

Del laboratorio al mercado: análisis bibliométrico longitudinal de la innovación en grafeno a nivel global (2012–2025)

From the Lab to the Market: A Longitudinal Bibliometric Analysis of Global Innovation in Graphene (2012–2025)

Steven Gherard Santamaría-Oblitas

Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque – Perú. Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica.

Email: ssantamariaob@unprg.edu.pe

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9190-562X>

Recibido: 26/02/2026

Aprobado: 11/09/2026

Publicado: 12/09/2026



Cómo citar este trabajo:

Santamaría-Oblitas, S. G. (2026). Del laboratorio al mercado: análisis bibliométrico longitudinal de la innovación en grafeno a nivel global (2012–2025). Revista Reflexiones de la Sociedad y Economía, 3(2), 41-59. <https://doi.org/10.62776/rse.v3i2.75>

© El autor. Este artículo es publicado por la Revista Reflexiones de la sociedad y economía de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque, Perú, como acceso abierto bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Esta licencia permite compartir (copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato) y adaptar (remezclar, transformar y construir a partir del material) el contenido para cualquier propósito, incluido el uso comercial.

RESUMEN

Introducción: El grafeno se ha consolidado como uno de los materiales estratégicos más investigados del siglo XXI debido a sus propiedades excepcionales y su potencial de aplicación en energía, electrónica y almacenamiento electroquímico. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar la dinámica global de la innovación en grafeno desde una perspectiva bibliométrica longitudinal durante el período 2012–2025, examinando productividad científica, impacto, colaboración, desarrollo semántico y orientación hacia el mercado. **Metodología:** Se adoptó un enfoque cuantitativo con diseño exploratorio–descriptivo y alcance longitudinal, utilizando metadatos indexados en Scopus y procesados mediante Bibliometrix (R) y herramientas de visualización complementarias. **Resultados:** Se evidenciaron una evolución desde un enfoque técnico-experimental hacia una integración progresiva de dimensiones económicas, regulatorias y de escalabilidad industrial. Se identificó una estructura concentrada de autores y revistas, coherente con las leyes de Lotka y Bradford, así como un liderazgo geográfico marcado por Asia, acompañado de redes de colaboración internacional consolidadas. El análisis semántico mostró un desplazamiento desde la síntesis de materiales hacia la comercialización, eficiencia energética y sostenibilidad, identificándose como temas motores las aplicaciones energéticas y la escalabilidad productiva. **Conclusiones:** El estudio aporta una visión sistémica de la transición del laboratorio al mercado, demostrando la utilidad

del análisis bibliométrico para comprender procesos de maduración tecnológica. Como limitación, se reconoce el uso de una sola base de datos y el análisis exclusivo de metadatos. Se sugiere complementar futuras investigaciones con análisis patentométricos y financieros.

Palabras clave: grafeno; innovación tecnológica; análisis bibliométrico; transferencia al mercado.

ABSTRACT

Introduction: Graphene has established itself as one of the most researched strategic materials of the 21st century due to its exceptional properties and potential applications in energy, electronics, and electrochemical storage. In this context, the present study aimed to analyze the global dynamics of innovation in graphene from a longitudinal bibliometric perspective during the period 2012–2025, examining scientific productivity, impact, collaboration, semantic development, and market orientation. **Methodology:** A quantitative approach with an exploratory-descriptive design and longitudinal scope was adopted, using metadata indexed in Scopus and processed using Bibliometrix (R) and complementary visualization tools. **Results:** An evolution from a technical-experimental approach towards a progressive integration of economic, regulatory, and industrial scalability dimensions was evident. A concentrated structure of authors and journals was identified, consistent with Lotka and Bradford's laws, as well as geographical leadership marked by Asia, accompanied by consolidated international collaboration networks. Semantic analysis showed a shift from material synthesis to commercialization, energy efficiency, and sustainability, with energy applications and production scalability identified as driving themes. **Conclusions:** The study provides a systemic view of the transition from the laboratory to the market, demonstrating the usefulness of bibliometric analysis for understanding technological maturation processes. As a limitation, the use of a single database and the exclusive analysis of metadata are acknowledged. It is suggested that future research be complemented with patentometric and financial analyses.

Keywords: graphene; technological innovation; bibliometric analysis; market transfer.

INTRODUCCIÓN

El grafeno ha emergido como material estratégico para la innovación tecnológica global debido a sus propiedades excepcionales en conductividad, resistencia y versatilidad funcional (Choudhary, 2026; Mamun et al., 2026). Sin embargo, la transición desde los descubrimientos de laboratorio hacia aplicaciones comerciales viables enfrenta desafíos complejos que trascienden lo técnico, involucrando dimensiones económicas, regulatorias y de escalabilidad industrial (Souza et al., 2024; Suarez-Merino et al., 2025). En este contexto, la producción científica refleja una creciente preocupación por integrar dimensiones multidisciplinarias que faciliten la transferencia tecnológica (Achawi et al., 2021; Radnik & Hodoroaba, 2025). Por consiguiente, el análisis bibliométrico se constituye como herramienta pertinente para mapear trayectorias de conocimiento aplicado. De este modo, se evidencia una brecha entre el volumen de investigación básica y su consolidación en mercados reales.

A nivel global, la inversión en investigación y desarrollo de tecnologías basadas en grafeno ha sido impulsada por iniciativas gubernamentales y consorcios internacionales que buscan posicionar a sus economías en la vanguardia de la nanotecnología (Nguyen et al., 2020). No obstante, la heterogeneidad en las estrategias de innovación, los marcos regulatorios y las

capacidades industriales entre regiones genera disparidades en la velocidad y efectividad de la transferencia tecnológica (Mbayachi et al., 2021; H. Wu et al., 2021). En consecuencia, comprender los patrones espaciotemporales de la producción científica permite identificar no solo centros de excelencia investigativa, sino también nodos críticos para la articulación entre ciencia, tecnología y mercado (Novoselov et al., 2012). Además, la evaluación de las limitaciones reportadas en los estudios empíricos ofrece insumos valiosos para orientar políticas de fomento a la innovación.

Pese al volumen creciente de publicaciones sobre grafeno, persiste una fragmentación en la comprensión de cómo se configuran, en el tiempo, las trayectorias que conectan la investigación básica con la innovación comercial, lo cual dificulta la identificación de factores habilitantes y barreras sistémicas. En este sentido, surge la necesidad de examinar de manera integral la evolución del abordaje científico, considerando tanto las dimensiones técnicas como las económicas y regulatorias que condicionan la maduración tecnológica. Por lo expuesto, este estudio se plantea la siguiente pregunta de investigación: ***¿Cómo se ha configurado la dinámica global de la innovación en grafeno, en términos de productividad científica, impacto, colaboración y orientación al mercado, durante el período 2012–2025?*** La respuesta a este interrogante permitiría aportar evidencia para la toma de decisiones estratégicas en ciencia, tecnología e innovación.

La literatura existente ha documentado avances significativos en métodos de síntesis más eficientes y sostenibles, como el Flash Joule Heating, que reduce costos y emisiones en comparación con técnicas tradicionales, facilitando potencialmente su escalado industrial (Choudhary, 2026; Mamun et al., 2026). Asimismo, revisiones sistemáticas han señalado que la calidad del material y la reproducibilidad de los procesos son determinantes para la adopción comercial, más allá del mero volumen de producción (Radnik & Hodoroaba, 2025; Souza et al., 2024). Por otro lado, estudios de caso sobre empresas emergentes en grafeno revelan que el acceso a financiamiento y la ubicación geográfica influyen más en la introducción de productos que la producción académica (Nguyen et al., 2020). Sin embargo, persisten brechas regulatorias y desafíos en la evaluación de riesgos que limitan la confianza de los actores del mercado (Achawi et al., 2021; Suarez-Merino et al., 2025). Estos hallazgos subrayan la multidimensionalidad de los factores que condicionan la comercialización.

En cuanto a las implicancias económicas, la literatura destaca que la viabilidad de los productos basados en grafeno depende de la optimización de cadenas de valor, la estandarización de protocolos y la articulación público-privada para reducir incertidumbres en la inversión (Choudhary, 2026; H. Wu et al., 2021). Además, se ha señalado que la falta de datos de referencia y materiales estandarizados obstaculiza la comparación de resultados entre laboratorios y la validación industrial, lo cual retrasa la maduración tecnológica (Mamun et al., 2026; Radnik & Hodoroaba, 2025). Por consiguiente, los autores recomiendan priorizar investigaciones que integren perspectivas técnicas, económicas y regulatorias para acelerar la transferencia tecnológica (Bettels et al., 2025). No obstante, muchas de estas sugerencias carecen de un mapeo sistemático que permita priorizar acciones con base en evidencia

bibliométrica. De ahí la relevancia de estudios que sintetizen cuantitativamente las tendencias del conocimiento aplicado.

Este estudio se justifica en la necesidad de proporcionar una visión integrada y actualizada de las trayectorias científicas que vinculan la investigación en grafeno con su potencial comercial, aportando insumos para investigadores, gestores de innovación y formuladores de políticas. Al identificar patrones temporales y temáticos en la literatura, se podrán detectar áreas de oportunidad, brechas de conocimiento y factores críticos para la escalabilidad industrial. Además, el análisis de las limitaciones y sugerencias reportadas por los autores en sus resúmenes permitirá orientar futuras investigaciones hacia problemas con mayor impacto traslacional. Por lo tanto, este trabajo contribuye a cerrar la brecha entre la producción académica y la toma de decisiones estratégicas en innovación tecnológica (Santamaría-Oblitas, 2025).

METODOLOGÍA

El estudio adoptó un enfoque positivista–cuantitativo con diseño exploratorio–descriptivo y alcance longitudinal, orientado a analizar la evolución científica y económica de la innovación en grafeno a nivel global durante el período 2012–2025. La unidad de análisis estuvo conformada por los metadatos bibliográficos (título, resumen, autores, afiliaciones, país, palabras clave, citas, referencias y fuente) indexados en Scopus, seleccionada por su cobertura multidisciplinaria y rigor en la indexación. El diseño permitió examinar patrones de productividad, impacto, colaboración y estructura intelectual asociados a la transición del grafeno desde la investigación básica hacia su comercialización.

La búsqueda se realizó el 22 de febrero de 2026 en Scopus mediante la siguiente ecuación canónica: TITLE-ABS-KEY (graphene OR "graphene oxide" OR "reduced graphene oxide" OR "graphene nanoplatelets") AND TITLE-ABS-KEY (innovation OR commercialization OR "technology transfer" OR "industrial scale" OR "pilot production" OR "market entry" OR patent* OR startup* OR spin-off*) AND TITLE-ABS-KEY (economic* OR market* OR "technology diffusion" OR investment OR "industrial development" OR "global market" OR "value chain") AND PUBYEAR > 2011 AND PUBYEAR < 2026.

Se incluyeron documentos publicados entre 2012 y 2025 relacionados explícitamente con innovación, mercado o transferencia tecnológica del grafeno, excluyéndose registros duplicados, incompletos o no pertinentes tras revisión de títulos y resúmenes.

El análisis se realizó con el paquete Bibliometrix (R), calculando indicadores de productividad (número de publicaciones, autores, instituciones y países), impacto (citas totales, promedio de citas, índice h e índice m) y colaboración (redes de coautoría y cooperación internacional). Se desarrollaron análisis estructurales de co-citación, acoplamiento bibliográfico y co-ocurrencia de palabras clave para identificar clústeres temáticos y su evolución. Asimismo, se evaluó la productividad autoral mediante la Ley de Lotka y la concentración de revistas

mediante la Ley de Bradford, y se generaron mapas temáticos estratégicos y gráficos (Cobo et al., 2011).

La visualización de redes se realizó con Datawrapper, herramienta digital orientada a la representación gráfica interactiva de datos cuantitativos, que facilita la interpretación estructural de relaciones complejas en estudios bibliométricos (Chen, 2017). Se documentaron la cadena de búsqueda, los criterios de limpieza y los scripts utilizados, y el corpus fue preparado para su depósito en un repositorio abierto bajo principios de Ciencia Abierta, garantizando replicabilidad y transparencia.

RESULTADOS

En la **figura 1**, el análisis descriptivo evidencia un crecimiento sostenido y dinámico del campo se presenta en la figura 1, con una tasa de crecimiento anual del 28,23 %, lo que indica una expansión acelerada del interés científico en la transición del grafeno del laboratorio al mercado durante el período 2012–2025. La producción total de 373 documentos distribuidos en 279 fuentes refleja una dispersión moderada del conocimiento, mientras que la participación de 1 642 autores y un promedio de 4,63 coautores por documento sugieren una estructura colaborativa consolidada. También, la coautoría internacional del 26,81 % pone de manifiesto un nivel relevante de cooperación transnacional, aunque aún con margen de fortalecimiento en términos de integración global. En términos de impacto, el promedio de 32,3 citas por documento y una edad media de 4,9 años indican una base científica relativamente reciente, pero con influencia significativa. Asimismo, la presencia de 1 212 palabras clave de autor y 3 106 referencias evidencia diversidad temática y densidad conceptual, lo que confirma la consolidación progresiva de un campo interdisciplinario orientado a la innovación y desarrollo económico del grafeno.

Figura 1

Indicadores generales de desempeño bibliométrico sobre innovación y comercialización del grafeno a nivel global



Nota: Información del corpus de metadatos de la literatura procesado con Bibliometrix

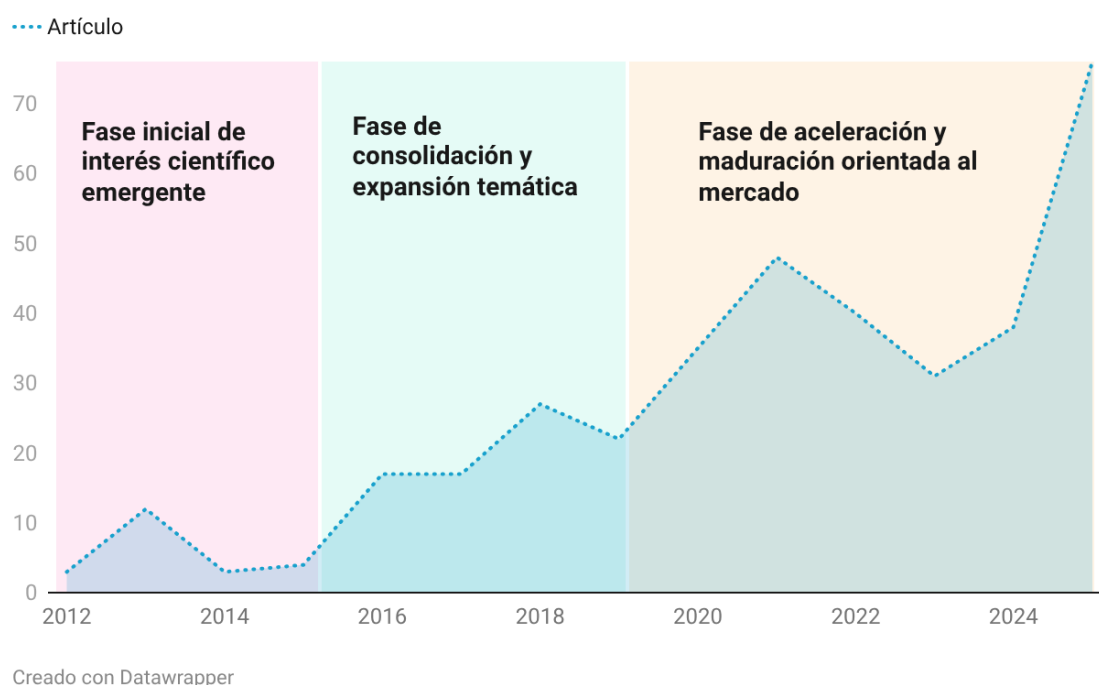
El análisis longitudinal presentado en la Figura 2 evidencia que la producción científica siguió una trayectoria marcadamente ascendente, aunque con fluctuaciones intermedias, lo que

permitió identificar tres etapas claramente diferenciadas en la evolución del campo. Una fase inicial de interés científico emergente **(2012–2015)** se caracteriza por una producción incipiente y exploratoria, con valores entre 3 y 12 publicaciones anuales, lo que refleja un abordaje preliminar centrado principalmente en fundamentos técnicos y primeras aproximaciones a la innovación. Posteriormente, se observa una fase de consolidación y expansión temática **(2016–2019)**, donde la producción aumenta progresivamente hasta 27 publicaciones en 2018, indicando una mayor estructuración del debate en torno a aplicaciones industriales y transferencia tecnológica.

A partir de 2020 se identifica una fase de aceleración y maduración orientada al mercado **(2020–2025)**, marcada por un crecimiento significativo que alcanza su máximo en 2025 con 76 publicaciones, lo que sugiere una intensificación del interés en dimensiones económicas, escalabilidad y comercialización global del grafeno. En conjunto, la tendencia confirma un proceso de maduración científica progresiva con transición desde un enfoque predominantemente exploratorio hacia uno estratégicamente vinculado a la innovación y desarrollo industrial.

Figura 2

Evolución anual de las publicaciones



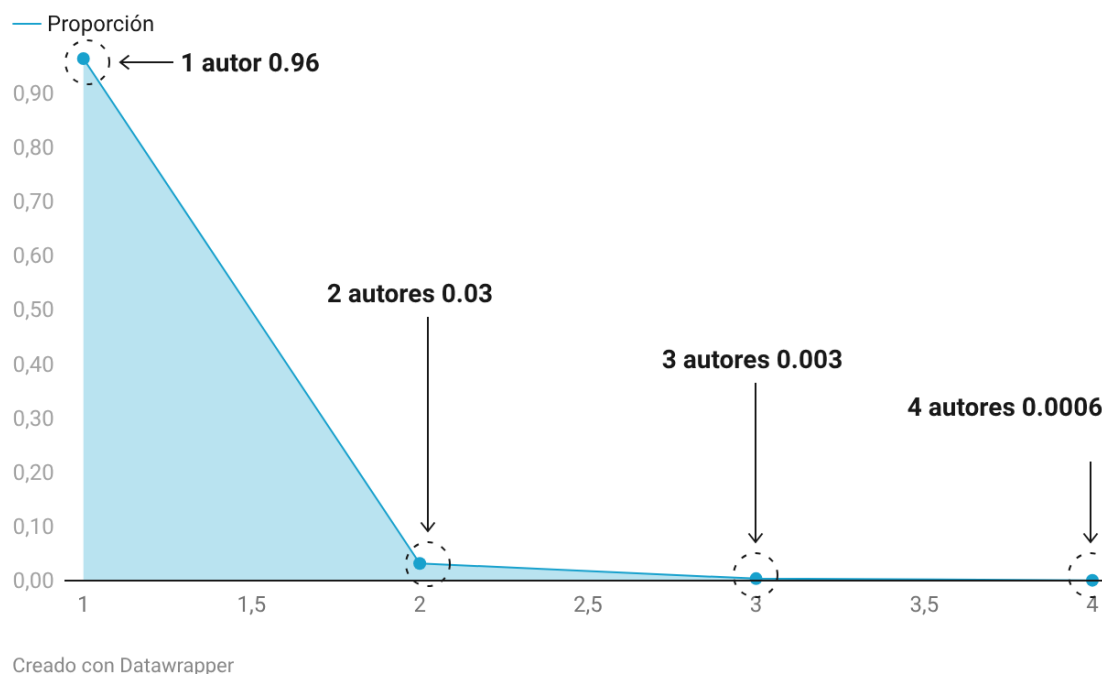
Nota: Información del corpus de metadatos de la literatura procesado con Bibliometrix y datarawpper

El análisis de la productividad autoral muestra un patrón altamente concentrado, caracterizado por una proporción mayoritaria de autores con una sola publicación y una disminución exponencial conforme aumenta el número de documentos producidos, lo que es consistente con el comportamiento teórico descrito por la Ley de Lotka (Aria & Cuccurullo, 2017). En la **figura 3** se observa que cerca de la totalidad de los autores contribuyen con un único documento, mientras que un porcentaje significativamente menor produce dos o más trabajos, evidenciando una pendiente pronunciada decreciente. Aunque la distribución empírica (línea discontinua) no coincide de manera perfecta con la curva teórica (línea continua), mantiene la tendencia inversa característica propuesta por Lotka, lo que sugiere un cumplimiento parcial de la ley (Service, 2005). Esta ligera divergencia puede atribuirse a la naturaleza interdisciplinaria y emergente del campo, donde existe una amplia participación ocasional de investigadores provenientes de distintas áreas.

En consecuencia, puede afirmarse que el campo presenta una estructura típica de especialización científica en consolidación, con un núcleo reducido de autores altamente productivos y una periferia amplia de contribuyentes esporádicos, lo cual confirma una dinámica bibliométrica acorde con patrones clásicos de productividad científica.

Figura 3

Distribución de la productividad de autores según la Ley de Lotka



Nota: Información del corpus de metadatos de la literatura procesado con Bibliometrix y datarawpper

El análisis de las revistas fuente, presentado en la **Tabla 1**, evidencia una concentración estratégica de la producción científica en journals de alto impacto y perfil interdisciplinario. Destaca Science of the Total Environment como la revista con mayor índice h (6) y volumen de citas acumuladas (497), lo que indica una sólida articulación entre la innovación en grafeno y la sostenibilidad ambiental. Este patrón confirma que el desarrollo tecnológico del grafeno no se limita a enfoques estrictamente materiales, sino que se integra progresivamente en agendas vinculadas a transición energética, impacto ambiental y desarrollo sostenible, consolidando su posicionamiento en revistas de alto cuartil y amplia influencia científica. Asimismo, revistas especializadas como 2D Materials, ACS Applied Energy Materials y Chemical Engineering Journal reflejan la orientación tecnológica e industrial del campo, mientras que ACS Nano presenta el mayor número de citas totales (835), consolidándose como un referente de alta influencia científica.

La presencia de revistas vinculadas a energía, ingeniería química, materiales avanzados e hidrógeno evidencia una diversificación temática alineada con aplicaciones industriales y transición energética. El análisis del año de inicio de publicaciones muestra que la mayoría de estas fuentes comienzan a concentrar producción a partir de 2016, lo que coincide con la fase de consolidación del campo identificada previamente.

Tabla 1

Revistas núcleo, impacto y concentración de publicaciones

Revista	Índice h	Índice m	Citas totales	Publicaciones	Año inicio publicaciones
SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	6	6	497	6	2022
2D MATERIALS	4	6	103	6	2021
ACS APPLIED ENERGY MATERIALS	3	3	130	3	2018
ACS NANO	3	3	835	3	2016
BIOSENSORS AND BIOELECTRONICS	3	3	202	3	2017
CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL	3	5	139	5	2017
HELIYON	3	3	96	3	2022
INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH	3	3	184	3	2016
INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY	3	3	241	3	2016
JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS	3	3	37	3	2021

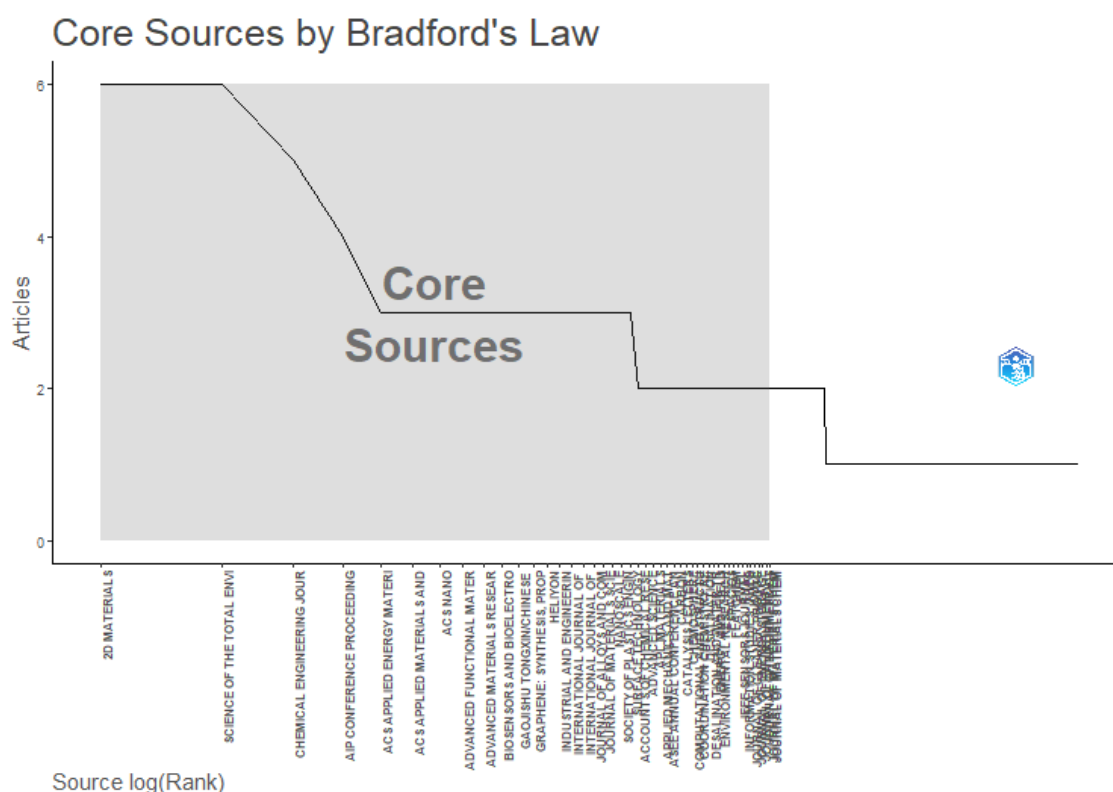
Nota: Información del corpus de metadatos de la literatura procesado con Bibliometrix

El análisis de dispersión de fuentes evidencia un patrón consistente con la Ley de Bradford, al observarse un núcleo reducido de revistas que concentra la mayor proporción de artículos, seguido por zonas sucesivas con un número creciente de fuentes y menor productividad

individual (Cobo et al., 2011). En la **figura 4** se identifica claramente una primera zona o “core” compuesta por revistas especializadas que publican entre tres y seis artículos, mientras que las zonas posteriores muestran un incremento exponencial en el número de revistas con uno o dos documentos. Esta distribución escalonada refleja la relación clásica propuesta por Bradford, donde la productividad decrece a medida que aumenta el número de fuentes, configurando una estructura de concentración temática en journals estratégicos (Donthu et al., 2021). Aunque la proporcionalidad exacta entre zonas puede no ajustarse matemáticamente de forma perfecta, el comportamiento logarítmico observado confirma un cumplimiento empírico de la ley (Purica, 1989). En consecuencia, el campo presenta un núcleo consolidado de revistas altamente especializadas que actúan como principales vehículos de difusión científica, lo que indica madurez temática y estructuración progresiva del dominio investigativo en torno a la innovación y comercialización del grafeno.

Figura 4

Concentración de revistas núcleo según la Ley de Bradford



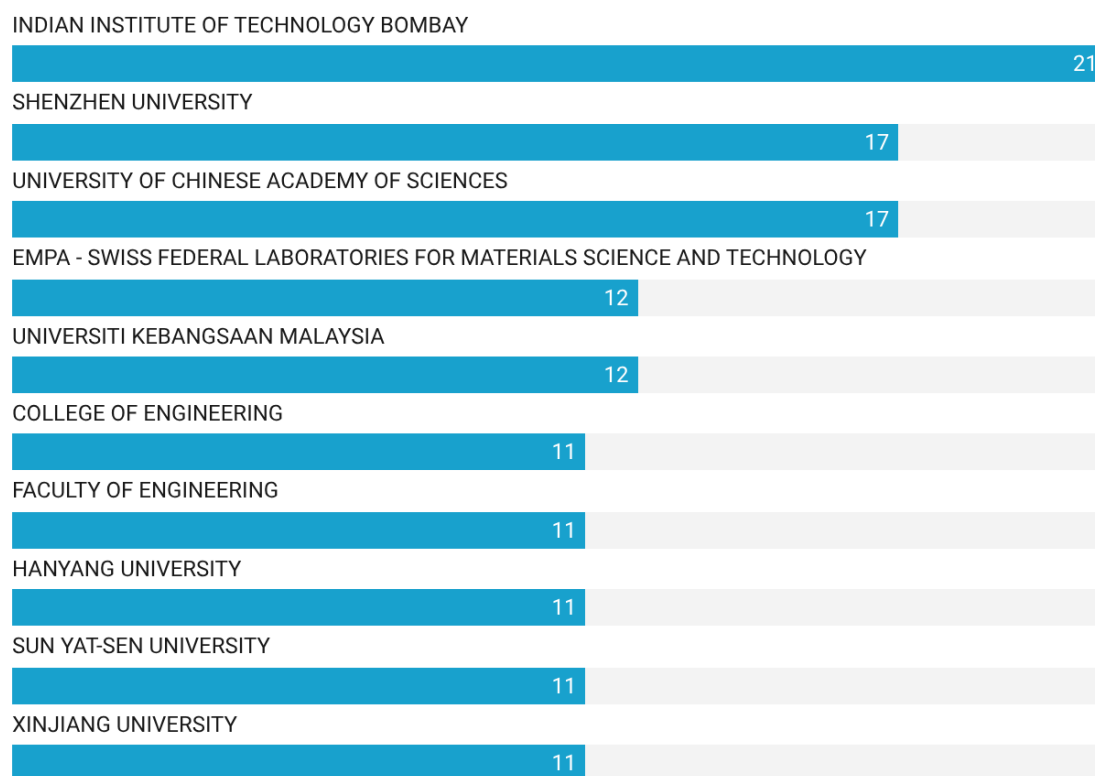
Nota: Información del corpus de metadatos de la literatura procesado con Bibliometrix

En la **figura 5**, se presenta el análisis de las afiliaciones más productivas revela una concentración significativa de la producción científica en instituciones asiáticas, particularmente en India y China, lo que sugiere un liderazgo regional en la investigación

orientada a la innovación y escalabilidad del grafeno. El Indian Institute of Technology Bombay encabeza el ranking con 21 publicaciones, seguido por Shenzhen University y la University of Chinese Academy of Sciences con 17 cada una, lo que evidencia el papel estratégico de China como uno de los principales polos de producción científica. Asimismo, la presencia de múltiples universidades chinas (Sun Yat-sen University y Xinjiang University) refuerza la posición de este país como actor dominante en el desarrollo tecnológico del grafeno. En contraste, la participación europea se observa principalmente a través de EMPA (Suiza), lo que indica una contribución relevante pero menos concentrada. En conjunto, los resultados sugieren que Asia, especialmente China e India, lidera la producción académica en este campo, lo que puede estar asociado a políticas nacionales de inversión en materiales avanzados, transición energética e industrialización tecnológica orientada al mercado global.

Figura 5

Afiliaciones institucionales más productivas en investigación sobre innovación y comercialización del grafeno



Creado con Datawrapper

Nota: Información del corpus de metadatos de la literatura procesado con Bibliometrix y datarawpper

Como se observa en la **Figura 6**, el análisis de frecuencia de términos evidencia que el núcleo temático del campo se estructura en torno a graphene (179) y graphite (51), lo que confirma la centralidad del material base y sus derivados en la producción científica. Asimismo, la presencia destacada de términos como cost effectiveness (32), sustainable development (31), economic and social effects (20) y economic analysis (12) revela una creciente integración de dimensiones económicas y de sostenibilidad en la agenda investigativa, coherente con la transición del laboratorio al mercado. En el ámbito tecnológico, conceptos como nanotechnology, nanocomposites, electrodes, lithium-ion batteries, fuel cells y oxygen reduction reaction reflejan una orientación marcada hacia aplicaciones energéticas y almacenamiento electroquímico, sectores estratégicos para la comercialización del grafeno. Adicionalmente, la aparición de términos como patents and inventions, commerce y commercialisation confirma la consolidación de un enfoque orientado a transferencia tecnológica e industrialización. En conjunto, la coocurrencia de términos técnicos, ambientales y económicos muestra una evolución temática hacia un modelo interdisciplinario que articula desempeño material, viabilidad económica y sostenibilidad como ejes centrales del desarrollo científico en grafeno.

Figura 6

Términos de mayor frecuencia e impacto temático en la investigación sobre innovación y comercialización del grafeno



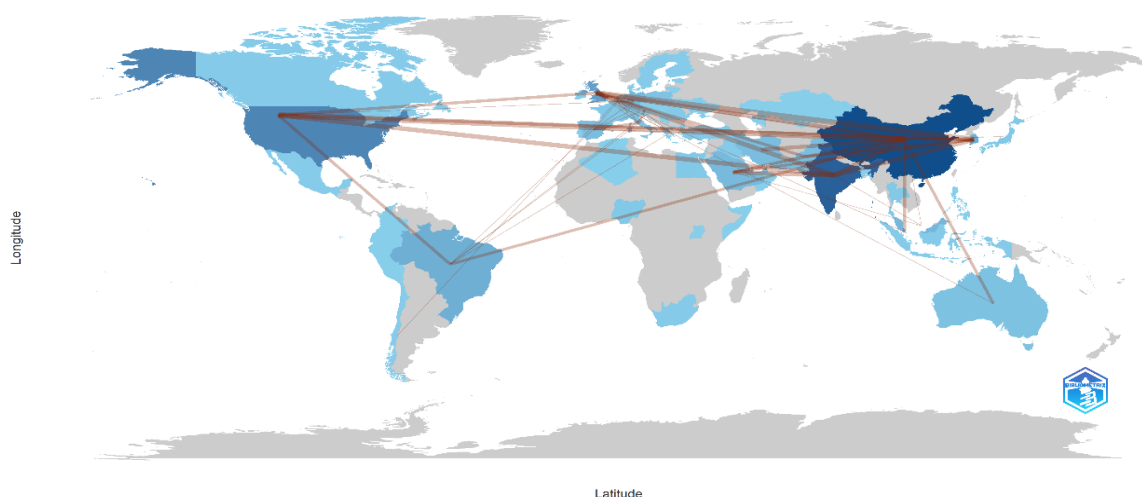
En la **Figura 7** se presenta el mapa global muestra de colaboración internacional entre países basada en coautorías de publicaciones científicas. La intensidad del color azul representa el volumen de producción científica, mientras que las líneas indican vínculos de colaboración entre naciones, cuyo grosor refleja la fuerza de la relación. Se observa una marcada centralidad de China y Estados Unidos como nodos principales del sistema global, evidenciando su liderazgo tanto en productividad como en capacidad de articulación internacional. Europa aparece como un bloque altamente interconectado, con múltiples enlaces intra y extra regionales, lo que sugiere estructuras colaborativas consolidadas.

Asimismo, se identifican conexiones estratégicas entre Asia, América del Norte y Oceanía, lo que confirma la naturaleza globalizada del ecosistema de innovación en grafeno. Desde una perspectiva bibliométrica, este patrón responde a la teoría de redes científicas, donde los países con mayor inversión en I+D y capacidades tecnológicas actúan como hubs centrales que concentran y redistribuyen conocimiento. En consecuencia, el mapa evidencia que la transición del grafeno del laboratorio al mercado está fuertemente influenciada por dinámicas de cooperación internacional, donde la densidad de enlaces refleja integración en cadenas globales de valor científico-tecnológico (Stephan et al., 2025).

Figura 7

Mapa global de colaboración científica por países en investigación sobre innovación y comercialización del grafeno

Country Collaboration Map



Nota: Información del corpus de metadatos de la literatura procesado con Bibliometrix

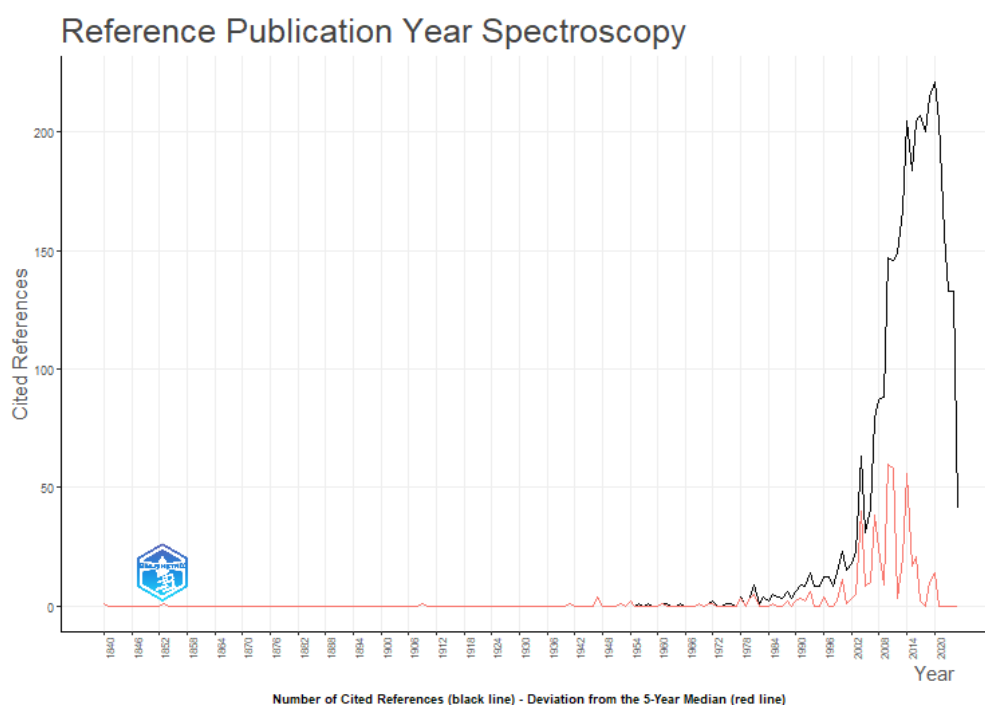
La **Figura 8** presenta el análisis de *Reference Publication Year Spectroscopy* (RPYS), el cual permite identificar los años con mayor concentración de referencias citadas dentro del corpus analizado. La línea negra muestra el número absoluto de referencias citadas por año, mientras que la línea roja representa la desviación respecto a la mediana móvil de cinco años,

destacando picos de influencia intelectual. Se observa una concentración marcada de referencias entre 2004 y 2015, con máximos alrededor de 2010–2014, lo que evidencia la consolidación del grafeno tras su aislamiento experimental y el posterior reconocimiento científico internacional.

Este patrón confirma que la base teórica y experimental que sustenta la actual transición hacia aplicaciones industriales se construyó principalmente en esa década de aceleración científica. Asimismo, la disminución progresiva posterior sugiere una estabilización del conocimiento fundacional y una orientación creciente hacia desarrollos aplicados y de mercado. Desde un fundamento bibliométrico, el RPYS permite identificar hitos epistemológicos que estructuran la evolución del campo, evidenciando cómo la etapa de descubrimiento y validación científica precede y condiciona la fase de transferencia tecnológica e innovación económica analizada en el estudio.

Figura 8

Espectroscopia del Año de Publicación de Referencias (RPYS)



Nota: Información del corpus de metadatos de la literatura procesado con Bibliometrix

DISCUSIÓN

Los resultados relativos a la evolución de las publicaciones evidenciaron un crecimiento sostenido y una fase de aceleración particularmente marcada a partir de 2018, lo cual confirma que la investigación en grafeno ha entrado en una etapa de consolidación orientada a aplicaciones industriales. Esta tendencia encontró convergencia con los planteamientos de

Nguyen et al., (2020), quienes identificaron, mediante análisis bibliográfico y de patentes, una “edad dorada” del grafeno caracterizada por expansión científica seguida de orientación tecnológica. Del mismo modo, (H. Wu et al., 2021) señalaron que la evolución temática del grafeno evidenció un tránsito progresivo desde investigación básica hacia aplicaciones industriales, lo que coincidió con la fase de maduración orientada al mercado identificada en la Figura 2. En consecuencia, tanto el análisis bibliométrico longitudinal como la literatura reciente confirmaron que la expansión productiva estuvo acompañada por una reconfiguración estratégica hacia transferencia tecnológica.

En relación con los principales autores y el impacto autoral, el patrón observado se ajustó parcialmente a la Ley de Lotka, evidenciando un núcleo reducido de investigadores altamente productivos y una periferia amplia de contribuyentes ocasionales. Este comportamiento fue consistente con lo descrito por (Mbayachi et al., 2021), quienes destacaron la consolidación progresiva del grafeno como campo interdisciplinario, donde múltiples áreas convergieron sin que necesariamente existiera aún una élite hiperconcentrada dominante. Asimismo, la presencia de índices h y m relevantes indicó que el impacto no dependió únicamente del volumen de publicaciones, sino de su articulación con temas estratégicos como escalabilidad, sostenibilidad y aplicaciones electroquímicas (Souza et al., 2024). Por tanto, la estructura autoral reflejó un campo en consolidación más que en saturación.

Respecto a las revistas fuente, la concentración identificada fue consistente con la Ley de Bradford, observándose un núcleo de journals de alto impacto vinculados a energía, materiales avanzados y sostenibilidad. Esta convergencia fue coherente con (Radnik & Hodoroaba, 2025), quienes subrayaron que la caracterización físico-química confiable constituye un eje central para la maduración del campo, lo cual explica la centralidad de revistas especializadas en materiales 2D. De manera complementaria, (Souza et al., 2024) evidenciaron que la aplicación electroquímica del grafeno se encuentra estrechamente vinculada a journals de ingeniería química y materiales, reforzando la interpretación de que el núcleo editorial responde a líneas de aplicación industrial concreta (Bonaccorso et al., 2012).

En cuanto a los principales países, el mapa de colaboración mostró la centralidad de Asia, particularmente China e India, junto con nodos estratégicos en Europa y América del Norte. Esta configuración coincidió con lo señalado por Nguyen et al., (2020), quienes identificaron liderazgo asiático tanto en producción científica como en actividad patentaria. Además, J. Wu et al., (2024) confirmaron que las economías con mayores inversiones en I+D actuaron como hubs tecnológicos que dinamizaron la evolución temática del grafeno. En consecuencia, la estructura de colaboración observada no solo reflejó productividad científica, sino articulación con ecosistemas nacionales de innovación.

En relación con las áreas del conocimiento, el análisis evidenció una convergencia interdisciplinaria entre ingeniería, ciencia de materiales, energía y sostenibilidad ambiental. Este hallazgo encontró respaldo en Achawi et al. (2021), quienes introdujeron la dimensión de seguridad y evaluación de riesgos en materiales basados en grafeno, ampliando el espectro más allá de lo estrictamente técnico. Asimismo, Suarez-Merino et al., (2025) enfatizaron la

relevancia de marcos regulatorios robustos para la comercialización segura en Europa, lo que confirmó que la evolución del campo incorporó progresivamente dimensiones normativas e institucionales.

El desarrollo semántico identificado en la Figura 6 mostró una transición desde términos centrados en síntesis y caracterización hacia conceptos como “cost effectiveness”, “commercialisation” y “sustainable development”. Esta evolución fue coherente con Choudhary (2026) y Mamun et al. (2026), quienes argumentaron que la hoja de ruta para la comercialización del grafeno depende de la integración entre eficiencia productiva, reducción de costos y viabilidad industrial. De esta manera, la transformación semántica reflejó la maduración del discurso científico hacia variables económicas y de mercado.

El mapa temático y el análisis RPYS confirmaron que la base intelectual del campo se consolidó entre 2004 y 2015, periodo de validación científica posterior al aislamiento experimental del grafeno. Sin embargo, la literatura reciente mostró que la fase actual se encuentra dominada por desafíos de estandarización y regulación (Radnik & Hodoroaba, 2025; Suarez-Merino et al., 2025). Esta divergencia temporal evidenció que la madurez científica precedió a la armonización normativa, generando una brecha estructural entre avance tecnológico y adopción comercial.

En conjunto, la evolución del estudio del grafeno desde el laboratorio hacia el mercado no fue lineal, sino condicionada por factores técnicos, económicos e institucionales. Si bien la producción científica creció exponencialmente, la literatura indicó que la transferencia efectiva dependió de estandarización, evaluación de riesgos y articulación público-privada (Choudhary, 2026; H. Wu et al., 2021). Por consiguiente, los resultados bibliométricos no solo cuantificaron crecimiento, sino que explicaron la dinámica sistémica de la innovación en grafeno.

Limitaciones: El estudio presentó limitaciones derivadas del uso exclusivo de la base de datos Scopus, lo cual pudo excluir literatura relevante indexada en otras bases. Asimismo, el análisis se basó en metadatos (títulos, resúmenes y palabras clave), lo que restringió la interpretación profunda del contenido completo de los artículos.

Perspectivas futuras: Se recomendó integrar análisis patentométricos, estudios de startups y métricas de inversión en I+D para complementar la dimensión bibliométrica. Además, se sugirió desarrollar modelos econométricos que correlacionen producción científica con indicadores de industrialización y adopción comercial.

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió identificar que la innovación en grafeno experimentó, entre 2012 y 2025, una transición estructural desde una fase predominantemente técnico-experimental hacia una orientación progresiva a la escalabilidad industrial, comercialización y consolidación económica. El crecimiento sostenido de la producción científica reflejó no solo expansión cuantitativa, sino una redefinición estratégica de prioridades, coherente con procesos de

maduración tecnológica. Asimismo, la estructura autoral evidenció concentración en un núcleo de investigadores altamente productivos, en concordancia con la Ley de Lotka, mientras que la dispersión de fuentes confirmó un núcleo editorial especializado según la Ley de Bradford, lo que indica consolidación disciplinaria.

En términos geográficos, el liderazgo asiático —acompañado por nodos relevantes en Europa y América del Norte— puso de manifiesto la articulación entre políticas nacionales de I+D y posicionamiento tecnológico global. El desarrollo semántico reveló un desplazamiento desde la síntesis y caracterización hacia conceptos vinculados con eficiencia económica, regulación y mercado, consolidando como temas motores las aplicaciones energéticas y la producción a escala industrial. De este modo, el campo mostró coherencia entre evolución científica y orientación hacia el mercado.

Como aporte principal, el estudio demostró la utilidad del análisis bibliométrico longitudinal para comprender la dinámica sistémica de tecnologías emergentes y su transición hacia la industrialización. No obstante, futuras investigaciones deberán integrar análisis patentométricos y financieros que profundicen en la dimensión económica de la innovación en grafeno, fortaleciendo la comprensión integral del proceso “del laboratorio al mercado”.

APORTES DE LOS AUTORES (Según taxonomía CRediT)

Steven Gherard Santamaría-Oblitas: conceptualización, metodología, investigación, redacción, análisis formal, redacción – revisión y edición.

CONFLICTO DE INTERESES

El autor declara que no existen conflictos de interés que hayan podido influir en la realización de esta investigación, en el análisis de los resultados o en la redacción del manuscrito.

RESPONSABILIDAD ÉTICA Y LEGAL

El estudio corresponde a un análisis bibliométrico realizado exclusivamente con registros bibliográficos y metadatos secundarios de acceso público. Debido a que no involucró la participación directa de seres humanos, intervenciones, historias clínicas ni datos personales identificables, no requirió la evaluación o aprobación de un comité de ética ni la obtención de consentimiento informado.

Durante su desarrollo se respetaron los principios de integridad científica, transparencia, correcta atribución de las fuentes y fidelidad en el tratamiento y presentación de la

información. El autor asume plena responsabilidad por la metodología aplicada, la interpretación de los resultados y su difusión científica.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL - LLM (Large Language Model)

El autor declara haber utilizado ChatGPT, desarrollado por OpenAI ([modelo o versión utilizada]), como herramienta auxiliar para apoyar la elaboración y estructuración del análisis bibliométrico, así como el análisis y la interpretación de las figuras y tablas.

Los resultados generados con el apoyo de esta herramienta fueron revisados, contrastados con los datos originales y validados críticamente por el autor. ChatGPT no fue considerado fuente de información ni sustituyó el juicio científico del investigador. El autor asume plena responsabilidad por la exactitud, interpretación y contenido final del manuscrito.

FINANCIAMIENTO

El estudio fue financiado íntegramente por el autor.

CORRESPONDENCIA

Steven Gherard Santamaría-Oblitas. ssantamariaob@unprg.edu.pe

REFERENCIAS

- ADDIN ZOTERO_BIBL {"uncited":[],"omitted":[],"custom":[]} CSL_BIBLIOGRAPHY Achawi, S., Huot, L., Nesslany, F., Pourchez, J., Simar, S., Forest, V., & Feneon, B. (2021). Exploring graphene-based materials' genotoxicity: Inputs of a screening method. *Nanotoxicology*, 15(10), 1279-1294. <https://doi.org/10.1080/17435390.2021.2018734>
- 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>
- Bettels, F., Rashidi, D., Lin, Z., Schenk, L., Li, T., Wu, H., Frank, I., Nadimi, E., Liu, Y., Zhang, C., Ding, F., & Zhang, L. (2025). Single-Atom Chromium-Embedded N-Doped Graphene as a Multifunctional Separator Coating for Lithium–Sulfur Batteries. *Batteries & Supercaps*, 8(12), e202500200. <https://doi.org/10.1002/batt.202500200>
- Bonaccorso, F., Lombardo, A., Hasan, T., Sun, Z., Colombo, L., & Ferrari, A. C. (2012). Production and processing of graphene and 2d crystals. *Materials Today*, 15(12), 564-589. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(13\)70014-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(13)70014-2)

Chen, C. (2017). Science Mapping: A Systematic Review of the Literature. *Journal of Data and Information Science*, 2(2), 1-40. <https://doi.org/10.1515/jdis-2017-0006>

Choudhary, S. K. (2026). From lab to market: A roadmap for graphene innovation and commercialization. En *Graphene: Synthesis, Properties, Technology and Applications* (pp. 317-327). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-26627-0.00014-2>

Cobo, M. j., López-Herrera, A. g., Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2011). Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 62(7), 1382-1402. <https://doi.org/10.1002/asi.21525>

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>

Mamun, M. A., Hashem, A., Wahab, Y. A., Marlinda, A. R., Hossain, M. A. M., & Johan, M. R. (2026). Graphene from lab to fab: Challenges and opportunities. En *Graphene: Synthesis, Properties, Technology and Applications* (pp. 343-369). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-26627-0.00013-0>

Mbayachi, V. B., Ndayiragije, E., Sammani, T., Taj, S., Mbuta, E. R., & Khan, A. U. (2021). Graphene synthesis, characterization and its applications: A review. *Results in Chemistry*, 3, 100163. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2021.100163>

Nguyen, A. L., Liu, W., Khor, K. A., Nanetti, A., & Cheong, S. A. (2020). The golden eras of graphene science and technology: Bibliographic evidences from journal and patent publications. *Journal of Informetrics*, 14(4), 101067. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2020.101067>

Novoselov, K. S., Fal'ko, V. I., Colombo, L., Gellert, P. R., Schwab, M. G., & Kim, K. (2012). A roadmap for graphene. *Nature*, 490(7419), 192-200. <https://doi.org/10.1038/nature11458>

Purica, I. I. (1989). Creativity and the socio-cultural niche. *Scientometrics*, 15(3-4), 181-187. <https://doi.org/10.1007/BF02017197>

Radnik, J., & Hodoroaba, V.-D. (2025). Reliable physico-chemical characterisation of graphene-related and other 2D materials: Present and future. *2D Materials*, 12(4), 043002. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/ad9d>

- Santamaría-Oblitas, S. G. (2025). Evolución científica y tendencias del procesamiento digital de señales en el diagnóstico de fallas eléctricas: Un análisis bibliométrico (2019-2025). *Revista Reflexiones de la Sociedad y Economía*, 2(2), 121-148. <https://doi.org/10.62776/rse.v2i2.55>
- Service, R. W. (2005). CQ: The Communication Quotient for IS professionals. *Journal of Information Science*, 31(2), 99-113. <https://doi.org/10.1177/0165551505050787>
- Souza, D. C., Carvalho, J. H. S., Freitas, R. C., Bellettini, I. C., & Janegitz, B. C. (2024). Production of conductive microfibers based on Polybutylene adipate terephthalate and graphite using a 3D printed electrospinning system and their application as electrochemical dopamine sensor. *Microchemical Journal*, 206, 111520. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111520>
- Stephan, M., Neef, C., & Döscher, H. (2025). Graphene Roadmap Briefs (No. 4): Innovation prospects for Li-ion batteries. *2D Materials*, 12(2), 022009. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/adbe8a>
- Suarez-Merino, B., Adam, V., Gressler, S., Part, F., Bossa, N., Pelin, M., Carlin, M., Candotto, C. F., Caorsi, G., Hong, H., Nowack, B., Beloin-Saint-Pierre, D., Briñas, E., García-Carpintero, S., Durán-Prado, M., Vázquez, E., Prato, M., Wick, P., & Baker, J. H. (2025). Regulatory challenges and risk assessment of graphene-enabled products: Insights for safe commercialisation in Europe. *2D Materials*, 12(4), 043001. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/ade4a5>
- Wu, H., Yi, H., & Li, C. (2021). An integrated approach for detecting and quantifying the topic evolutions of patent technology: A case study on graphene field. *Scientometrics*, 126(8), 6301-6321. <https://doi.org/10.1007/s11192-021-04000-2>
- Wu, J., Tian, L., Gan, F., Li, J., Wu, Y., Zhang, Y., Deng, F., Zou, L., Feng, Q., & Yi, N. (2024). Preparation of environmentally stable graphene circuits for flexible light-emitting diodes using patterned laser direct writing. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 135, 87-93. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.01.045>