

REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA HUELLA DE CARBONO EN LA INDUSTRIA: UN ESTUDIO LEAN GREEN

SYSTEMATIC REVIEW OF THE CARBON FOOTPRINT IN INDUSTRY: A LEAN GREEN STUDY

David Alejandro Canedo Gasca

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
m2403017@itcelaya.edu.mx

Moisés Tapia Esquivias

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
moises.tapia@itcelaya.edu.mx

Recepción: 14/abril/2025

Aceptación: 8/octubre/2025

Resumen

La creciente preocupación por el impacto ambiental de la industria manufacturera ha impulsado la adopción de metodologías que integran la eficiencia operativa con la sostenibilidad. El presente estudio evalúa la implementación de la metodología Lean Green en distintas industrias manufactureras y su impacto en la reducción de la huella de carbono. A través de un análisis comparativo, se identifican retos y beneficios, considerando indicadores como eficiencia energética, reducción de residuos y emisiones de gases de efecto invernadero. Los resultados evidencian el potencial de Lean Green para alinear producción y sostenibilidad, aunque se destacan limitaciones metodológicas y la necesidad de métricas estandarizadas. Este trabajo sistematiza la evidencia reciente sobre Lean Green en la industria, identificando vacíos en la estandarización de indicadores y ofreciendo un marco comparativo que orienta futuras investigaciones.

Palabras Clave: Green Lean, Huella de carbono, Industria, Kaizen.

Abstract

Growing concern about the manufacturing industry's environmental impact has driven the adoption of methodologies that integrate operational efficiency with sustainability. This study evaluates the implementation of the Lean Green method in

various manufacturing industries and its impact on carbon footprint reduction. Through a comparative analysis, challenges and benefits are identified, considering indicators such as energy efficiency, waste reduction, and greenhouse gas emissions. The results demonstrate the potential of Lean Green for linear production and sustainability, although methodological limitations and the need for standardized metrics are highlighted. This paper systematizes recent evidence on Lean Green in the industry, identifying gaps in the standardization of indicators and offering a comparative framework that guides future research.

Keywords: Carbon footprint, Green Lean, Industry, Kaizen.

1. Introducción

La industria manufacturera se encuentra en una encrucijada crítica: debe responder a la demanda global de eficiencia operativa y competitividad económica, al mismo tiempo que enfrenta presiones sin precedentes para reducir su impacto ambiental. Según la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial [ONU DI, 2021], este sector es responsable de aproximadamente el 23% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI), una cifra que subraya su papel central en la crisis climática actual. A esto se suma el reciente informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC, 2023], que alerta sobre la necesidad urgente de limitar el aumento de la temperatura global a 1.5 °C, lo que exige transformaciones profundas en los modelos productivos. Bajo este escenario, metodologías como Lean Green emergen como soluciones prometedoras para conciliar la productividad industrial con la sostenibilidad ambiental, integrando principios de eficiencia operativa y gestión ecológica [Dadhich, 2015].

Estudios recientes confirman esta tendencia, destacando tanto los beneficios como los retos de la integración Lean-Green en la industria [Queiroz et al., 2023] [Ahmed et al., 2022]. El Lean Manufacturing, desarrollado originalmente por Womack y Jones [Womack, 1996], ha sido un pilar en la optimización de procesos al eliminar actividades que no agregan valor, reducir desperdicios y mejorar la calidad. Sin embargo, su enfoque tradicional se ha centrado predominantemente en la

rentabilidad económica, relegando a un segundo plano aspectos ambientales clave, como la reducción de emisiones o el uso sostenible de recursos [King, 2001] [Carvalho, 2017]. Esta limitación ha impulsado la evolución hacia enfoques más integradores, como Lean Green, que busca sinergias entre la filosofía Lean y los objetivos de sostenibilidad. Este paradigma no solo persigue la eficiencia operativa, sino también la minimización de la huella de carbono mediante estrategias como la optimización energética, la gestión circular de residuos y la adopción de tecnologías bajas en emisiones [Verrier, 2014] [Lieder, 2016].

Estudios recientes demuestran que la implementación de Lean Green puede generar beneficios tangibles. Por ejemplo, [Dües, 2013] destacan cómo la aplicación de prácticas Lean en la cadena de suministro reduce hasta un 30% el consumo de energía en sectores como el automotriz, mientras que [Herrmann, 2018] evidencian mejoras del 20 – 25% en la eficiencia de recursos en plantas manufactureras europeas. No obstante, su adopción enfrenta barreras significativas. La resistencia al cambio organizacional, la falta de métricas estandarizadas para evaluar impactos ambientales y los costos asociados a tecnologías verdes son obstáculos recurrentes [Caldera, 2017] [Dadhich, 2015]. Además, existe una diferencia en su aplicación: mientras industrias de alto valor agregado, como la aeronáutica, han avanzado en modelos circulares, sectores como el textil o la construcción aún luchan por integrar estas prácticas [Carvalho, 2017] [ONUDI, 2021]. A pesar de estos avances, la literatura evidencia vacíos críticos. La mayoría de las investigaciones se centran en casos aislados o en sectores específicos, lo que limita la generalización de los resultados [King, 2001] [Dadhich, 2015]. Además, pocos estudios abordan comparativamente cómo factores contextuales, como las regulaciones ambientales o el acceso a financiamiento verde, influyen en la efectividad de Lean Green [Garza-Reyes J. A, 2015] [Lieder, 2016]. Este estudio busca contribuir a cerrar estas brechas mediante un análisis comparativo multifactorial en diversas industrias manufactureras, evaluando no solo la reducción de la huella de carbono medida a través de indicadores como eficiencia energética, gestión de residuos y emisiones de GEI, sino también identificando patrones comunes en barreras y facilitadores de su implementación. En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo evaluar

cómo la implementación del enfoque Lean Green en procesos industriales puede contribuir a la reducción de la huella de carbono, mejorando la sostenibilidad operativa sin comprometer la eficiencia productiva. La investigación se plantea la siguiente pregunta: ¿qué impacto tiene la aplicación de prácticas Lean Green sobre los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en una industria manufacturera? Para responderla, se realiza un análisis centrado en la comparación de diferentes casos de estudio sobre las estrategias Lean Green, lo que permite identificar oportunidades de mejora ambiental dentro del marco de producción esbelta. Esta evaluación cobra especial relevancia debido al creciente interés por modelos industriales que integren criterios ecológicos en sus procesos, fomentando así una industria más responsable con el medio ambiente.

La relevancia de esta investigación trasciende el ámbito académico. Al alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 9 (industria, innovación e infraestructura) y el ODS 12 (producción y consumo responsables) [ONU, 2015], los hallazgos ofrecen un marco práctico para que las empresas prioricen acciones sostenibles sin comprometer su viabilidad económica. Por ejemplo, se discute cómo la integración de herramientas Lean con modelos de economía circular puede reducir costos operativos a largo plazo, al tiempo que se mitiga el riesgo regulatorio asociado a normativas ambientales más estrictas [Lieder, 2016]. Asimismo, se analiza el papel de tecnologías emergentes, como la digitalización de procesos y la inteligencia artificial, en la escalabilidad de Lean Green [Herrmann, 2018].

En síntesis, este trabajo no solo profundiza en el potencial de Lean Green como catalizador de la transición industrial hacia la sostenibilidad, sino que también propone recomendaciones estratégicas para superar sus limitaciones. Al hacerlo, se espera aportar una base sólida para futuras investigaciones y políticas públicas que fomenten sinergias entre la eficiencia operativa y la responsabilidad ambiental.

2. Método

Este estudio se desarrolló a través de un enfoque metodológico cualitativo, basado en una revisión sistemática y análisis comparativo de literatura científica

relevante. El objetivo fue identificar cómo la implementación de la metodología Lean Green ha contribuido a la reducción de la huella de carbono en distintas industrias manufactureras. Para ello, se diseñó un proceso en siete fases, que permitió desde la selección de fuentes hasta la extracción y comparación de hallazgos clave, bajo una lógica de análisis temático.

La primera fase consistió en la definición de términos clave relacionados con el objeto de estudio, con el propósito de orientar la búsqueda bibliográfica. Las palabras seleccionadas fueron: huella de carbono, Kaizen y Green Lean. Estas se combinaron de distintas formas para maximizar la obtención de resultados relevantes en bases de datos académicas.

Con el fin de identificar la evolución y relevancia de los conceptos en la literatura científica, se utilizó la herramienta Google Ngram Viewer, estableciendo un periodo de análisis entre 2003 y 2023. Esto permitió visualizar el comportamiento temporal en el uso de los términos, destacando su progresivo posicionamiento en estudios sobre sostenibilidad industrial. Posteriormente, se realizó la búsqueda de artículos científicos en bases reconocidas por su rigor académico, tales como Scopus, Science Direct, Google Scholar y SciELO. También se consultaron publicaciones de organismos internacionales relacionados con la sostenibilidad y el desarrollo industrial, como la ONUDI o el IPCC. Para garantizar la calidad de la información, se aplicaron criterios de selección. Se incluyeron artículos:

Se priorizó además literatura reciente que incorpora métricas de eficiencia de emisiones y metodologías para calcular la huella de carbono [Chen et al., 2021; Li et al., 2022].

- Publicados en los últimos 10 años (con excepciones justificadas).
- Revisados por pares.
- Con evidencia cuantitativa sobre reducción de emisiones o impacto ambiental.
- Que integraran enfoques Lean y sostenibilidad.

Se excluyeron estudios sin datos empíricos, con metodologías poco detalladas, o centrados exclusivamente en Lean sin perspectiva ambiental.

Cada artículo fue analizado de forma detallada. Se extrajo información sobre la metodología empleada, los indicadores ambientales utilizados (como reducción de GEI, eficiencia energética o residuos), los resultados obtenidos, y las barreras u oportunidades en la implementación del enfoque Lean Green. Los datos se sistematizaron en una base estructurada para facilitar su comparación. En esta fase, se compararon los estudios seleccionados con base en cuatro criterios:

- Efectividad en la reducción de huella de carbono.
- Sectores industriales con mejores resultados.
- Estrategias más utilizadas (optimización energética, circularidad, digitalización)
- Factores que influyen positiva o negativamente en su adopción.

Este análisis permitió identificar patrones, diferencias contextuales y tendencias comunes entre los casos revisados.

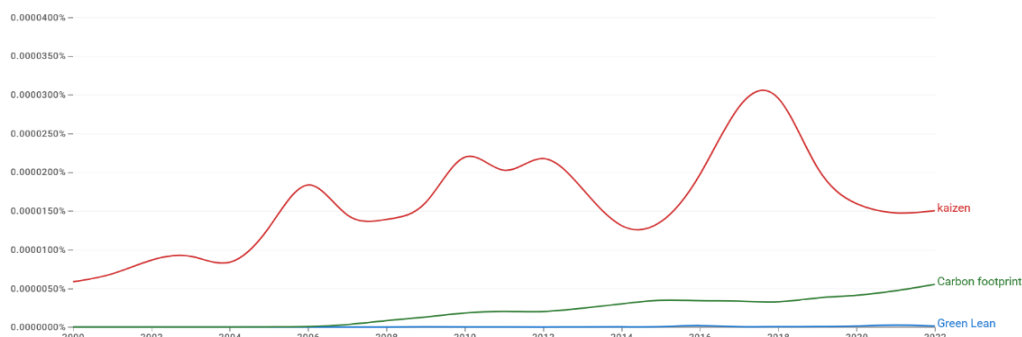
Finalmente, se sintetizaron las coincidencias y divergencias entre los artículos. Se identificaron los factores clave para el éxito del enfoque Lean Green, las limitaciones metodológicas, y las barreras organizacionales más frecuentes. Asimismo, se detectaron áreas de oportunidad para evolucionar la metodología y mejorar su impacto ambiental en diversos contextos industriales.

3. Resultado

En la primera etapa, se analizaron los términos “Huella de carbono”, “Kaizen” y “Green Lean” mediante la herramienta Google Ngram Viewer, con el objetivo de identificar su evolución en la literatura académica entre los años 2000 y 2023. La Figura 1 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** ilustra las tendencias identificadas.

El análisis revela un crecimiento exponencial del término huella de carbono a partir de 2010, en coincidencia con acuerdos globales como el Acuerdo de París (2015) y el auge de políticas públicas sobre sostenibilidad [UNFCCC, 2015] [IPCC, 2023]. Kaizen presenta una trayectoria ascendente moderada, estabilizándose después de

2018, lo cual refleja su consolidación como enfoque de mejora continua con aplicaciones sostenibles [Pampanelli, 2014].



Fuente: elaboración "Google Ngram Viewer"

Figura 1 Frecuencia de búsqueda de términos clave (2000-2023)

En tanto, Green Lean muestra un crecimiento progresivo, aunque incipiente, reflejando el interés emergente por integrar eficiencia operativa con responsabilidad ambiental [Cherrafi, 2016] [Garza-Reyes J. A, 2015]. Este panorama indica un giro global hacia modelos de producción más sostenibles, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible [ONU, 2015] particularmente en lo que respecta al consumo responsable y la innovación industrial. Tras el análisis de tendencias, se definieron las plataformas académicas para la recolección de artículos. La Tabla 1 presenta las bases de datos empleados, seleccionadas por su cobertura y rigor científico. La diversidad de fuentes permitió estudios locales y globales, así como enfoques teóricos y aplicados. De la búsqueda inicial, se eligieron diez estudios clave que cumplieran con los criterios establecidos.

Tabla 1 Bases de datos empleadas

Base de datos	Descripción	Alcance Temático	Años de cobertura
Scopus.	Plataforma multidisciplinaria indexada con revisión por pares. Incluye artículos, conferencias y revisiones sistemáticas.	Ingeniería, Ciencias ambientales, Gestión de Operaciones.	Desde 1996
Google Scholar	Motor de búsqueda académica de acceso abierto. Permite identificar estudios preliminares, tesis y artículos no indexados en otras bases.	Multidisciplinario, con énfasis en aplicaciones prácticas en industrias y sostenibilidad.	Sin límite temporal definido
Science Direct	Editorial líder en ciencias técnicas y ambientales. Ofrece acceso a revistas de alto impacto como Journal of Cleaner Production y Resources, Conversation and Recycling.	Producción Sostenible, Economía Circular, Eficiencia Energética.	Desde 1997

SciELO	Biblioteca electrónica especializada en investigación iberoamericana. Incluye estudios regionales sobre desafíos ambientales en contextos industriales emergentes.	Sostenibilidad Industrial, Políticas Públicas Ambientales, Casos de estudios locales.	Desde 1998
--------	--	---	------------

Fuente: elaboración propia

La Tabla 2 resume sus características, estrategias metodológicas y posicionamiento frente a la efectividad del enfoque Lean Green. Como se aprecia en la Tabla 2, ninguno de los artículos revisados reporta cifras concretas sobre producción de emisiones de GEI o ahorros energéticos, Este hallazgo pone de manifiesto una limitación recurrente en la literatura Lean Green: la falta de métricas estandarizadas y cuantificables que permiten realizar comparaciones entre sectores e investigaciones. Más que mostrar resultados numéricos, la tabla evidencia un vacío metodológico en la investigación actual.

Tabla 2 Artículos científicos.

Cita	Tipo de industria	Estrategia Lean-Green	GEI reducidos [CO _{2eq}]	Ahorros de energéticos (%)	El autor está de acuerdo o no en la metodología
[Dües, 2013]	Cadena de suministro	Integración de Lean como catalizador para prácticas Green.	No cuantificado	No cuantificado	Si
[Garza-Reyes J A, 2015]	Manufactura	Propuesta de Green Lean Six Sigma (integración con DMAIC).	No cuantificado	No cuantificado	Si
[Sawhney, 2010]	General	Metodología En-Lean [conexión de indicadores Lean y ambientales).	No cuantificado	No cuantificado	No
[Verrier, 2014]	Varias industrias	Marco Lean-Green House con indicadores duales.	No cuantificado	No cuantificado	Si
[Garza-Reyes J A-L, 2014]	Logística	Estrategias Green-Lean en cadenas globales.	No cuantificado	No cuantificado	No
[Cherrafi, 2016]	Manufactura	Modelo Gemba-Kaizen con enfoque en reducción de recursos.	No cuantificado	No cuantificado	Si
[Benders, 2004]	Automotriz (Toyota)	Enfoque en Lean (sin componente Green explícito)	No cuantificado	No cuantificado	No
[Ng, 2015]	Manufactura	Métrica de eficiencia "Carbon-Value".	No cuantificado	No cuantificado	Si
[Elemure, 2023]	Manufactura	Integración de Lean con energías renovables.	No cuantificado	No cuantificado	No
[Rothenberg, 2001]	Manufactura (automotriz)	Integración Lean-Green para desempeño ambiental.	No cuantificado	No cuantificado	No

Fuente: elaboración propia

Este hallazgo coincide con estudios recientes en la industria automotriz, donde la

implementación Lean-Green enfrenta barreras en la cadena de suministro y en la conversión de materiales [Sunmola et al., 2023]:

- Resistencia organizacional al cambio.
- Ausencia de métricas estandarizadas.
- Costos de implementación de tecnologías sostenibles.

Oportunidades destacadas:

- Sinergia entre eficiencia operativa y sostenibilidad.
- Modelos híbridos como Green Lean Six Sigma.
- Potencial de la economía circular y digitalización.

Los estudios mostraron diferencias relevantes según su enfoque sectorial, metodología y grado de integración Lean-Green. Se observaron patrones comunes como el predominio de aplicaciones en manufactura, uso de herramientas como DMAIC, y propuestas innovadoras como la métrica “Carbon-Value” [Ng, 2015].

Autores como [Verrier, 2014] y [Cherrafi, 2016] respaldan firmemente la integración Lean-Green, mientras que otros, como [Sawhney, 2010] y [Rothenberg, 2001], se muestran escépticos debido a limitaciones en la evidencia empírica.

Coincidencias:

- Alta coincidencia en el potencial de Lean Green como herramienta dual (operativa y ambiental).
- Necesidad urgente de desarrollar métricas estándar para evaluar resultados.
- Relevancia de factores organizacionales para su implementación.

Divergencias:

- Diferencias en la postura metodológica: desde enfoques optimistas hasta críticos.
- Sectorialización de la efectividad: manufactura, logística y automotriz.
- Grado de cuantificación: algunos artículos proponen métricas, pero no las aplican empíricamente.

4. Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la metodología Lean Green posee un potencial significativo para contribuir a la reducción de la huella de carbono en la industria manufacturera, al integrar la eficiencia operativa con la sostenibilidad ambiental. No obstante, su implementación enfrenta obstáculos estructurales y metodológicos que condicionan su efectividad en contextos reales. A continuación, se contrastan estos hallazgos con la literatura revisada, identificando implicaciones prácticas y líneas de investigación futuras.

Los estudios analizados coinciden en que Lean Green puede funcionar como catalizador en la disminución de emisiones de GEI, especialmente mediante la eliminación de desperdicios y la mejora de la eficiencia energética [Cherrafi, 2016] [Dües, 2013].

Sin embargo, como se observó en la Tabla 2, la mayoría de los trabajos carecen de datos cuantificables que respalden empíricamente su impacto ambiental. Esta ausencia de métricas estandarizadas constituye la principal limitación para validar el enfoque Lean Green, ya que impide comparaciones objetivas entre industrias y dificulta la generación de políticas basadas en evidencia. Este vacío entre la teoría y la práctica ha sido señalado por autores como [Sawhney, 2010], quien advierte que la ausencia de enfoques sistemáticos dificulta la medición real de los beneficios ambientales. Aunque propuestas como la métrica Carbon–Value [Ng, 2015] apuntan a resolver esta limitación, su uso práctico aún no ha sido documentado extensamente, lo que restringe su aplicabilidad en la toma de decisiones industriales.

La discusión actual en la literatura también advierte que prácticas como Just-in-Time pueden incrementar emisiones si no se acompañan de estrategias verdes, lo que resalta la necesidad de indicadores integrados [Queiroz et al., 2023].

Entre los principales obstáculos identificados se encuentran la resistencia al cambio organizacional, la falta de estandarización de indicadores ambientales y los altos costos asociados a tecnologías verdes [Garza-Reyes J A-L, 2014] [Rothenberg, 2001]. Estos factores concuerdan con las observaciones de [Caldera, 2017], quien

destaca la importancia de la cultura corporativa y las herramientas de medición para el éxito de las estrategias sostenibles.

Adicionalmente, como muestra [Elemure, 2023], la transición hacia modelos productivos circulares requiere de políticas públicas e incentivos económicos que faciliten su adopción, especialmente en pequeñas y medianas empresas. La efectividad de Lean Green no es homogénea entre sectores. Mientras que en la manufactura destacan aplicaciones exitosas como Green Lean Six Sigma [Garza-Reyes J A, 2015] y Gemba-Kaizen [Cherrafi, 2016], en áreas como logística y automotriz los resultados son menos concluyentes debido a la complejidad de sus cadenas de suministro y la falta de indicadores integrados [UNFCCC, 2015]. Esta variabilidad sectorial refuerza la necesidad de adaptar las metodologías al contexto específico, tal como propone [Verrier, 2014], quien argumenta que los modelos de evaluación deben considerar simultáneamente aspectos operativos y ambientales. Una limitación central de este estudio radica en la naturaleza cualitativa de la mayoría de los artículos revisados, muchos de los cuales se basan en modelos teóricos sin reportes cuantitativos sobre emisiones de GEI [Sawhney, 2010] [Benders, 2004]. Esto dificulta la generalización de resultados y limita el diseño de políticas basadas en evidencia.

Además, aunque en la introducción se mencionó el potencial de tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) o la inteligencia artificial (IA) para optimizar Lean Green [Herrmann, 2018], esta dimensión no fue abordada en profundidad en los estudios seleccionados, por tanto, se identifica una oportunidad valiosa para investigar cómo estas tecnologías pueden contribuir a la medición y mejora del desempeño ambiental-industrial. Aun así, casos como la aplicación de Heijunka en Toyota demuestran la vigencia y efectividad de herramientas Lean en entornos sostenibles [Sulaiman Nur Yusuf et al., 2024].

Los hallazgos de este análisis ofrecen recomendaciones concretas para las empresas que buscan implementar Lean Green de forma efectiva:

- Capacitación continua del personal, enfocada en sostenibilidad y pensamiento Lean, como estrategia para reducir la resistencia organizacional al cambio [Cherrafi, 2016].

- Adopción de métricas estandarizadas, como la propuesta “Carbon–Value” [Ng, 2015], que permitan cuantificar impactos ambientales de forma sistemática.
- Colaboración intersectorial y benchmarking, promovido por organismos internacionales como la [ONUDI, 2021], para compartir mejores prácticas entre industrias con diferentes niveles de madurez en sostenibilidad.

5. Conclusiones

El presente estudio evidenció que la metodología Lean Green posee un potencial considerable para contribuir a la reducción de la huella de carbono en la industria manufacturera, al combinar la eficiencia operativa del Lean Manufacturing con estrategias de sostenibilidad ambiental. A partir del análisis de literatura científica especializada y comparación de casos relevantes, se identificaron hallazgos clave:

- Sinergia operativa-ambiental: La implementación de Lean Green permite optimizar procesos productivos y, simultáneamente, reducir el impacto ambiental. Se observaron mejoras en eficiencia energética y disminución de residuos, en concordancia con estudios previos que reportan reducciones significativas en el consumo de energía y emisiones de GEI en sectores como la manufactura.
- Limitaciones metodológicas: A pesar de los beneficios teóricos, se identificó una ausencia generalizada de datos cuantitativos que permitan evaluar de forma concluyente la efectividad ambiental de Lean Green. La falta de métricas estandarizadas impide comparar resultados entre sectores e iniciativas.
- Variabilidad sectorial: La eficacia de Lean Green no es uniforme. Mientras sectores como la manufactura muestran avances prometedores mediante la integración de indicadores duales y herramientas como Six Sigma, otros sectores como logística o automotriz enfrentan mayores retos para incorporar prácticas sostenibles de forma estructural.
- Líneas de investigación futuras: Se recomienda profundizar en la cuantificación de impactos ambientales mediante métricas específicas, como la propuesta Carbon–Value. Además, se sugiere explorar el rol de

tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) y la inteligencia artificial (IA), con el fin de robustecer los modelos Lean Green y aumentar su aplicabilidad práctica.

- Este planteamiento es consistente con la agenda investigadora reciente, que enfatiza la necesidad de métricas claras para evaluar eficiencia en emisiones y huella de carbono en la manufactura [Chen et al., 2021; Li et al., 2022].

En síntesis, aunque Lean Green representa una herramienta viable para avanzar hacia una industria más sostenible, su implementación efectiva depende de superar barreras metodológicas, organizacionales y tecnológicas. Este estudio contribuye a sentar las bases para investigaciones futuras y para la toma de decisiones estratégicas en el ámbito industrial, orientadas a reducir la huella de carbono sin comprometer la competitividad operativa.

En conclusión, aunque el enfoque Lean Green demuestre un alto potencial para integrar eficiencia operativa y sostenibilidad, su validación científica se ve restringida por la ausencia de métricas estandarizadas y comparables. Este vacío metodológico no solo limita la capacidad de contrastar resultados entre sectores, sino que también dificulta la formulación de políticas públicas y decisiones empresariales basadas en evidencia. De ahí que una de las líneas de investigación más urgentes consiste en desarrollar y aplicar indicadores cuantitativos confiables que permiten medir de manera uniforme el impacto ambiental de las prácticas Lean Green en la industria.

6. Referencias y Bibliografía

- [1] Ahmed, A., Singh, R., & Kumar, P. (2022). Review application of green manufacturing processes in precision machining of automotive components. *Journal of Cleaner Production*, 365, 132575. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132575>
- [2] Benders, J & (2004) Changes in Toyota Motors' operations management *International Journal of Production Research*, 42[3], 433–444.
- [3] Caldera, H T (2017) Evaluating the enablers and barriers for successful implementation of sustainable business practice in 'lean' SMEs *Journal of Cleaner Production*, 142, 3592-3609.

- [4] Carvalho, H A-M (2017) Lean, agile, resilient and green supply chain management: A review *Journal of Cleaner Production*, 142, 341-362.
- [5] Chen, L., Zhang, X., & Liu, Y. (2021). Assessing and gauging the carbon footprint of manufacturing industries: A review of methods and applications. *Resources, Conservation & Recycling*, 173, 105711. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105711>.
- [6] Cherrafi, A E (2016) The integration of lean manufacturing, Six Sigma and sustainability: A literature review and future research directions for developing a specific model *Journal of Cleaner Production*, 139, 828-846.
- [7] Dadhich, P G (2015) Developing sustainable supply chains in the UK construction industry: A case study *International Journal of Production Economics*, 164, 271-284.
- [8] Dües, C M (2013) Green as the new Lean: How to use Lean practices as a catalyst to greening your supply chain *Journal of Cleaner Production*, 40, 93-100.
- [9] Eccles, R G (2019) The investor revolution *Harvard Business Review*, 97(3), 106-116.
- [10] Elemure, I D (2023) Integration of Lean Green and Sustainability in Manufacturing: A Review on Current State and Future Perspectives *Sustainability*, 15(13), 10261.
- [11] Garza-Reyes, J A (2015) Lean and green – A systematic review of the state of the art literature *Journal of Cleaner Production*, 102, 18-29.
- [12] Garza-Reyes, J A-L (2014) Lean and green – synergies, differences, limitations, and the need for six sigma *APMS 2014, Part II, IFIP AICT*, 439, 71–81.
- [13] Herrmann, C T (2018) Energy oriented simulation of manufacturing systems Concept and application *CIRP Annals*, 57(1), 45-48.
- [14] IPCC (2023) Climate Change 2023: Synthesis Report Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático Suiza: HabitatSeven.

- [15] King, A (2001) Lean and green? An empirical examination of the relationship between lean production and environmental performance *Production and Operations Management*, 10(3), 244-256.
- [16] Kirchherr, J R (2017) Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232.
- [17] Li, Y., Wang, J., & Zhao, H. (2022). Configuration paths of carbon emission efficiency in manufacturing industry: A fsQCA approach. *Sustainability*, 14(16), 10123. <https://doi.org/10.3390/su141610123>.
- [18] Lieder, M & (2016) Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry *Journal of Cleaner Production*, 115, 36-51.
- [19] Nations, U (2015) United Nations Obtenido de Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development: <https://sdgsunorg/2030agenda>.
- [20] Ng, R L (2015) Integrating and implementing Lean and Green practices based on the proposition of Carbon-Vakue Efficiency metric *Journal of Cleaner Production*, 95, 242-255.
- [21] ONU (2015) Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015 Asamblea General , (pág 40).
- [22] ONUDI (2021) Industrial Development Report 2021 Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial Viena.
- [23] Pampanelli, A B (2014) A Lean & Green Model for a production cell *Journal of Cleaner Production*, 85, 19-30.
- [24] Queiroz, M., Pereira, S. C. F., & Lopes de Sousa Jabbour, A. B. (2023). Synergies and trade-offs between lean and green practices: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 389, 136132. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136132>.
- [25] Rothenberg, S P (2001) Lean, green, and the quest for superior environmental performance *Production and Operations Management*, 10(3), 228–243.
- [26] Sachs, J D-T (2019) Six transformations to achieve the sustainable development goals *Nature Sustainability*, 2(9), 805-814.

- [27] Sawhney, R T (2010) En-Lean: A framework to align lean and green manufacturing in the metal cutting sector Knoxville: Inderscience Enterprises Ltd.
- [28] Sulaiman Nur Yusuf, M., Fauzi, D. A., Solehudin, S. A., Hidayat, R., & Prastyo, Y. (2024). Implementing Heijunka improves production time efficiency at PT Toyota. *Review: Journal of Multidisciplinary in Social Sciences*, 1(13), 540–547. <https://lenteranusa.id/>.
- [29] Sunmola, F., Mbafotua, O. R., Salihu-Yusuf, M. L., & Sunmola, H. O. (2023). Lean green practices in automotive components manufacturing. *Procedia Computer Science*, 232, 2001–2008. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.022>.
- [30] UNFCCC (2015). UNFCCC, Paris Agreement. <https://unfcccint/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [31] Verrier, B R (2014) Lean and Green strategy: The Lean and Green House and maturity deployment model *Journal of Cleaner Production*, 116, 150-156.
- [32] Womack, J P (1996) *Lean Thinking: Banish waste and create wealth in your corporation* CDMX: Simon & Schuster.