

More Effective Strategies for Cleaner Production in the Industrial Sector: A Systematic Review

Leon Castro, Rocio del Carmen¹, Alva Layza, Mirian Aracelly², Calixtro Soto, Karla Esther³, Huerta Alonso, Victoria Jolie⁴, Pimentel Apaico, Linda Jazmin⁵, Sanchez Huamani, Carolay⁶

¹Docente. Ingeniería Industrial. Universidad Privada Del Norte. Perú

²⁻⁶Estudiantes. Ingeniería Industrial. Universidad Privada Del Norte. Perú

Abstract– Industrial pollution represents a serious social and environmental problem worldwide, contributing to global warming and the degradation of ecosystems. In this context, achieving carbon neutrality has become a global priority. In 2023, Peru recorded 210.4 million tonnes of CO₂ emissions, equivalent to 0.42% of the global total, mainly greenhouse gases. In response to this problem, Cleaner Production (CP) has emerged as an effective strategy for promoting sustainability, as it implements preventive measures that optimise resources, processes and technologies, reduce waste and encourage innovation in the supply chain. This study, developed through a systematic review of academic literature published between 2020 and 2024 in the Scopus database, selected 50 relevant articles based on quality criteria (Q1 and Q2) and applied bibliometric analysis tools such as VOSviewer and Bibliometrix. The results show that LMP is applied in key sectors such as manufacturing, energy, textiles, technology and economics, with a sustained increase in scientific output on the subject. Likewise, applied cases demonstrate its effectiveness: in Bangladesh, the integration of the Pollution Load Index (PLI) and eco-efficiency models enabled the textile industry to increase its economic efficiency by 27.6%; while in China, the application of data-driven strategies in ceramic companies significantly reduced energy costs and emissions. These findings show that PML combines environmental and economic benefits, although it faces technical and financial constraints in less developed sectors.

Keywords– Cleaner production, Sustainable development, Environmental impact, Environment, Waste.

Estrategias más Efectivas para la Producción Más Limpia en el Sector Industrial: Una Revisión Sistemática

Leon Castro, Rocio del Carmen¹, Alva Layza, Mirian Aracelly², Calixtro Soto, Karla Esther³, Huerta Alonso, Victoria Jolie⁴, Pimentel Apaico, Linda Jazmin⁵, Sanchez Huamani, Carolay⁶

¹Docente. Ingeniería Industrial. Universidad Privada Del Norte. Perú

²⁻⁶Estudiantes. Ingeniería Industrial. Universidad Privada Del Norte. Perú

Resumen— La contaminación industrial representa un grave problema social y ambiental a nivel mundial, contribuyendo al calentamiento global y la degradación de los ecosistemas. En este contexto, alcanzar la neutralidad de carbono se ha convertido en una prioridad global. En 2023, Perú registró 210,4 millones de toneladas de emisiones de CO₂, equivalentes al 0,42% del total mundial, principalmente gases de efecto invernadero. Frente a esta problemática, la Producción Más Limpia (PML) surge como una estrategia efectiva para promover la sostenibilidad, ya que implementa medidas preventivas que optimizan recursos, procesos y tecnologías, reducen residuos y fomentan la innovación en la cadena de suministro. El presente estudio, desarrollado mediante una revisión sistemática de literatura académica publicada entre 2020 y 2024 en la base de datos Scopus, permitió seleccionar 50 artículos relevantes bajo criterios de calidad (Q1 y Q2) y aplicó herramientas de análisis bibliométrico como VOSviewer y Bibliometrix. Los resultados evidencian que la PML se aplica en sectores clave como manufactura, energía, textil, tecnología y economía, mostrando un aumento sostenido en la producción científica sobre el tema. Asimismo, casos aplicados demuestran su efectividad: en Bangladesh, la integración del Índice de Carga de Contaminación (ICC) y modelos de ecoeficiencia permitió a la industria textil incrementar su eficiencia económica en un 27,6%; mientras que en China, la aplicación de estrategias data-driven en empresas cerámicas redujo significativamente costos energéticos y emisiones. Estos hallazgos evidencian que la PML combina beneficios ambientales y económicos, aunque enfrenta limitaciones técnicas y financieras en sectores menos desarrollados.

Palabras Clave— Producción más limpia, Desarrollo sostenible, Impacto ambiental, Medio ambiente, Residuos.

I. INTRODUCCIÓN

El impacto social de la contaminación generada por el sector industrial es una preocupación internacional, ya que está vinculada tanto al calentamiento global como a la degradación ambiental. De hecho, alcanzar la neutralidad de carbono es fundamental para diversos países, tanto del mundo desarrollado como en desarrollo. [1][2][3] Es por esto por lo que, deben aplicarse estrategias de ahorro energético para reducir las grandes emisiones de carbono, optimizar el uso de los recursos naturales y lograr la sostenibilidad. [4]. Esto debido a que, en los últimos años, las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) producidos principalmente por las actividades humanas han provocado significativos cambios climáticos, a la vez las emisiones globales de CO₂ representan

hasta el 74% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero. [5] [6] [7]

Los contaminantes emitidos en gran parte de la actividad industrial comprenden el dióxido de carbono (CO₂), un gas de efecto invernadero que afecta significativamente el medio ambiente. Este tipo de emisiones son esenciales para evaluar el impacto ambiental en las empresas. [8]

En este contexto, la Producción Más Limpia (PML) se posiciona como un enfoque clave para lograr una producción sostenible y respetuosa con el medio ambiente, ya que busca reducir significativamente el impacto de las actividades productivas mediante la adopción de medidas preventivas integrales. [9] [10]. A su vez, La Producción Más Limpia (PML) implementa de forma constante la estrategia ambiental en los procesos de producción, lo que permite mejorar la eficiencia en la producción y reducir los riesgos tanto ambientales como para la salud humana. [11][12]

Así mismo, [12] menciona que la PML involucra un avance adecuado en los procesos, procedimientos, recursos, tecnologías e infraestructura para aportar al desarrollo sostenible. Esto se logra incrementando la eficiencia en el uso de los materiales y de energía, introduciendo tecnologías de última generación, fomentando nuevas ideas innovadoras y ajustando los diferentes niveles de la cadena de suministro, tanto a nivel sectorial como empresarial [13].

A pesar de los esfuerzos de las empresas por integrar la sostenibilidad, estas siguen priorizando los objetivos financieros sobre los beneficios ambientales y sociales, descuidando el equilibrio entre economía, sociedad y medio ambiente. Lo que agrava a su vez, la deterioración ambiental, la disminución de biodiversidad y la contaminación de los recursos naturales. La gestión deficiente de plásticos, químicos peligrosos y metales pesados, perjudica a los recursos de agua, tierra y aire; así como la reputación, imagen y credibilidad de las empresas [14] [12] [15] [8].

Los métodos de producción más limpia se centran en la prevención de residuos y contaminación desde su origen, en lugar de aplicar soluciones al final del proceso, lo que transforma las operaciones industriales. Estos enfoques abarcan la minimización de residuos, la optimización del uso de recursos y la adopción de tecnologías ecológicas. Un ejemplo destacado es la fabricación eficiente, que mejora las

operaciones y disminuye la generación de desperdicios.[16] [8] Además, adoptar métodos de fabricación más sostenibles y soluciones innovadoras permite a los fabricantes reducir su impacto ambiental, al mismo tiempo que mejora su eficiencia y competitividad [17] [8]

De este modo, este estudio destaca la importancia de llevar a cabo una investigación exhaustiva e integral sobre los diversos factores que promueven el desarrollo sostenible mediante la adopción de métodos de producción más limpios y avances innovadores en los procesos industriales [18] [8]

En este sentido, investigaciones previas han demostrado que la adopción de tecnologías limpias, como la Producción Más Limpia (PML), puede reducir significativamente el impacto ambiental. En relación con esto, surge la siguiente interrogante: ¿Qué impacto tiene la adopción de estrategias de Producción Más Limpia (PML) en la sostenibilidad de las industrias?

El objetivo de esta investigación es analizar las estrategias de Producción Más Limpia (PML) en el sector industrial, con el propósito de identificar y sugerir mejoras sostenibles. Para lograrlo, se establecieron los siguientes objetivos específicos: Revisar las investigaciones actuales y los estudios académicos sobre la (PML) en el sector industrial; Realizar un análisis exhaustivo basado en una revisión de literatura científica obtenida de una base de datos extensa, para extraer y analizar lo más relevante de la PML e Investigar los retos que enfrentan las empresas en la adopción de (PML).

II. METODOLOGÍA

Para el presente estudio, hemos optado por realizar una revisión sistemática, para examinar y poner en contexto la bibliografía publicada con la finalidad de encontrar la información necesaria que responda una pregunta bien definida. Esta metodología nos permite investigar un tema específico, analizando y discutiendo la información más relevante y necesaria. Las publicaciones seleccionadas para la revisión son muy selectivas, enfocándonos siempre en lo más importante y reciente. [19]

Para lograr esto se definieron los criterios que se incluirían y excluirían, lo que se puede evidenciar en la *Tabla 1*. Se incluyeron artículos científicos publicados en revistas académicas, puesto que estas han sido evaluadas previamente por expertos. Igualmente se abarcaron artículos publicados entre los años 2020 y 2024 para integrar los avances más recientes sobre estrategias de producción más limpia en el sector industrial. De igual forma, se comprendieron las publicaciones cuyo indicador sea Cuartil I o II, esto con la intención de asegurar que los artículos revisados sean relevantes para la investigación y su contenido sea de calidad. Por el contrario, no se incluyeron artículos que no hayan sido

revisados por pares, ya que estos no garantizan la calidad científica. También fueron excluidos los estudios que no se centraban en la producción más limpia. Por otro lado, las investigaciones sin datos aplicables a la producción más limpia igualmente se excluyeron dado que no ofrecen información útil para nuestro análisis.

Se desarrolló una búsqueda exhaustiva de literatura utilizando las bases de datos académica Scopus, elegida por su reconocimiento académico. Para la recopilación de información sobre las estrategias más efectivas de producción más limpia en diversas industrias, los términos de búsqueda o palabra clave utilizada fue "Cleaner Production", debido a su relación directa con la pregunta de investigación.

Se aplicaron filtros para limitar la búsqueda a artículos desde 2020 hasta la actualidad. Durante la búsqueda de artículos en las bases de datos, se emplearon técnicas tradicionales de búsqueda booleana. Se hizo uso de las comillas (" "), las cuales permitieron que los resultados encontrados contengan la frase exacta, en cuanto al operador AND se aplicó para que los resultados contuvieran todas las palabras clave. Se hizo uso de cada criterio teniendo en cuenta lo más conveniente para la investigación en curso.

TABLA I
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN EN LA BÚSQUEDA.

Criterios	Razones
<i>Criterios de inclusión</i>	
Publicaciones en inglés.	Para asegurar una mayor accesibilidad a fuentes académicas relevantes en el contexto global.
Artículos publicados entre 2020 y 2024.	Para garantizar que los resultados reflejen los avances más actuales sobre la producción más limpia.
Publicaciones cuyo indicador sea Cuartil I o II.	Para asegurar que los estudios incluidos sean de alta calidad y tengan relevancia científica.
Estudios que presenten resultados cuantitativos y cualitativos.	Para proporcionar una visión más completa.
<i>Criterios de exclusión</i>	
Artículos no revisados por pares (informes sin revisión).	No aseguran la calidad científica.
Estudios que no se centren en la producción más limpia.	Para mantener el enfoque y la relevancia en el tema.
Investigaciones que no presenten datos o resultados aplicables a la producción más limpia.	No ofrecen información útil para el análisis.
Estudios que se centren exclusivamente en teorías sin una aplicación práctica.	Se prioriza estudios que presenten aplicaciones prácticas implementables en la industria.

Se realizó la selección de estudios, para lo cual se utilizaron el mismo rango de fechas y criterios para los artículos revisados, lo que dio como resultado 12,840 artículos. Se excluyeron los artículos sin revisión por pares y se realizó un cribado de artículos duplicados y artículos que no contenían el texto completo, los cuales no eran de acceso abierto, disminuyendo así el número de artículos a 6,480. Asimismo, de estos últimos, 3,740 que son los registros excluidos aplicados en el área temático, quedando 2,740 artículos después de su eliminación. Luego, se realizó otro cribado o análisis de la limitación del tipo de documento para la selección final, descartando aquellos cuyos enfoques no coincidían con el tema de investigación centrado en las

estrategias de “Cleaner Production” (Producción Más Limpia) en las industrias, producto de la selección se obtuvieron 1,872 artículos. Posteriormente, se descartaron los artículos que no presentaban resultados aplicables y solo quedaron los que abordaban temas generales con un enfoque en la producción más limpia, resultando de ello 136 artículos. En el cual de estos informes solo se seleccionaron 50 artículos fundamentales para la investigación. Todo el proceso se ilustra en la Figura 1 utilizando el diagrama PRISMA.

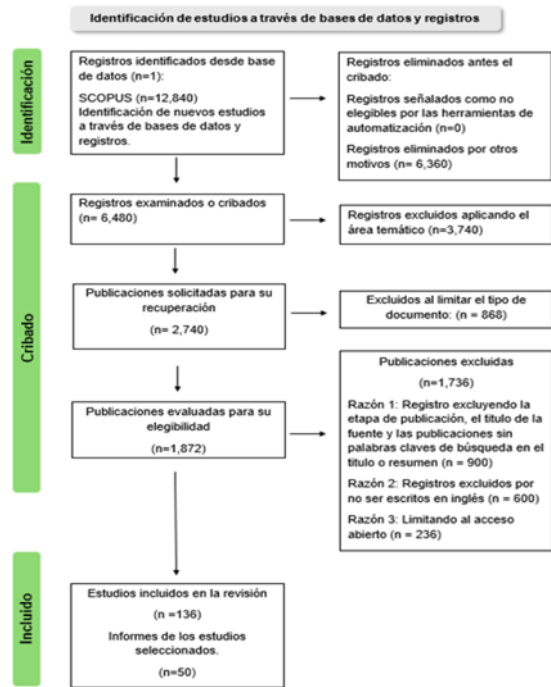


Fig. 1. Diagrama de flujo PRISMA.

En la interpretación visual de la (fig.2) se muestra el mapa de calor realizado en base a los datos obtenidos de SCOPUS, donde se visualiza la intensidad de la co-ocurrencia de palabras clave más citadas en diversos artículos, entre los años 2020 al 2024.

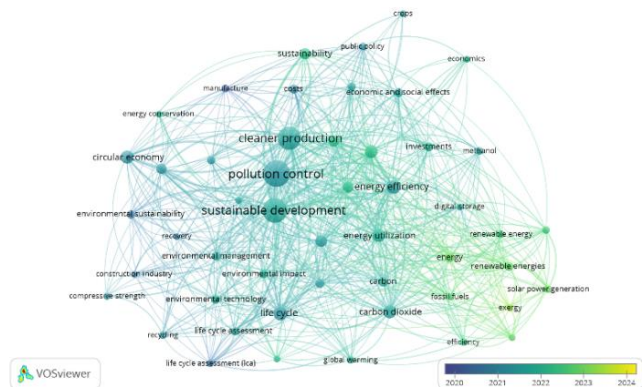


Fig. 2. Mapa de calor de la co-ocurrencia de palabras, artículos y redes de autores con el año de publicación.

Este mapa utiliza una gama de colores que permite identificar patrones y relaciones dentro del conjunto de datos. Para su elaboración, se utilizó la herramienta de software VOSviewer, donde los colores del mapa indican la intensidad de la co-ocurrencia que va de colores fríos (amarillo, verde claro o celeste) representando valores bajos, mientras que los colores cálidos (turquesa, verde o morado) reflejan valores altos, permitiendo identificar las áreas de alta y baja intensidad de relación. Además, el mapa de calor ayuda a destacar las palabras más colaborativas en una red de investigación, mostrando patrones de colaboración frecuentes entre ellos. A su vez, los años o periodos de tiempo mostrados se utilizan como una variable que va mejorando con el tiempo.

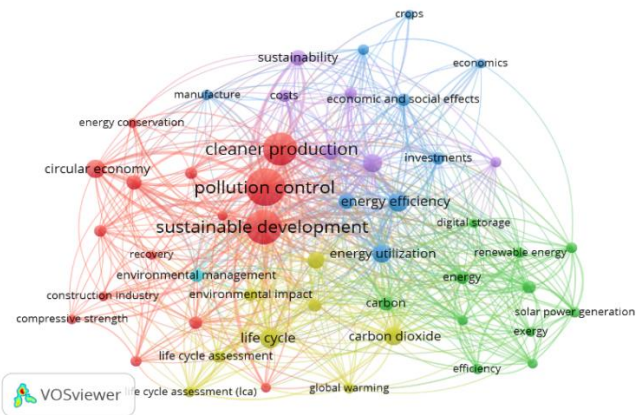


Fig. 3. Visualización de redes de palabras clave

En la visualización de redes de palabras clave (fig.3), se llevó a cabo la selección de artículos con ayuda de la base de datos Scopus, con el fin de integrar la recolección de información en VOSviewer, una herramienta de software para la construcción y visualización de redes bibliométricas. Donde se visualizan las publicaciones cuyos artículos contenían la palabra clave más encontradas como: “Sustainable Development”, “Pollution Control”, “Cleaner Production”, “Circular economy”, “Sustainability”, “Energy”, “Efficiency”, entre otros. Obteniendo un total de 50 resultados relacionados.

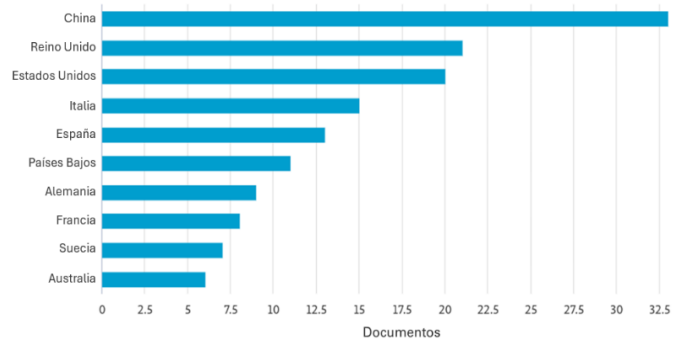
En la representación generada, los nodos representan elementos individuales, como las palabras claves (*keywords*), mientras que los enlaces reflejan las conexiones entre los nodos, basadas en la co-ocurrencia de los keywords. El tamaño de los nodos indica su importancia dentro de la red, el grosor de los enlaces refleja la intensidad de relación entre los nodos (la colaboración más fuerte), y colores se utilizan para diferenciar los clústeres temáticos identificados en la red.



En la nube de palabras (fig.4), extraída de la herramienta de análisis bibliométrico Bibliometrix, se observa las palabras más utilizadas de los documentos recolectados de la base de datos Scopus, esto nos permite lograr distinguir las palabras clave utilizadas con mayor frecuencia en los artículos analizados, visualizándose términos clave, como son las palabras más grandes como "cleaner production", "sustainable development", "pollution control", "energy efficiency" y entre otras más, esto destaca que son temas centrales en las investigaciones dentro del tema general. Los términos de menor tamaño reflejan los subtemas o áreas específicas de interés dentro de un marco más extenso.

El mapa de densidad (fig.5), obtenido del programa VOSviewer muestra la intensidad de palabras claves según el número de veces que aparecen en los documentos analizados, donde se filtraron un total de 1988 términos encontrados con una ocurrencia mínima de 5, de las cuales de ese total 50 palabras cumplen con el umbral. Se presenta la co-ocurrencia, donde los colores indican cuales son las palabras claves más utilizadas, el amarillo indica las palabras con mayor intensidad y los verdes con menor intensidad de búsqueda, exponiendo así cuales son los temas más importantes y que se destacan de la investigación presentada.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Interpretando el gráfico, deducimos lo siguiente, en relación con la distribución de los artículos por año, en el año 2020, hubo 3 artículos pertenecientes al Q1 y 0 artículos de Q2. En 2021, se incluyeron 8 artículos de Q1, mientras tanto el Q2 permaneció con 0 artículos. Seguido por 2022, con registro de 4 artículos de Q1 y 0 artículos de Q1. En el año 2023, se integraron artículos en Q1 aumentando a 13, y Q2 se sostuvo en 2 artículos. Luego, hasta la fecha actual de la realización de esta revisión (noviembre de 2024), se incorporaron, 18 artículos de Q1, notando un aumento significativo, mientras que Q2 se mantuvo en 2 artículos en 2024. Además, se calcula una tasa de crecimiento anual para los artículos de Q1 del 56.50% y sin tasa porcentual calculable para los artículos Q2. Basado en la proyección mencionada, se deduce que para finales de 2024 se espera un total de 15 artículos Q1 y 2 artículos Q2.

1.3. Artículos por Revista

De acuerdo con la clasificación de los artículos por revista, presentamos los resultados obtenidos en la Tabla 2. Podemos observar que se evidencia la cantidad de artículos según la revista a la que están adscritos. Resaltando la revista “Journal of Cleaner Production”, con un 50% de artículos revisados.

TABLA 2
NÚMERO DE ARTÍCULOS POR REVISTA.

Revista	Número de artículos	Porcentaje del total (%)
Journal of Cleaner Production	25	50
Sustainability (Switzerland)	9	18
Science of The Total Environment	2	4
Chemosphere	2	4
Advanced Engineering Informatics	1	2
Gondwana Research	1	2
Heliyon	1	2
Sustainable Production and Consumption	1	2
Sustainable Futures	1	2
Advanced Engineering Informatics	1	2
Production Engineering Archives	1	2
Energy Reports	1	2
International Review of Economics & Finance	1	2
Energy Economics	1	2
Environment, Development and Sustainability	1	2
Cleaner Engineering and Technology	1	2

1.4. Ranking de artículos según el principio de Pareto

Según el grafico mostrado, se visualizan los artículos más usados en este trabajo, determinando que los más requeridos fueron 24 artículos y otros. De tal manera, se obtuvo un ranking en escala de mayor a menor según su participación en esta investigación, utilizando el principio de Pareto. Se presenta la concurrencia de distintos sectores mediante colores, donde el color rosado son artículos de manufactura; el verde, de energía; el azul, es textil; el lila, es tecnología; el anaranjado, es economía y finalmente el celeste es de otros artículos evaluados en otros campos.



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

2. Análisis cualitativo

2.1. Campos donde se aplica la producción más limpia

El Mapa Temático representado en la Figura 10, se estructura en cuatro bloques, cada uno de los cuales representa una categoría específica: Temas de nicho, Temas Motores, Temas Emergentes y Temas Básicos. Los criterios predefinidos utilizados para el diseño del Mapa Temático incluyen las palabras clave del autor (n = 192) y el clúster mínimo de frecuencia (n = 2), de las 192 palabras clave, 14 cumplen con el umbral.

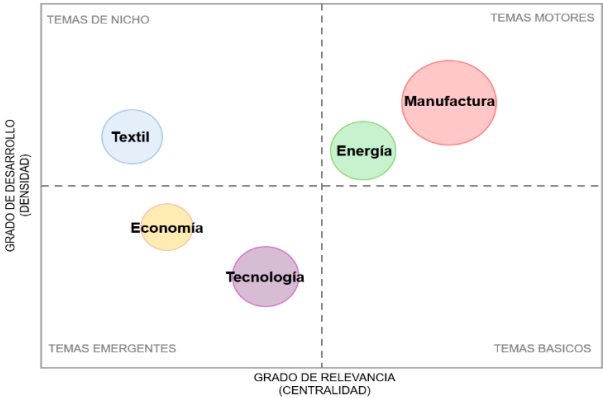


Fig.9 Mapa temático

Según el presentado 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	“Manufactura”	Tema Motor	Áreas clave para innovación sostenible
2	“Energía”	Tema Motor	Fundamentos del progreso y eficiencia
3	“Textil”	Tema Nicho	Sector especializado en prácticas sostenibles
4	“Tecnología”	Tema Emergente	Áreas en desarrollo con alto potencial de impacto
5	“Economía”	Tema Emergente	Dinámicas de crecimiento responsable

Campo 1: Manufactura

Según la Tabla 3, “Manufactura” se considera un tema motor debido a su interdependencia en los procesos y su relación con la producción más limpia. Las investigaciones mencionadas abordan distintos aspectos de la manufactura, con relación a las estrategias de producción más limpia. Se discuten las estrategias más efectivas en el campo de la manufactura para reducir la contaminación ambiental generada por las empresas mejorando a la ventaja competitiva de estas. Una estrategia muy mencionada es la eficiencia en el uso de recursos, destacando la relevancia de realizar mejoras en la eficiencia de uso de recursos, lo que comprende la reducción del consumo de energía y materias primas. Es así, que las empresas manufactureras que implementen prácticas de producción más limpia suelen optimizar sus procedimientos productivos con la intención de reducir el desperdicio y usar al máximo sus recursos. Asimismo, se menciona a las auditorías de producción más limpia, destacando como una herramienta para evaluar y mejorar las prácticas con las que cuentan en la actualidad las empresas contaminantes, ya que ayudan a detectar posibles áreas de mejora en la empresa. De igual forma, con el apoyo de estas, se llevan a cabo cambios que lograrían mitigar el impacto ambiental de las operaciones. Otra estrategia mencionada, es el desarrollo de nuevos productos o procesos por las empresas contaminantes, haciendo uso de la innovación tecnológica, logrando así que estos sean más sostenibles. Esto puede integrar la producción de productos que sean más sencillos de reciclar o que hagan menos uso de los recursos. Partiendo de esa estrategia, también se desglosa otra, la cual es la inversión en la capacitación y mejora de habilidades de los empleados en lo que respecta en su formación para manejar nuevas tecnologías y prácticas de PML [4][20][21][22][23][24].

Campo 2: Energía

Según la Tabla 3, “Energía” se considera un tema motor, debido a que está estrechamente relacionado con la producción más limpia, el cual desempeña un papel esencial en la industria al promover tanto la sostenibilidad como la

eficiencia en el uso de los recursos. Este sector cumple con un rol muy importante dentro de las prácticas de producción limpia. Así mismo, el artículo “*Industry 4.0 and cleaner production: A comprehensive review of sustainable and intelligent manufacturing for energy-intensive manufacturing industries*” presentado por [10], enfatiza la reducción del consumo de recursos y energía. Se aplica varias estrategias a través de la implementación de tecnologías y equipos de procesos avanzados, lo que permite alcanzar un desarrollo económico, social y ambiental de manera coordinada. Este estudio, nos muestra una perspectiva más enfocada a la utilización de equipos y tecnología para una producción más limpia. Por otro lado, el estudio de [25], llamado “*The impact of policies on profit-maximizing rates of reliance on carbon capture for storage versus cleaner production*” analiza las diferentes fuentes de energía empleadas por las industrias, considerando tanto los costos asociados con su uso como las consecuencias ambientales derivadas de su explotación, examina cómo las políticas pueden influir en la decisión entre invertir en tecnologías de captura de carbono o en métodos de producción más limpia, enfocándose en las implicaciones económicas y ecológicas de cada opción. El estudio propone un método para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero llamado “CCS” (Carbon capture and storage), siendo este un concepto ligado a las prácticas de producción más limpia.

Campo 3: Textil

Según la Tabla 3, “Textil” se considera un tema nicho en relación con la producción más limpia, teniendo un papel muy importante en la industria. El sector Textil y la producción más limpia están estrechamente relacionado. El artículo llamado “*Cleaner production evaluation system for textile industry: An empirical study from LCA perspectives*” presentado por [26] describe que el sector textil es crucial para el desarrollo de las prácticas sostenibles debido al gran impacto ambiental que tiene. Esto aborda que la industria textil anteriormente ha sido determinada como la industria más crítica para hacer frente al problema sobre las emisiones de carbono, es por ello que se menciona que un método eficaz para poder disminuir las emisiones contaminantes y conservar los recursos en la industria textil es la producción más limpia. El artículo llamado, “*Sustainable Resilience Degree assessment of the textile industrial by size: Incremental change in cleaner production practices considering circular economy*” presentado por [27] destaca que la industria textil ha logrado una resiliencia debido a la agenda 2030 que busca promover el desarrollo sostenible, teniendo cambios incrementales en las prácticas de producción más limpia, dicha investigación menciona algunas estrategias para las Prácticas de Producción más limpia “CPP” considerando la Economía Circular “CE”, donde se evaluaron por tamaño de empresa. El estudio revela que en las pequeñas empresas

pueden beneficiarse en la adopción de la “CE” a través de la eliminación de residuos utilizando cogeneración de energía más limpia y maximizando los ciclos cerrados. Asimismo, en las empresas medianas deberían de reforzar la capacitación de los empleados en CE. Por otro lado, en las grandes empresas deberían de implementar acciones de CE impulsadas mediante la legislación ambiental de los países para lograr cumplir con los objetivos del desarrollo sostenible.

Campo 4: Tecnología

Según la Tabla 3, “Tecnología” se considera un tema emergente relevante para la producción más limpia, debido a las diferentes estrategias que emplea, ya que contribuye en adoptar equipos y procesos avanzados, como tratamientos más eficientes, así se pueda disminuir las emisiones generadas hacia el medio ambiente [28]. Constantemente surgen nuevos procedimientos y tecnologías que introducen métodos y prácticas innovadoras diseñados para prevenir daños al medio ambiente. Estos avances contribuyen al desarrollo de soluciones más eficientes y sostenibles, promoviendo la creación de tecnologías inteligentes que permiten mejorar los procesos de producción y reducir el impacto ambiental [29]. Entre sus principales contribuciones se encuentran la mejora de la eficiencia energética mediante IA, que minimizan el consumo y el desperdicio; la reducción de emisiones con tecnologías avanzadas de filtrado y captura de carbono, así como la automatización en el tratamiento de residuos; el fomento del reciclaje y la reutilización a través de robótica y procesamiento de datos, promoviendo la economía circular; la optimización de recursos mediante tecnologías como la agricultura de precisión, que evita el desperdicio de agua y fertilizantes; y finalmente, el incentivo para la innovación, que impulsa el desarrollo de tecnologías más eficientes y fomenta la colaboración entre diversos actores para una producción más limpia.

Campo 5: Economía

Según la Tabla 3, “Economía” se considera un tema emergente con la sostenibilidad, debido al impacto en el medio ambiente. Este sector tiene un papel clave en las prácticas de producción más limpia, ya que las decisiones económicas y políticas de las empresas influyen en los procesos productivos, fomentando un modelo de producción responsable. Además, el estudio llamado “*Does exports diversification and environmental innovation achieve carbon neutrality target of OECD economies?*” realizado por [1], analiza el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente en el dióxido de carbono (CO₂). Esto examina la diversificación del mercado de exportación y de los productos de exportación que impactan en la contaminación ambiental. Este fenómeno destaca en economías avanzadas y emergentes, donde el alto consumo de energía no renovable impulsa las emisiones de CO₂ y por ello el cambio climático. Este estudio es relevante porque destaca como las políticas económicas y ambientales que impulsan

innovaciones para una producción más sostenible, teniendo un papel crucial de la producción más limpia, que optimiza los procesos, reduce residuos y minimiza las emisiones contaminantes. Por otro lado, el estudio de [2] llamado “*The role of economic development on the effectiveness of industrial pollution reduction policy in Chinese cities*” aborda el impacto social de la contaminación industrial en China, ya que tiene un fuerte impacto social, afectando la salud y el medio ambiente. En este sentido las políticas ambientales y las inversiones en investigación están ayudando a mitigar los efectos de la contaminación, promoviendo un desarrollo económico más sostenible. En este contexto, la producción más limpia juega un papel clave, ya que optimiza los procesos mediante tecnologías más eficientes y menos contaminantes. Esto no solo reduce las emisiones y mejora la salud pública, sino que favorece el crecimiento económico, impulsando un modelo de desarrollo más saludable y menos destructivo con el medio ambiente.

2.2. Aplicaciones prácticas de los campos identificados

Un caso práctico se observa en el estudio “Investigating the prospect of cleaner production in informal enterprises: A scientific assessment of environmental burdens and economic efficiency” [30], en el cual se empleó el Índice de Carga de Contaminación (ICC) como indicador cuantitativo de impacto ambiental para evaluar la calidad del suelo y el agua, así como para determinar la concentración de metales pesados (Pb, Ni, Cr) presentes en el entorno circundante de empresas manufactureras en Bangladesh, derivada de la descarga indiscriminada de efluentes y el vertido de residuos sólidos. Mediante un modelo de Análisis Envolvente de Datos (DEA), los autores demostraron que, al integrar la minimización del ICC en un modelo de eco-eficiencia y adoptar prácticas de reducción de residuos, control de emisiones y gestión adecuada de efluentes, se pudo estimar que las industrias de teñido y confección incrementaron su eficiencia económica en un 27,6%. Este hallazgo corrobora que las estrategias de PML, no solo reducen la contaminación, sino que también mejora la competitividad empresarial. No obstante, la efectividad de estas estrategias está limitada por restricciones técnicas y financieras, lo que dificulta su aplicación en empresas de menor escala. Desde la perspectiva de la Ingeniería Industrial, herramientas como Lean Manufacturing o Six Sigma, pueden facilitar la incorporación de la reducción de cargas contaminantes, con la mejora de la eficiencia operativa.

Otro caso representativo, se presenta en el estudio de [23] titulado “Data-driven cleaner production strategy for energy-intensive manufacturing industries: Case studies from Southern and Northern China”, en el cual se aplicó una estrategia de Producción Más Limpia basada en datos en dos empresas cerámicas intensivas en energía: una en Foshan (sur de China), y otra en Tangshan (norte de China). En la empresa del sur, la estrategia se centró en reducir el consumo de energía y las emisiones, generando a la vez ahorros

económicos; sin embargo, la implementación del monitoreo en tiempo real representó un reto por los altos costos tecnológicos que superaban los beneficios del ahorro energético, en muchos casos, los beneficios del ahorro energético, lo que explica la resistencia de varias compañías a adoptar este enfoque. Para mitigar esta limitación, se desarrolló un sistema de gestión energética capaz de recopilar datos en intervalos configurables de cinco segundos y un minuto; en Foshan se utilizó un intervalo de un minuto, suficiente para optimizar el consumo de energía y disminuir emisiones durante el proceso productivo.

Por su parte, en la empresa del norte, la estrategia incluyó la modernización de plantas de tratamiento de efluentes, la clausura de calderas de carbón y la optimización de líneas de producción. Estas medidas derivaron en una reducción significativa tanto en los costos de consumo energético como en los costos de contaminación ambiental, evidenciada en los registros de años posteriores. Este enfoque data-driven permitió identificar con mayor precisión los puntos críticos del proceso y priorizar intervenciones de alto impacto, logrando beneficios ambientales y económicos simultáneos. Desde la perspectiva de la Ingeniería Industrial, ambos casos resaltan la importancia de integrar indicadores cuantitativos en la gestión de procesos y demuestran que la Producción Más Limpia basada en datos abre nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia energética y de materiales, además de potenciar el uso de datos para descubrir información clave en los sistemas de fabricación.

V. ALCANCE

Esta revisión sistemática tiene como objetivo analizar las estrategias de Producción Más Limpia (PML) aplicadas en el sector industrial, enfocándose en su impacto en la sostenibilidad y en la reducción del impacto ambiental de las actividades productivas. El alcance abarca investigaciones previas y estudios académicos recientes, publicados en el año 2020 al 2024, relacionados con la implementación de PML en diversos sectores industriales. Además, se incluyen investigaciones de acceso abierto y revisadas por pares, en inglés y español, realizadas en contextos globales y en sectores industriales variados.

VI. LIMITACIONES

Este estudio presenta varias limitaciones que podrían influir en la interpretación de los resultados. Los estudios incluidos provienen principalmente de fuentes secundarias e informes que contienen datos proporcionados por entidades oficiales, lo que puede afectar a la precisión de los datos sobre la adopción de PML en sectores específicos y, además, podría introducir distorsiones en los resultados. Asimismo, aunque se centra en la Producción Más Limpia, existen otras estrategias industriales sostenibles que también podrían tener un impacto significativo en la sostenibilidad, pero no se abordan en

profundidad en este trabajo. Por último, la rápida evolución de las tecnologías limpias y las políticas relacionadas con la sostenibilidad podrían hacer que algunos de los estudios incluidos queden desactualizados en el futuro cercano, lo que limita la aplicabilidad temporal de los resultados.

VII. CONCLUSIONES

En esta revisión sistemática se analizaron las estrategias más efectivas de Producción Más Limpia (PML) en los últimos cinco años, confirmándola como un enfoque integral para reducir el impacto ambiental en la industria. Sin embargo, las empresas enfrentan dificultades para adoptarla debido a la necesidad de disminuir emisiones y optimizar recursos, en respuesta a la urgencia global de mitigar el cambio climático y avanzar hacia la sostenibilidad productiva. El análisis de los cinco campos estudiados muestra que la PML se adapta de manera diferenciada a cada sector: en manufactura y energía mejora la eficiencia de recursos; en textil impulsa resiliencia y circularidad; en tecnología promueve innovación y automatización; y en economía orienta decisiones estratégicas hacia modelos sostenibles. Asimismo, los casos revisados evidencian beneficios concretos, como reducción de costos, aumento de competitividad y fortalecimiento de la imagen corporativa; no obstante, persisten limitaciones vinculadas a la prioridad de objetivos financieros y a la falta de capacitación técnica, lo que subraya la necesidad de políticas y programas de formación que faciliten su implementación.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Rocío del Carmen León Castro, por su valiosa orientación, y a la Universidad Privada del Norte, por el apoyo brindado durante el desarrollo de este estudio. También agradecemos a nuestras familias y a quienes contribuyeron con su ayuda y motivación.

REFERENCES

- [1] N. Iqbal, K. R. Abbasi, R. Shinwari, W. Guangcai, M. Ahmad & K. Tang. (1 August 2021). Does exports diversification and environmental innovation achieve carbon neutrality target of OECD economies? *Journal of Environmental Management* (Volume 291). [Elsevier Ltd.]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112648>
- [2] W. Wang, H. Wang, J. Ortiz, B. Alidaee, B. Sun. (10 March 2022). The role of economic development on the effectiveness of industrial pollution reduction policy in Chinese cities. *Journal of Cleaner Production* (Volume 339). [Elsevier Ltd.]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130709>
- [3] K. Tang, Y. Liu, D. Zhou, Y. Qiu. (2021). Urban carbon emission intensity under emission trading system in a developing economy: evidence from 273 Chinese cities. *Environmental Science and Pollution Research*. Volume (28), pp. 5168-5179 <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10785-1>
- [4] D.M. Utama, M. Abirfatin, 2023. Sustainable Lean Six-sigma: a new framework for improve sustainable manufacturing performance. *Cleaner Engineering and Technology*. (Volume 17). [Elsevier Ltd.]. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100700>
- [5] A. Banu; A. Midilli; Y. Bicer. (2023). Exergetic sustainability comparison of turquoise hydrogen conversion to low-carbon fuels. *Journal of Cleaner Production*. (Volume 384). [Elsevier Ltd.]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135473>

- [6] X. Ying, W. Silin, L. Enyu, Y. Yinsheng. (2023). What is the applicability of clean production technologies for maize as a countermeasure to reduce on-farm CO₂ emissions and increase crop productivity? *Journal of Cleaner Production* (Volume 428). [Elsevier Ltd.]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139462>
- [7] C. Yu, U. K. Sufyan, S. Johannes, Z. Minjuan. (2022). Exploring the spatiotemporal heterogeneity and influencing factors of agricultural carbon footprint and carbon footprint intensity: Embodying carbon sink effect. *Science of The Total Environment* (Volume 846). [Elsevier Ltd.]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157507>
- [8] S. Manikandan, S. Vickram, S. R. Deena, R. Subbaiya, & N. Karmegam. (1 May 2024). Critical review on fostering sustainable progress: An in-depth evaluation of cleaner production methodologies and pioneering innovations in industrial processes. In *Journal of Cleaner Production* (Volume 452). [Elsevier Ltd.]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142207>
- [9] V. H. Mello Santos, T. L. R. Campos, Espuny M., O. J. Oliveira (2022). Towards a green industry through cleaner production development. *Environmental Science and Pollution Research*. Volume (29). pp.349-370. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16615-2>
- [10] S. Ma, W. Ding, Y. Liu, Y. Zhang, S. Ren, X. Kong & J. Leng. (15 August 2024). Industry 4.0 and cleaner production: A comprehensive review of sustainable and intelligent manufacturing for energy-intensive manufacturing industries. In *Journal of Cleaner Production* (Volume 467). [Elsevier Ltd.]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142879>
- [11] T. De Melo Duarte Borges, G.M. Devós Ganga, M.G. Filho, I. Delai, L.A. Santa-Eulalia, (2021). Development and validation of a cleaner production measurement scale. *Journal of Cleaner Production*. Volume (299). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126907>
- [12] T. Le, A. Ferraris, B. K. Dhar. (20 October 2023). The contribution of circular economy practices on the resilience of production systems: Eco-innovation and cleaner production's mediation role for sustainable development. *Journal of Cleaner Production* (Volume 424). [Elsevier Ltd.]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138806>
- [13] B. F. Giannetti, F. J. Dias Lopez, G. Liu, F. Agostinho, F. Sevegnani & C. M. V. B. Almeida. (15 January 2023). A resilient and sustainable world: Contributions from cleaner production, circular economy, eco-innovation, responsible consumption, and cleaner waste systems. *Journal of Cleaner Production* (Volume 384). [Elsevier Ltd.]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135465>
- [14] J. Ashwin Baliga, Vaibhav Chawla, Vijaya Sunder M, L.S. Ganesh & Bharadhwaj Sivakumaran.(2021).Service Failure and Recovery in B2B Markets – A Morphological Analysis. *Journal of Business Research*. Volume(131). pp.763-781. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.025>
- [15] Mattas, K., Raptou, E., Alayidi, A., Yener, G., & Baourakis, G. (2023). Assessing the Interlinkage between Biodiversity and Diet through the Mediterranean Diet Case. In *Advances in Nutrition* (Vol. 14, Issue 3, pp. 570–582). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.advnut.2023.03.011>
- [16] K. Pelletier, C. Wood, J. Calautit, & Y. Wu (2023). The viability of double-skin façade systems in the 21st century: a systematic review and meta-analysis of the nexus of factors affecting ventilation and thermal performance, and building integration. *Building and Environment*. Volume (228). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109870>
- [17] S. Vickram, S. Manikandan, S.R. Deena, J. Mundike, R. Subbaiya, N. Karmegam, S. Jones, K. Kumar Yadav, S.W. Chang, B. Ravindran, & M. Kumar Awasthi.(2023). Advanced biofuel production, policy and technological implementation of nano-additives for sustainable environmental management – A critical review. *Bioresource Technology*. Volume (387). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129660>
- [18] N. S. Muhammed, A. O. Gbadamosi, E. Epelle, A. A. Abdulrasheed, B. Haq, S. Patil, D. Al-Shehri, & M. S. Kamal. (2023). Hydrogen production, transportation, utilization, and storage: Recent advances towards sustainable energy. *Journal of Energy Storage*. Volume (73), Part D <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109207>
- [19] Khan, K. S., Bueno Cavanillas, A., & Zamora, J. (2022). Systematic reviews in five steps: I. Framing questions to obtain valid answer. *Medicina de Familia. SEMERGEN*, 48(5), 356–361. <https://doi.org/10.1016/J.SEMERG.2021.12.005>
- [20] Z. Ruihui, Y. Xinmei, Y. HanYang. (2023). Cleaner production and total factor productivity of polluting enterprises. *Journal of Cleaner Production* (Volume 423). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138827>
- [21] Huang, JJ; Zhong, Y; Zhang, YB. (2023). Does Environmental Regulation of Cleaner Production Affect the Position of Enterprises in Global Value Chains? A Quasi-Natural Experiment Based on the Implementation of Cleaner Production. *Journal of Sustainability* (volumen 15). <https://doi.org/10.3390/su151310492>
- [22] M. M. Lopes Junior, C. Aparecida de Mattos & F. Lima. (2024). Toward Cleaner Production by Evaluating Opportunities of Saving Energy in a Short-Cycle Time Flowshop. *Journal of Sustainability* volumen 16). <https://doi.org/10.3390/su16062455>
- [23] S. Ma, Y. Zhang, J. Lv, S. Ren, H. Yang, C. Wang. (2022). Data-driven cleaner production strategy for energy-intensive manufacturing industries: Case studies from Southern and Northern China. *Advanced Engineering Informatics* (Volume 53). [Elsevier Ltd.]. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101684>
- [24] R. Sharma, H. Gupta. (2024). Harmonizing sustainability in industry 5.0 era: Transformative strategies for cleaner production and sustainable competitive advantage. *Journal of Cleaner Production* (Volume 445). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141118>
- [25] Mahelet G. Fikru. (2022). The impact of policies on profit-maximizing rates of reliance on carbon capture for storage versus cleaner production. *Journal of Cleaner Production* (Volume 379, Part 2). [Elsevier Ltd.]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134659>
- [26] C. Xu, H. Yu, S. Zhang, C. Shen, C. Ma, J. Wang, F. Li. (2024). Cleaner production evaluation system for textile industry: An empirical study from LCA perspectives. *Science of The Total Environment* (Volume 913). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169632>
- [27] G. Cardoso de Oliveira Neto, J. M. Ferreira Correia, H. N. Pujol Tucci, A. F. Henriquez Librantz, B. F. Giannetti, C. M. Villas Boas de Almeida. (2022). Sustainable Resilience Degree assessment of the textile industrial by size: Incremental change in cleaner production practices considering circular economy. *Journal of Cleaner Production* (Volume 380, Part 1). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134633>
- [28] X. Yuan, S. Jin & H. Zhang. (2023). Optimal Green Technology Choice for Firms under an Emission Trading Scheme: End-of-Pipe vs. Cleaner Production. *Journals of Sustainability* (Volume 15). <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/23/16311>
- [29] B.F. Giannetti, F. Agostinho, J.J. Cabello Eras, Zhifeng Yang, C.M.V.B. Almeida. (2020). Cleaner production for achieving the sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production* (Volume 271). [Elsevier Ltd.]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122127>
- [30] Sultana, N., Rahman, M. M., Khanam, R., Islam, K. M. Z., & Islam Rayhan, M. R. (2023). Investigating the prospect of cleaner production in informal enterprises: A scientific assessment of environmental burdens and economic efficiency. *Heliyon*, 9(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14583>