G., & Lobo, H. (2021). Enseñanza de la estructura espacio tiempo: un análisis bibliométrico (1988–2020) y futuras direcciones de investigación. *Rev. enseñ. fís.*, 33(1), 31–40. <https://doi.org/10.55767/2451.6007.v33.n1.33274>
- Vanz, S. A., & Stumpf, I. R. (August de 2010). Colaboração científica: revisão teórico-conceitual. *Perspectivas em Ciência da Informação*, 15, 42–55. doi:10.1590/s1413-99362010000200004
- Zhang, F., Zhang, C., Song, L., Zeng, R., Li, S., & Cui, H. (2015). Fabrication of the Superhydrophobic Surface on Magnesium Alloy and Its Corrosion Resistance. *Journal of Materials Science & Technology*, 31(11), 1139–1143. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2015.09.003>