

Approaches to Green and Environmental Engineering for Industrial Sustainability: A Systematic Review

León Castro, Rocio¹ ; Medina Huaman, Nelva² ; Poemape Mori, Rocio³;
Quispe Gonzales, Noemi⁴ ; Silvestre Capcha, Verónica⁵

¹Docente. Ingeniería industrial. Universidad Privada del Norte. Perú

²⁻⁵Estudiantes. Ingeniería Industrial. Universidad Privada Del Norte. Perú

Abstract– The industrial sector is responsible for approximately 31% of global CO₂ emissions and 37% of world energy consumption, positioning carbon neutrality as a strategic priority. Green Engineering emerges as an integrated sustainability approach, articulating clean technologies, eco-design, and green manufacturing. This study, through a systematic review based on the PRISMA 2020 method, analyzed literature published between 2021 and 2025 in the Scopus database. From an initial universe of 137 documents, 50 high-impact articles (Q1 and Q2) were selected to ensure scientific rigor. Bibliometric results identify China as the leader in scientific production and reveal five thematic clusters: sustainability, environmental impact, energy efficiency, technological innovation, and sustainable development. Qualitative analysis highlights that the integration of 60R Circular Economy principles with digital tools, including Digital Twins, Building Information Modeling (BIM), and energy microgrids, enables a 25% reduction in operational waste and improves industrial energy autonomy. The findings confirm that Green Engineering is a strategic imperative for strengthening competitiveness and ecological efficiency in the global industry.

Keywords–Green Engineering, Industrial Sustainability, Energy Efficiency, Technological Innovation, Circular Economy.

Enfoques de Ingeniería Verde y Ambiental para la Sostenibilidad Industrial: Una Revisión Sistemática

Resumen— El sector industrial es responsable de aproximadamente el 31% de las emisiones globales de CO₂ y consume cerca del 37% de la energía mundial, posicionando la neutralidad de carbono como una prioridad estratégica. Frente a este desafío, la Ingeniería Verde se consolida como un enfoque integral para la sostenibilidad, articulando tecnologías limpias, ecodiseño y manufactura verde. Este estudio, mediante una revisión sistemática basada en el método PRISMA 2020, analizó literatura publicada entre 2021 y 2025 en la base de datos Scopus. De un universo inicial de 137 documentos, se seleccionaron 50 artículos de alto impacto (Q1 y Q2) para garantizar rigor científico. Los resultados bibliométricos identifican a China como líder en producción científica y revelan cinco clústeres temáticos: sostenibilidad, impacto ambiental, eficiencia energética, innovación tecnológica y desarrollo sostenible. El análisis cualitativo destaca que la integración de los principios 60R de la Economía Circular con herramientas digitales, incluyendo Gemelos Digitales, BIM y microrredes energéticas, permite una reducción del 25% en los desperdicios operativos y mejora la autonomía energética industrial. Los hallazgos confirman que la Ingeniería Verde es un imperativo estratégico para fortalecer la competitividad y la eficiencia ecológica en la industria global.

Palabras clave—Ingeniería Verde, Sostenibilidad industrial, Eficiencia energética, Innovación tecnológica, Economía circular.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental y el cambio climático se han consolidado como desafíos críticos a escala mundial, impulsados por la acumulación de gases de efecto invernadero y la consecuente degradación ecológica que amenaza la estabilidad de los ecosistemas y la salud pública [1] [2]. En este escenario, el sector industrial se identifica como un actor determinante y una de las fuentes primarias de esta problemática, dado que sus actividades intensivas en consumo energético fósil y procesos de manufactura generan una proporción significativa de las emisiones globales. Se estima que el sector industrial es responsable de aproximadamente el 31% de las emisiones globales de CO₂ y consume cerca del 37% de la energía mundial [3] [4]. Por consiguiente, resulta imperativo y urgente impulsar una transición hacia la sostenibilidad industrial mediante estrategias que permitan mitigar el calentamiento global, optimizar la eficiencia en el uso de recursos y alcanzar las metas internacionales de neutralidad de carbono [5].

Ante la magnitud de la problemática global, la Ingeniería Verde y Ambiental se posiciona como el enfoque integral para lograr una producción industrial sostenible, pues está orientada a minimizar las emisiones, optimizar el uso de recursos y reducir riesgos ambientales [6]. En este sentido, la regulación ambiental actúa como un factor promotor clave de la innovación tecnológica verde (ITV), incentivando a las empresas a invertir en investigación y desarrollo para cumplir

con estándares más rigurosos [7]. Consecuentemente, la transición hacia tecnologías limpias y la implementación de prácticas operativas como el ecodiseño y la manufactura verde no solo aseguran el cumplimiento de normativas, sino que también mejoran la competitividad, la eficiencia energética y la sostenibilidad de las cadenas de suministro, convirtiéndose en un imperativo estratégico y operativo para el sector [8] [9].

La Ingeniería Verde se consolida como metodología clave para aplicar soluciones sostenibles, orientadas al diseño y manufactura de procesos que minimicen el impacto ambiental. Este enfoque prioriza la incorporación de tecnologías limpias para optimizar la eficiencia energética y reducir emisiones, incluyendo mejoras en componentes como generadores termoeléctricos (TEGs) que aprovechan el calor residual industrial. Asimismo, fomenta la innovación en materiales eco-amigables y el aprovechamiento de residuos, como concretos reforzados con nano-biochar que mejoran el rendimiento y eliminan contaminantes [10] [11] [12].

A pesar de los avances impulsados por la Ingeniería Verde, persisten barreras técnicas, institucionales y económicas que ralentizan la adopción masiva de estrategias sostenibles en la industria. Entre ellas destacan la incertidumbre sobre el retorno de la inversión (ROI), los altos costos iniciales de las tecnologías limpias y la falta de incentivos o regulaciones efectivas que motiven plenamente la innovación verde [13] [14]. Además, las barreras técnicas se evidencian en la complejidad para evaluar con precisión el impacto ambiental de los productos a lo largo del ciclo de vida, lo que afecta la trazabilidad de las emisiones. Como resultado, muchas organizaciones recurren a implementaciones parciales o soluciones desarticuladas, limitando el alcance de una transición verdaderamente verde [15].

A nivel internacional, investigaciones recientes (2024-2025) desarrolladas en contextos industriales avanzados de Asia y Europa subrayan que la adopción aislada de tecnologías limpias es insuficiente sin una integración digital profunda, destacando el uso de Gemelos Digitales (Digital Twins) y microrredes energéticas como verdaderos catalizadores de la sostenibilidad [16] [17]. A pesar de estos avances, existe una brecha de investigación significativa y verificable: la literatura actual presenta un alto nivel de fragmentación, evaluando el impacto ambiental y la viabilidad económica de manera aislada, sin proponer marcos integrales que articulen la eficiencia energética con la manufactura verde desde enfoques cuantitativos y cualitativos combinados. Para abordar este vacío, el presente estudio contribuye metodológicamente al estructurar un mapeo científico sistemático acoplado a un análisis de co-ocurrencia temática, consolidando un marco de referencia técnico actualizado (2021-2025).

En consecuencia, esta investigación busca responder: ¿Cómo contribuyen de manera sinérgica las estrategias de ingeniería verde y ambiental a la sostenibilidad del sector industrial? El objetivo principal es analizar sistemáticamente estas estrategias, delimitando empíricamente sus aplicaciones prácticas, para establecer directrices técnicas que fortalezcan la competitividad y la eficiencia ecológica global. Para ello, los objetivos específicos son: recopilar y organizar la literatura científica reciente; identificar y clasificar las tecnologías y prácticas de sostenibilidad; evaluar los beneficios y desafíos de estas aplicaciones en la industria; y proponer recomendaciones prácticas para mejorar la eficiencia ecológica en los procesos industriales.

II. METODOLOGÍA

Para desarrollar esta investigación, se optó por una revisión sistemática de la literatura, reconocida por su capacidad para sintetizar evidencia científica de manera rigurosa y organizada [18]. Este enfoque permite responder a una pregunta claramente definida, garantizando transparencia en la selección de estudios y reduciendo sesgos en el análisis. La metodología se alineó con los lineamientos de la declaración PRISMA, considerada el estándar internacional para revisiones sistemáticas, lo que asegura coherencia en las etapas de búsqueda, filtrado y síntesis de información [19].

En la fase inicial, se establecieron criterios de inclusión y exclusión orientados a garantizar la relevancia y calidad metodológica de los documentos seleccionados. Dichos criterios se detallan en la Tabla 1. Se priorizaron artículos científicos publicados en revistas indexadas en Scopus, dado su reconocimiento académico y la rigurosidad de sus procesos de revisión. Además, se aplicaron filtros para incluir únicamente publicaciones en idioma inglés, correspondientes al periodo 2021-2025. Para asegurar el máximo rigor científico, se consideraron exclusivamente artículos de revistas clasificadas en el primer (Q1) y segundo cuartil (Q2). Si bien esta decisión metodológica garantiza la alta calidad de la evidencia, se reconoce críticamente que introduce un posible sesgo disciplinar, concentrando la muestra en revistas especializadas de alto impacto en sectores energéticos o constructivos (tales como *Energies* o *Buildings*), limitando marginalmente la diversidad transversal. Asimismo, la selección se limitó a artículos de acceso abierto (Open Access) para garantizar la disponibilidad del texto completo, un requisito indispensable para la fase cualitativa exhaustiva, asumiendo e incorporando el sesgo de acceso inherente a esta exclusión.

Posteriormente, para maximizar la exhaustividad y sensibilidad de la búsqueda, se diseñó una ecuación estructurada que combinó los operadores booleanos AND y OR, incorporando sinónimos relevantes. La cadena de búsqueda aplicada en Scopus fue: ("Green engineering" OR "environmental engineering" OR "clean technologies") AND ("industrial sustainability" OR "green manufacturing" OR "industrial processes"). Esta estructura paramétrica permitió

abarcar la diversidad terminológica del campo, mitigando las limitaciones de una única frase de búsqueda y asegurando la recuperación de resultados altamente específicos y pertinentes para los objetivos del estudio.

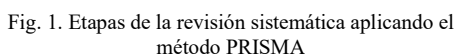
Adicionalmente, se aplicaron filtros de exclusión para descartar documentos que no abordaran directamente la aplicación de estrategias de ingeniería verde en procesos industriales o que carecieran de rigor metodológico. Bajo este criterio, no se consideraron artículos sin revisión por pares ni aquellos que no presentaran evidencia empírica o análisis técnico aplicable. Con esta estrategia, se consolidó el conjunto final de estudios que cumplen con los estándares de calidad y pertinencia requeridos para la revisión sistemática.

Finalmente, para garantizar la reproducibilidad y validación exhaustiva del análisis bibliométrico, se definieron configuraciones e hiperparámetros exactos para las herramientas informáticas. El modelado de redes se ejecutó utilizando VOSviewer (versión 1.6.20) y la interfaz *biblioshiny* del paquete Bibliometrix en R. En VOSviewer, se configuró el método de normalización de Fuerza de Asociación (*Association Strength*) para equilibrar el peso de los nodos, estableciendo un umbral mínimo de co-ocurrencia estricto de 3 apariciones para la conformación de la red de palabras clave. Por su parte, la construcción del Mapa Temático en Bibliometrix se configuró evaluando exclusivamente las palabras clave de los autores, aplicando un clúster de frecuencia mínima de 2 ocurrencias. La clasificación de las áreas temáticas se validó matemáticamente mediante los índices de Centralidad (grado de interacción transversal con otras redes) y Densidad (medida del desarrollo interno del tema), permitiendo una categorización objetiva en temas motores, de nicho, básicos y emergentes.

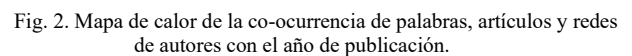
TABLA I
 CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN EN LA BÚSQUEDA.

Criterios de inclusión
Publicaciones entre 2021 - 2025
Estudios disponibles con texto completo
Artículos publicados en inglés
Artículos publicados en revistas con cuartil Q1 o Q2
Estudios que aborden estrategias, tecnologías o prácticas de ingeniería verde y ambiental aplicadas al sector industrial.
Criterios de exclusión
Artículos cuya temática no esté alineada con la aplicación de estrategias de ingeniería verde y ambiental en procesos industriales.
Tesis, capítulos de libro, editoriales y documentos no revisados por pares
Publicaciones sin metodología clara, sin evidencia verificable o que no presenten aplicación práctica en el sector industrial.

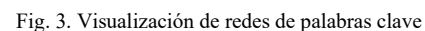
En la etapa de elegibilidad, se evaluaron los textos completos de los estudios potencialmente relevantes, excluyendo aquellos que no se enfocaban en el tema principal de investigación sobre “Green and Environmental Engineering” (ingeniería verde y ambiental), así como los que carecían de evidencia aplicable al sector industrial o presentaban metodologías poco claras. También se descartaron artículos por su etapa de publicación, tipo y título de la fuente, ausencia de palabras clave en título o resumen, limitación por acceso abierto y por no estar en inglés. Como resultado, se obtuvieron 137 artículos para la revisión. Finalmente, tras un análisis exhaustivo, se identificaron 50 estudios considerados indispensables para la investigación. Todo el proceso se ilustra en la Figura 1 mediante el diagrama PRISMA, que resume las fases de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión.



co-ocurrencia de palabras clave, que permite identificar los términos más frecuentes y sus conexiones en el ámbito de la ingeniería verde y ambiental. Este recurso facilita la visualización de tendencias y relaciones conceptuales en la literatura reciente.



Este mapa muestra una red conceptual donde destacan términos como “sustainable development”, “environmental technology” y “green manufacturing”, que se ubican como núcleos centrales del campo de estudio. Los colores reflejan la evolución temporal: tonos azules corresponden a publicaciones más antiguas, mientras que verdes y amarillos indican tendencias emergentes hacia 2024-2025. La proximidad entre nodos evidencia áreas interconectadas, como la relación entre “green buildings”, “energy efficiency” y “industrial sustainability”, lo que confirma el creciente interés en soluciones integrales para reducir el impacto ambiental en procesos productivos.

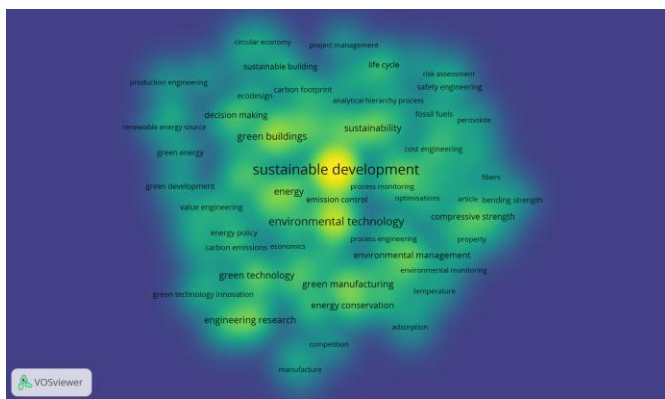


La visualización presentada en (fig. 3) corresponde a una red de palabras clave generada con el software VOSviewer a partir de datos bibliométricos extraídos de Scopus. Este mapa permite identificar agrupaciones temáticas y patrones de conexión entre términos, mostrando cómo se estructuran las líneas de investigación. Las palabras clave más relevantes identificadas incluyen “sustainable development”,

En esta visualización, cada nodo representa una palabra clave, y su tamaño indica la frecuencia con la que aparece en los artículos analizados, por lo que los términos más grandes son los más estudiados. Los enlaces reflejan la co-ocurrencia entre palabras, mostrando qué conceptos se relacionan en la misma investigación; cuanto más grueso es el enlace, mayor es la intensidad de esa relación. Los colores diferencian clústeres temáticos, agrupando áreas como eficiencia energética, construcción sostenible y tecnologías limpias.



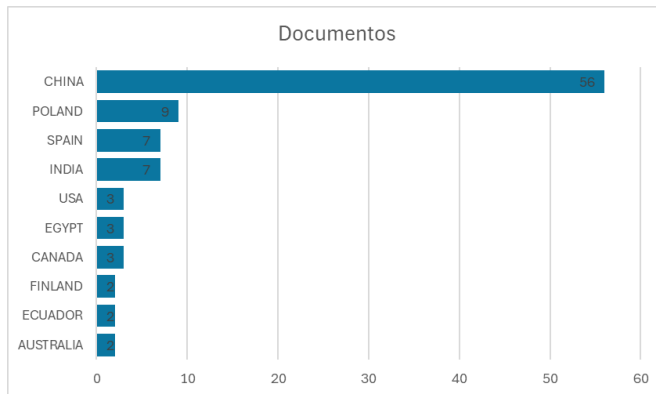
En la nube de palabras (fig.4) elaborada en Bibliometrix a partir de datos obtenidos de Scopus, que refleja los términos más utilizados en la literatura analizada. El concepto más destacado es “sustainable development”, ubicado en el centro y con mayor tamaño, lo que indica su relevancia predominante en el conjunto de publicaciones. Alrededor de este término aparecen otros conceptos clave como environmental technology, green technology, green manufacturing, green buildings, engineering research, energy conservation y environmental management, que reflejan la tendencia hacia la sostenibilidad y la innovación tecnológica. Las palabras más pequeñas representan subtemas específicos que complementan el enfoque principal, ofreciendo una visión clara de las áreas prioritarias y las líneas de investigación actuales en torno al desarrollo sostenible.



El mapa de densidad (fig.5) generado con VOSviewer muestra la intensidad de las palabras clave según su frecuencia en los documentos analizados. Para esta visualización se filtraron 1849 términos, aplicando una ocurrencia mínima de 3, lo que permitió identificar 105 palabras que cumplen con el umbral. Los colores indican la densidad: el amarillo representa los términos más utilizados y los tonos verdes aquellos con menor intensidad. El concepto más destacado es “sustainable development”, ubicado en la zona central, seguido por términos como environmental technology, green technology, green manufacturing, energy conservation y environmental management.

1. Análisis Cuantitativo

En la figura 6, se muestra la distribución y comparación de los 10 países con la mayor cantidad de documentos publicados en el transcurso de los años 2021 a 2025.



Dentro de los 10 países con más documentos, vistos en la tabla anterior, se encuentran China, que lidera con 56 documentos, superando ampliamente al resto de países. En segundo lugar, aparece Polonia con 9 documentos, seguido por España e India, ambos con 7 publicaciones. En niveles más bajos se encuentran Estados Unidos y Egipto, con 3 documentos cada uno, mientras que Canadá, Finlandia, Ecuador y Australia registran solo 2 documentos.

En relación con la (fig.7), se observa un gráfico de líneas que muestra la evolución del número de artículos publicados por año, abarcando el periodo comprendido entre 2021 y 2025 dentro de esta revisión. Cabe resaltar que, para el análisis, se aplicaron criterios de clasificación por cuantiles, agrupando las publicaciones según su nivel de calidad en primer cuartil (Q1) y segundo cuartil (Q2).

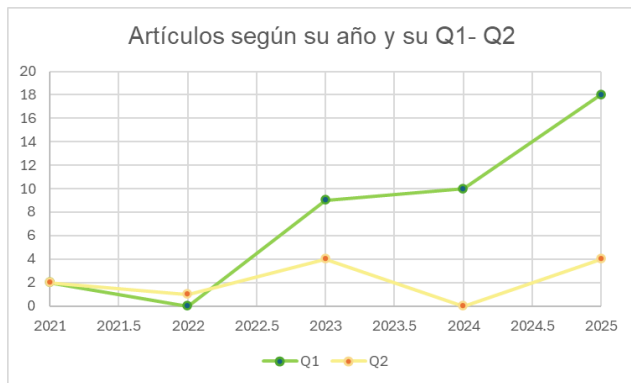


Figura 7. Artículos por año y su Q1 - Q2

Al analizar la evolución de publicaciones entre 2021 y 2025, se observa un comportamiento ascendente en los artículos del primer cuartil (Q1). En 2021 se registraron 2 artículos Q1, en 2022 no hubo publicaciones, pero a partir de 2023 el crecimiento se acelera con 9 artículos, seguido por 10 artículos en 2024 y un salto significativo en 2025 con 18 artículos. Este comportamiento refleja un interés creciente en investigaciones de alta calidad. Por otro lado, los artículos del segundo cuartil (Q2) muestran una participación más baja y estable: en 2021 aparecen 2 artículos, bajando a 1 en 2022, aumentando a 4 en 2023, caen a 0 en 2024 y vuelven a subir a 4 artículos en 2025. La Tasa de Crecimiento Anual para Q1 alcanza su punto máximo entre 2024 y 2025, con un incremento del 80%, lo que refleja un crecimiento acelerado en publicaciones de alto impacto sobre este tema.

1.3. Artículos por Revistas

Según la distribución de artículos según la revista en la que fueron publicados, exponemos los resultados obtenidos en la Tabla 2. Destacando la revista “Energies”, con 9 artículos (, lo que representa el 18% del total, y Buildings, que concentra 7 artículos (14%), posicionándose como las revistas con mayor representación dentro del conjunto analizado.

TABLA II

NÚMERO DE ARTÍCULOS POR REVISTA

REVISTA	Números de artículos	Porcentaje del total (%)
Energies	9	18
Buildings	7	14
Construction And Building Materials	4	8
Journal Of Cleaner Production	4	8
Results In Engineering	3	6
Advanced Materials	2	4
Alexandria Engineering Journal	2	4
Applied Sciences (Switzerland)	2	4
Developments In The Built Environment	2	4

Discover Applied Sciences	2	4
Ieee Transactions On Engineering Management	2	4
International Journal Of Sustainable Engineering	2	4
Materials And Design	2	4
Applied Energy	1	2
Building And Environment	1	2
Engineering Applications Of Artificial Intelligence	1	2
International Journal Of Low-Carbon Technologies	1	2
Journal Of Building Engineering	1	2
Journal Of Marine Science And Engineering	1	2
Sensors	1	2

1.4 Ranking de artículos según el principio de Pareto

El análisis bibliométrico, evaluado mediante el diagrama de Pareto (Figura 8), evidencia una concentración del impacto en un subconjunto limitado de artículos. El análisis del porcentaje acumulado muestra que los primeros 13 documentos, equivalentes aproximadamente al 65% de la muestra graficada, explican cerca del 81.6% de las citas locales acumuladas, superando así el umbral del 80%. En particular, los primeros 7 artículos concentran alrededor del 58% de la relevancia, mientras que los documentos restantes en la cola de la distribución presentan contribuciones individuales marginales. Aunque la distribución no responde estrictamente a la regla clásica 80/20, los resultados justifican la priorización de este núcleo central como base principal del análisis y las conclusiones de la revisión.

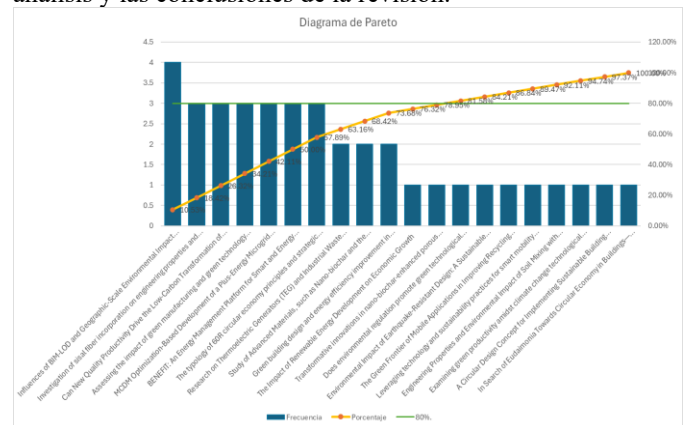


Fig. 8. Ranking de artículos según el principio de Pareto

2. Análisis Cualitativo

2.1. Campos de aplicación de la Ingeniería Verde y Ambiental

El Mapa Temático (Figura 9) clasifica las tendencias de investigación según su Centralidad (grado de relevancia en el campo) y Densidad (grado de desarrollo interno). El análisis permitió identificar clústeres estratégicos mediante el software

Biblioshiny, procesando 658 términos iniciales. Tras aplicar un umbral de frecuencia mínima de 2 ocurrencias, solo 20 palabras clave cumplieron los criterios para conformar la estructura temática definitiva.

La distribución de los temas en los cuatro cuadrantes responde a métricas de red: los temas motores presentan alta centralidad y densidad; los temas de nicho, alta densidad y baja centralidad; los temas básicos, alta centralidad y bajo desarrollo; y los temas emergentes, valores bajos en ambos indicadores. Esta clasificación permite evaluar el grado de madurez y relevancia de cada área identificada (Tabla 3).

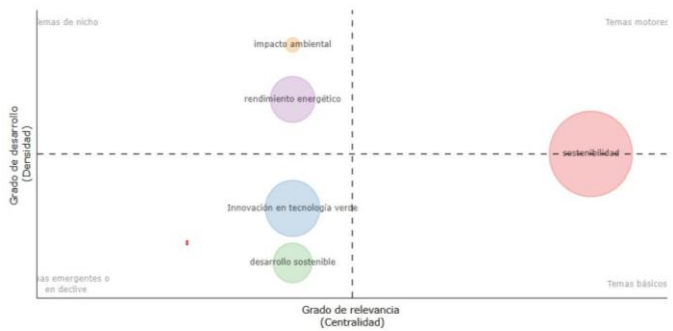


Fig. 9. Mapa temático

Según el presente Mapa Temático, se ha logrado identificar las 5 áreas prioritarias en las que en base al análisis de la recopilación de datos de los documentos se repite con mayor frecuencia, siendo los campos que se presentan en la Tabla 3.

TABLA 3
CAMPOS IDENTIFICADOS EN EL MAPA SEMÁNTICO

Número de Campo	Descripción del campo	Categoría del campo	Definición de la categoría
1	“Sostenibilidad”	Tema Motor	Pilar central para garantizar equilibrio entre desarrollo y recursos.
2	“Impacto ambiental”	Tema Nicho	Factores que determinan la huella ecológica y mitigación de daños.
3	“Eficiencia energética”	Tema Nicho	Optimización del uso de energía para reducir desperdicios y costos.
4	“Innovación en tecnología verde”	Tema Emergente	Aplicación de tecnologías limpias con alto potencial de transformación.
5	“Desarrollo sostenible”	Tema Emergente	Estrategias para crecimiento económico respetando el medio ambiente.

Campo 1: Sostenibilidad

Según la Tabla 3, la “sostenibilidad” se consolida como el tema motor de la Ingeniería Verde en el sector industrial, impulsando una transformación hacia modelos de baja emisión

de carbono que abarcan toda la cadena de valor. Este enfoque responde no solo a la presión regulatoria, que actúa como catalizador para la innovación tecnológica verde mediante patentes y mejoras en el desempeño ecológico, sino también a la necesidad estratégica de resiliencia económica y ambiental. En este marco, la Economía Circular (EC) emerge como pilar fundamental, donde la aplicación de los 60 Principios R constituye una hoja de ruta para optimizar recursos y maximizar beneficios económicos y ecológicos. Paralelamente, las Prácticas Verdes Sostenibles (SGP) y la Innovación en Tecnología Verde (ITV) se integran con herramientas avanzadas de diseño, destacando la combinación de Building Information Modeling (BIM) y Evaluación del Ciclo de Vida (LCA), esenciales para cuantificar emisiones incorporadas, seleccionar materiales óptimos y reducir costos desde la etapa de diseño. A ello se suman metodologías como la Ingeniería de Valor y soluciones de Industria 4.0, incluyendo Gemelos Digitales centrados en el factor humano, que permiten simular y optimizar procesos complejos como el ensamblaje sostenible, reduciendo errores y consumo energético en tiempo real. Además, la incorporación de tecnologías inteligentes para la logística verde y la gestión eficiente de la cadena de suministro refuerza la competitividad organizacional, asegurando el cumplimiento normativo y la mejora continua en eficiencia ecológica. En síntesis, la sostenibilidad no es solo una meta regulatoria, sino el eje estratégico que define el futuro de la ingeniería industrial [4] [5] [6] [15].

Campo 2: Impacto ambiental

Según la Tabla 3, el “Impacto Ambiental” se establece como un tema de nicho debido a su función crucial en la promoción de la sostenibilidad dentro del sector de la ingeniería y la construcción, enfocándose en la mitigación de los efectos ecológicos derivados de las actividades industriales. Una tendencia clave es la evaluación y reducción de las emisiones incorporadas (*embodied emissions*), un desafío que se aborda mediante herramientas como la Evaluación del Ciclo de Vida (LCA) y la metodología BIM (*Building Information Modeling*), fundamentales para minimizar las emisiones en el sector de Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AEC). En esta línea, las innovaciones se centran en el desarrollo de nuevos materiales y en el rendimiento ambiental de los subproductos industriales. Por ejemplo, se investiga la evaluación de las propiedades de ingeniería y el impacto ambiental de materiales alternativos, como la escoria de acero aplicada en subrasantes, así como el desempeño ambiental de subproductos en el refuerzo de turba, y el uso de nanobiocarbón para la remediación ambiental en hormigón poroso, posicionando estas soluciones como tecnologías verdes y de construcción sostenible. Adicionalmente, la preocupación por el impacto ambiental se integra en las etapas iniciales del proyecto, como se observa en el análisis del impacto ambiental del diseño sismo-resistente para un enfoque

sostenible de la respuesta estructural en regiones de alto riesgo sísmico [15] [20] [21] [22].

Campo 3: Eficiencia energética

Según la Tabla 3, la “eficiencia energética” se considera un tema de nicho dentro de la ingeniería verde, debido a que su enfoque trasciende la simple adopción tecnológica para centrarse en la optimización integral del rendimiento y la reducción sistemática del consumo de recursos. La literatura actual destaca que la mejora del desempeño energético es esencial para los procesos de descarbonización, incorporando estrategias de diseño pasivo y materiales de aislamiento térmico de alta eficiencia que disminuyen significativamente la demanda operativa y las cargas de climatización desde las etapas iniciales del diseño arquitectónico. De forma complementaria, se implementan sistemas inteligentes de gestión energética (SBEMS) y plataformas basadas en IoT que permiten el monitoreo en tiempo real y el ajuste dinámico de los patrones de consumo, eliminando pérdidas operativas y garantizando niveles adecuados de confort para los usuarios. A nivel sistémico, la optimización de recursos se fortalece mediante el desarrollo de arquitecturas de microrredes y esquemas avanzados de gestión de la demanda (DSM), los cuales equilibran la generación renovable con el consumo energético para promover la resiliencia y la autosuficiencia en infraestructuras como edificios universitarios y estacionamientos inteligentes. Además, la eficiencia energética también se extiende a la recuperación de calor residual en procesos térmicos, empleando avances en generadores termoeléctricos (TEG) que mejoran la transferencia de calor y la conversión energética mediante diseños optimizados de intercambiadores y materiales de alto desempeño. Estas iniciativas reflejan una transición hacia sistemas que administran de manera más precisa sus flujos energéticos, reducen el desperdicio y operan bajo principios de sostenibilidad técnica y ambiental. [11] [23] [24] [25].

Campo 4: Innovación en tecnología verde

Según la Tabla 3, la Innovación en Tecnología Verde se consolida como un tema emergente dentro de la Ingeniería Verde y Ambiental, ya que impulsa la adopción de soluciones avanzadas para mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad en infraestructuras y edificaciones inteligentes. Este campo se fortalece con tecnologías orientadas a la gestión energética, destacándose el desarrollo de microrredes para Edificios de Energía Positiva (PEBs). El artículo “MCDM Optimization-Based Development of a Plus-Energy Microgrid Architecture for University Buildings and Smart Parking” [25] demuestra cómo la optimización multicriterio permite integrar generación fotovoltaica, sistemas de almacenamiento y flujos bidireccionales building-to-vehicle para aumentar la autonomía energética. A su vez, la digitalización del consumo se materializa mediante plataformas inteligentes como BENEFIT, presentada en el estudio “BENEFIT: An Energy Management Platform for Smart and Energy Efficient Buildings” [24], donde el uso de IoT y algoritmos de control

permite monitoreo en tiempo real y ajustes automáticos del consumo para maximizar la eficiencia. Estas innovaciones consolidan el rol estratégico de la tecnología verde como catalizador de edificaciones más sostenibles y sistemas energéticos más resilientes.

Campo 5: Desarrollo sostenible

Según la Tabla 3, el “Desarrollo Sostenible” constituye el eje transversal de la Ingeniería Verde y Ambiental, impulsando la transición de las prácticas de construcción e industriales hacia modelos de Economía Circular (EC) que abarcan desde la conceptualización teórica hasta la aplicación ingenieril detallada. En el sector de la edificación, este desarrollo se materializa a través de un Concepto de Diseño Circular que busca implementar prácticas sostenibles en edificios, enfocándose en la minimización de residuos y el uso eficiente de recursos a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto. Un componente crítico de la sostenibilidad es la gestión de residuos y la valorización de subproductos industriales, lo cual se investiga activamente mediante la incorporación de materiales residuales como la ceniza de fondo de incineración de residuos sólidos urbanos y la fibra de sisal para producir agregados ligeros con propiedades de ingeniería mejoradas y mayor sostenibilidad. Adicionalmente, el foco se pone en la reutilización de subproductos industriales para mejorar el rendimiento ambiental, mecánico y microestructural en la ingeniería geotécnica, como el refuerzo de turba. Este enfoque integral, que combina el diseño circular a nivel macro con la innovación de materiales a nivel micro, asegura que las soluciones de ingeniería no solo sean eficientes sino también intrínsecamente responsables con el medio ambiente. [10] [6] [26] [27].

2.2. Aplicaciones prácticas de los campos identificados

Por ejemplo, un caso contundente de aplicación práctica se encuentra en la búsqueda de la autonomía energética en infraestructuras complejas. El estudio de [25], titulado “MCDM Optimization-Based Development of a Plus-Energy Microgrid Architecture for University Buildings and Smart Parking”, ilustra cómo la ingeniería moderna utiliza microrredes y sistemas de optimización multicriterio (MCDM) para transformar campus universitarios en Edificios de Energía Positiva (PEBs). Esta implementación práctica integró la generación fotovoltaica con tecnologías Building-to-Vehicle (B2V/V2B) y sistemas de almacenamiento en baterías, logrando no solo satisfacer la demanda energética local, sino también generar excedentes. El uso de algoritmos avanzados permitió a los ingenieros balancear los requerimientos técnicos con los beneficios económicos y ambientales, demostrando una ruta clara hacia la sostenibilidad y la resiliencia en entornos urbanos.

Asimismo, la digitalización y el monitoreo inteligente se presentan como herramientas esenciales para maximizar la eficiencia energética operativa. El artículo de [24], llamado “BENEFIT: An Energy Management Platform for Smart and Energy Efficient Buildings”, describe la implementación de

BENEFIT, una plataforma de Gestión de Energía en Edificios Inteligentes (*Smart Energy Building Management System, SBEMS*). Este sistema se apoya en el *Internet of Things (IoT)* y algoritmos de control para monitorear y ajustar automáticamente el consumo en tiempo real, desde la iluminación hasta la climatización, basándose en la ocupación y las condiciones ambientales. La aplicación de esta tecnología demuestra una reducción significativa del desperdicio energético, probando que las herramientas de tecnología verde pueden modernizar infraestructuras existentes, mejorando su desempeño ambiental y económico sin requerir grandes intervenciones estructurales.

Finalmente, la sostenibilidad se aplica directamente en la fase de diseño arquitectónico y la selección de materiales. En el estudio "*Green building design and energy efficiency improvement in architectural engineering*", [23] analiza cómo la integración del diseño de edificios verdes con materiales avanzados puede reducir el impacto ambiental total de una construcción. Este enfoque práctico promueve la incorporación de aislamientos térmicos de alta eficiencia y sistemas de energía limpia, como los fotovoltaicos integrados en fachada, para disminuir significativamente la demanda energética operativa del edificio. De este modo, la investigación valida que, al considerar el ciclo de vida completo y la eficiencia desde el inicio del diseño, se ofrecen soluciones replicables y tangibles para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones en el sector de la construcción.

IV. ALCANCES

El objetivo de esta investigación es analizar de manera clara y estructurada las principales propuestas de la Ingeniería Verde y Ambiental aplicadas al sector industrial, con el fin de identificar pautas que fortalezcan la sostenibilidad y la competitividad empresarial. El estudio se limita a artículos indexados en Scopus, publicados entre 2021 y 2025 y pertenecientes a revistas Q1 y Q2, lo que garantiza la calidad y actualidad de la información revisada. Además, se consideran únicamente trabajos escritos en inglés y basados en evidencia práctica, permitiendo evaluar soluciones recientes orientadas a la mejora de procesos y la reducción del impacto ambiental.

V. LIMITACIONES

Esta revisión sistemática presenta limitaciones inherentes, ya que la evidencia analizada proviene principalmente de fuentes secundarias, lo que dificulta validar de manera directa la efectividad operativa y económica de las estrategias evaluadas. Aunque la Ingeniería Verde y Ambiental abarca un amplio espectro de soluciones, el análisis revela una marcada concentración en temas relacionados con eficiencia energética y construcción inteligente, dejando subrepresentados sectores industriales clave como la manufactura pesada y la minería. Esta falta de diversidad limita la posibilidad de generalizar las conclusiones a toda la matriz industrial global.

VI. CONCLUSIONES

El análisis sistemático demuestra que la Ingeniería Verde ha evolucionado de ser una herramienta de cumplimiento normativo a un eje estratégico indispensable para la viabilidad industrial competitiva. A diferencia de estudios previos que abordan la sostenibilidad desde perspectivas regulatorias aisladas, esta investigación aporta una síntesis crítica al evidenciar que el verdadero impacto ecológico no reside en la adopción individual de prácticas verdes, sino en la convergencia tecnológica. Específicamente, se concluye que la integración sinérgica de principios de Economía Circular con plataformas digitales disruptivas, como Gemelos Digitales y Building Information Modeling (BIM), constituye el diferenciador clave para lograr reducciones operativas significativas y mejorar la autonomía energética.

Asimismo, el análisis comparativo global revela una clara asimetría: mientras que países líderes (como China) impulsan la innovación mediante marcos integrados, el principal desafío para la escalabilidad global radica en superar las barreras financieras iniciales y la falta de estandarización en la Evaluación del Ciclo de Vida (LCA) de los procesos de manufactura. Por tanto, la contribución fundamental de este estudio es proporcionar una hoja de ruta empírica y estructurada que trasciende la descripción teórica, orientando a los tomadores de decisiones e investigadores hacia una transición industrial que es técnica, ecológica y económicamente viable.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Rocío del Carmen León Castro, cuya orientación y dedicación fueron esenciales para el adecuado desarrollo de este estudio. Del mismo modo, extendemos nuestro agradecimiento a la Universidad Privada del Norte por los recursos proporcionados durante el proceso de investigación. Finalmente, hacemos extensivo este agradecimiento a nuestras familias y a todas aquellas personas que, con su apoyo y motivación, contribuyeron de manera significativa a la culminación de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] J. Rahko and A. A. Alola, "Examining green productivity amidst climate change technological development and spillovers in the Nordic economies," *Journal of Cleaner Production*, vol. 434, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140028>
- [2] D. Divya, L. Nagarajan, P. Saravanan, and H.-S. Byun, "Understanding the characteristics of SO₂ capture: Effect of solar-assisted adsorbent, isotherms, kinetics, thermodynamics, and mechanism," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 127, pp. 452–471, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.05.031>
- [3] V. Dirma, L. O. Okunevičiūtė Neverauskienė, M. Tvaronavičienė, I. Danilevičienė, and R. Tamošiūnienė, "The Impact of Renewable Energy Development on Economic Growth," *Energies*, vol. 17, no. 24, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/en17246328>
- [4] H. Wang, J. Zhou, K. Gu, and F. Dong, "Can New Quality Productivity Drive the Low-Carbon Transformation of Carbon-Intensive Industries? Macro and Micro Evidence from China," *Energies*, vol. 18, no.13, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/en18133278>

- [5] I. Uvarova, D. Atstaja, T. Volkova, J. Grasis, and I. Ozoliņa-Ozola, "The typology of 60R circular economy principles and strategic orientation of their application in business," *Journal of Cleaner Production*, vol. 409, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137189>
- [6] R. Kouser, G. Mahmood, W. A. Watto, M. Fahlevi, and A. L. Aziz, "Assessing the impact of green manufacturing and green technology innovation on sustainable green practices: unveiling the mediating role of eco-design," *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 18, no. 1, 2025, doi: <https://doi.org/10.1080/19397038.2025.2538868>
- [7] A. Pan, P. Jiang, C. Wang, and F. Wang, "Does environmental regulation promote green technological innovation of companies? Evidence from green patents of Chinese listed companies," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 19, pp. 807–820, 2024, doi: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctad078>
- [8] N. Farronato, V. Scuotto, M. Pironti, and M. Giudice, "The Green Frontier of Mobile Applications in Improving Recycling Consumers' Behavior," *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 71, pp. 13191–13200, 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/TEM.2022.3200945>
- [9] H. Fatorachian and H. Kazemi, "Leveraging technology and sustainability practices for smart mobility and green logistics: a dual-theoretical approach to adoption dynamics," *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 18, no. 1, 2025, doi: <https://doi.org/10.1080/19397038.2025.2531890>
- [10] H. Song, T. Liu, F. Gauvin, and H. J. H. Brouwers, "Investigation of sisal fiber incorporation on engineering properties and sustainability of lightweight aggregates produced from municipal solid waste incinerated bottom ash," *Construction and Building Materials*, vol. 413, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134943>
- [11] C.-Y. Chen, K.-W. Du, Y.-C. Chung, and C.-I. Wu, "Advancements in Thermoelectric Generator Design: Exploring Heat Exchanger Efficiency and Material Properties," *Energies*, vol. 17, no. 2, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/en17020453>
- [12] S. Sinyoung, A. Jeeraro, P. Udomkun, K. Kunchariyakun, and P. Kajitvichyanukul, "Transformative innovations in nano-biochar-enhanced porous concrete: Elevating engineering performance and pollutant removal," *Developments in the Built Environment*, vol. 18, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100469>
- [13] K. Ou, Y. Shi, and W. Zhou, "An Evolutionary Game Study on Green Technology Innovation of Coal Power Firms under the Dual-Regulatory System," *Energies*, vol. 17, no. 3, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/en17030607>
- [14] S. Fu, M. Tian, Y. Ge, T. Yao, and J. Tian, "Influencing Factors and Mechanisms of Corporate Social Responsibility Reputation under Green and Low-Carbon Transition: Evidence from Chinese Listed Companies," *Energies*, vol. 17, no. 9, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/en17092044>
- [15] K. S. S. Kyaw, L. Huang, Y. Liu, and R. A. Bohne, "Influences of BIM-LOD and Geographic-Scale Environmental Impact Factors on embodied emissions: The Norwegian context," *Building and Environment*, vol. 269, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112345>
- [16] M. Crnjac Zizic, N. Gjeldum, M. Mladineo, B. Bilić, and A. Aljinovic Mestrovic, "Towards Sustainable Personalized Assembly Through Human-Centric Digital Twins," *Sensors*, vol. 25, no. 18, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/s25185662>
- [17] H. Han, T. Cai, S. Ge-Zhang, J.-L. Shi, and G. Tong, "Wood-based triboelectric nanogenerators: From structural design to performance optimization and applications," *Materials and Design*, vol. 260, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.115168>
- [18] B. Kitchenham and S. Charters, "Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering," *Keele University and Durham University, Joint Tech. Rep. EBSE-2007-01*, 2007.
- [19] Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021;372: n160. doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
- [20] Y. Zhang, T. Jiang, S. Li, and W. Wang, "Engineering Properties and Environmental Impact of Soil Mixing with Steel Slag Applied in Subgrade," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 3, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/app13031574>
- [21] A. Ahmad, D. S. Karunatilaka, V. Anggraini, and M. E. Raghunandan, "Mechanical, microstructural, and environmental performance of industrial byproducts in peat reinforcement," *Construction and Building Materials*, vol. 451, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138780>
- [22] A. Bohorquez, E. Viteri, E. Rivera Tapia, and C. Ávila, "Environmental Impact of Earthquake-Resistant Design: A Sustainable Approach to Structural Response in High Seismic Risk Regions," *Buildings*, vol. 14, no. 12, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings14123821>
- [23] J. Li, "Green building design and energy efficiency improvement in architectural engineering," *Results in Eng.*, vol. 27, Art. no. 106973, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106973>
- [24] M. Aradoaci, R.-C. Ciobanu, C. M. Schreiner, G. Grigoraş, and R.-P. Livadariu, "BENEFIT: An Energy Management Platform for Smart and Energy Efficient Buildings," *Energies*, vol. 18, no. 17, Art. no. 4542, Aug. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/en18174542>
- [25] M. Ouria, A. F. M. Correia, P. Moura, P. Coimbra, and A. T. de Almeida, "MCDM Optimization-Based Development of a Plus-Energy Microgrid Architecture for University Buildings and Smart Parking," *Energies*, vol. 18, no. 14, Art. no. 3641, Jul. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/en18143641>
- [26] I. C. Scurtu, K. P. Khetani, and F. D. Scheaua, "In Search of Eudaimonia Towards Circular Economy in Buildings—From Large Overarching Theories to Detailed Engineering Calculations," *Buildings*, vol. 14, no. 12, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings14123983>
- [27] D. Buehler, T. Vischer, and R. Junge, "A Circular Design Concept for Implementing Sustainable Building Practices in the KREIS-Haus Living Lab, Switzerland," *Buildings*, vol. 15, no. 3, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings15030409>