

Artículo de Investigación

La dualidad de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las cadenas de suministro: una revisión narrativa

The duality of artificial intelligence in supply chain sustainability: a narrative review

Marelby Amado Mateus: Corporación Universitaria de Asturias, Colombia.

Marelby.amado@asturias.edu.co

Fecha de Recepción: 14/05/2024

Fecha de Aceptación: 16/07/2024

Fecha de Publicación: 20/08/2024

Cómo citar el artículo:

Amado Mateus, Marelby. (2024). La dualidad de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las cadenas de suministro: una revisión narrativa [The duality of artificial intelligence in supply chain sustainability: a narrative review]. *European Public & Social Innovation Review*, 9, 1-21. <https://doi.org/10.31637/epsir-2024-552>

Resumen:

Introducción: En la era digital actual, la inteligencia artificial (IA) se posiciona como una herramienta crucial para avanzar hacia cadenas de suministro sostenibles, abordando ineficiencias y reduciendo emisiones de carbono derivadas de la creciente demanda energética. **Metodología:** Se realizó una revisión narrativa de la literatura, evaluando artículos publicados en las bases de datos Scopus y Science Direct entre 2022 y 2024, para capturar los avances recientes del impacto de la IA en la sostenibilidad de las cadenas de suministro. **Resultados:** Los hallazgos subrayan la capacidad de la IA para optimizar procesos logísticos, mejorar la predicción de la demanda y gestionar inventarios de manera eficiente, reduciendo la huella de carbono y optimizando el uso de recursos. **Discusión:** Aunque los beneficios son significativos, la implementación de la IA enfrenta desafíos como el alto consumo energético y la complejidad en la integración de datos. Es esencial considerar las implicaciones éticas y sociales para maximizar los beneficios y minimizar los impactos negativos. **Conclusiones:** La integración de la IA en la gestión de la cadena de suministro representa un avance significativo en sostenibilidad y eficiencia operativa. Se requieren tecnologías más eficientes y políticas que apoyen la adopción de IA sostenible para superar los desafíos y maximizar los beneficios.

Palabras clave: Inteligencia artificial, cadena de suministro, sostenibilidad, huella de carbono, optimización logística, predicción de demanda, gestión de inventarios, eficiencia operativa.

Abstract:

Introduction: In the current digital age, artificial intelligence (AI) is crucial for advancing sustainable supply chains by addressing inefficiencies and reducing carbon emissions from growing energy demand. **Methodology:** A narrative literature review evaluated articles in Scopus and Science Direct databases from 2022 to 2024 to capture recent advancements in AI's impact on supply chain sustainability. **Results:** Findings highlight AI's ability to optimize logistics processes, improve demand forecasting, and efficiently manage inventories, reducing carbon footprint and enhancing resource use. **Discussions:** Despite significant benefits, AI implementation faces challenges such as high energy consumption and data integration complexity. Ethical and social implications must be considered to maximize benefits and minimize negative impacts. **Conclusions:** Integrating AI into supply chain management represents a significant advancement in sustainability and operational efficiency. More efficient technologies and policies supporting sustainable AI adoption are needed to overcome challenges and maximize benefits.

Keywords: Artificial intelligence, supply chain, sustainability, carbon footprint, logistics optimization, demand forecasting, inventory management, operational efficiency.

1. Introducción

En la era digital actual, la inteligencia artificial (IA) se posiciona como una herramienta crucial para avanzar hacia cadenas de suministro sostenibles, abordando ineficiencias logísticas y reduciendo emisiones de carbono derivadas de la demanda energética industrial. Se proyecta que el mercado global de gestión de la huella de carbono alcanzará los 30.8 mil millones de dólares para 2028, impulsado por iniciativas gubernamentales (Markets y Markets, 2023). La adopción de tecnologías de IA puede mejorar significativamente la eficiencia operativa y reducir emisiones en sectores como transporte, energía y manufactura (Gow, 2023). Sin embargo, la implementación de soluciones sostenibles enfrenta desafíos, como el alto costo inicial y la dificultad en la medición de emisiones indirectas. Este estudio evalúa el impacto dual de la IA en la sostenibilidad, reconociendo tanto su capacidad para optimizar la eficiencia y reducir emisiones como las preocupaciones sobre su consumo energético.

El panorama de la implementación de la Inteligencia Artificial (IA) en la gestión de la cadena de suministro ha mostrado una serie de beneficios significativos que pueden contribuir a mejorar la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental (Ding *et al.*, 2023). Estos beneficios incluyen la optimización de procesos (Gaur *et al.*, 2023), la predicción precisa de la demanda y la gestión eficiente de la energía, entre otros (Bains *et al.*, 2024). Uno de los impactos positivos más destacados de la IA es la optimización de rutas y modos de transporte. La capacidad de la IA para analizar grandes cantidades de datos permite identificar las rutas más eficientes y sostenibles, reduciendo así las emisiones de carbono. De igual forma, la optimización no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también minimiza el impacto ambiental (Gbako *et al.*, 2024). Además, la IA puede predecir con mayor precisión la demanda de productos, lo que ayuda a minimizar el exceso de inventario y reducir el desperdicio de recursos en la cadena de suministro (Abate *et al.*, 2023).

Otro beneficio notable es la gestión de la energía en almacenes y centros de distribución (Gbako *et al.*, 2024). La IA permite optimizar el uso de energía controlando de manera inteligente la iluminación, calefacción y refrigeración, disminuyendo así el consumo de energía (Qi *et al.*, 2023). También se destaca el papel de la IA en la optimización del rendimiento de equipos industriales, como las calderas, mediante la selección adecuada de modelos y la utilización de datos representativos (Nemitallah *et al.*, 2023). Incluso, la IA puede ayudar a las empresas a cumplir con los estándares voluntarios y obligatorios relacionados con la

reducción de emisiones de carbono (Akter *et al.*, 2024). Este enfoque no solo mejora la sostenibilidad de las operaciones logísticas, sino que también promueve una gestión más inteligente y eficiente de los recursos energéticos.

A pesar de sus beneficios, la implementación de IA enfrenta desafíos como el alto consumo energético y la necesidad de inversiones iniciales considerables, especialmente en países emergentes (Qi *et al.*, 2023; Abate *et al.*, 2023). La fragmentación de la cadena de suministro, con múltiples proveedores dispersos geográficamente, incrementa la complejidad operativa y puede generar ineficiencias en la coordinación y gestión (Timmer *et al.*, 2021; Colon *et al.*, 2021). Además, las limitaciones financieras y de recursos son obstáculos significativos para las pequeñas y medianas empresas (SMEs) que buscan implementar prácticas sostenibles. La falta de financiamiento, personal capacitado, apoyo gubernamental y tecnología adecuada limita su capacidad para avanzar hacia la neutralidad de carbono y mejorar su sostenibilidad y competitividad (Qi *et al.*, 2023).

Asimismo, la complejidad de los sistemas de control de emisiones presenta un desafío significativo. La disponibilidad y fiabilidad de los datos son cruciales para establecer sistemas efectivos de IA, pero la calidad y precisión de estos datos a menudo son insuficientes (Fabri *et al.*, 2024). Esto, junto con la necesidad de validez metodológica en la selección y aplicación de modelos de IA, complica la implementación efectiva de soluciones tecnológicas para reducir emisiones (Nemitallah *et al.*, 2023). Las limitaciones en el desarrollo de modelos predictivos y la falta de análisis de heterogeneidad en la industria dificultan la comprensión completa de los desafíos específicos en diferentes sectores. Además, la falta de investigación profunda sobre la relación entre la conservación de energía y la reducción de emisiones de carbono es un obstáculo importante para la sostenibilidad (Zhou *et al.*, 2024). La resistencia al cambio y la falta de adopción de tecnologías sostenibles dentro de las organizaciones también dificultan la implementación de prácticas más eficientes y responsables (Herold y Marzantowicz, 2023).

En esta dualidad de enfoques, se plantea una investigación que busca examinar el impacto de la IA en la reducción de la huella de carbono en las cadenas de suministro, identificar los avances de la IA que contribuyen a cadenas de suministro más sostenibles y analizar los mecanismos de medición del impacto ambiental de la IA. Siguiendo la metodología de revisiones narrativas propuesta por Green *et al.* (2006), se revisaron meticulosamente 34 artículos publicados desde 2022 en las áreas de gestión empresarial y contabilidad, extraídos de las bases de datos *Scopus* y *Science Direct*. Esta selección se realizó con el propósito de capturar los avances más recientes en el impacto de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las cadenas de suministro, teniendo en cuenta que revisiones anteriores ya han compilado datos de años previos. La síntesis de estos hallazgos permitió abordar de manera exhaustiva los objetivos de esta investigación, ofreciendo una perspectiva actualizada sobre cómo la IA está redefiniendo las prácticas de sostenibilidad en el sector empresarial.

1.2. Inteligencia Artificial (IA)

La inteligencia artificial (IA) se define como la capacidad de las máquinas para imitar la inteligencia humana y realizar tareas que normalmente requieren intervención humana, como el aprendizaje, la resolución de problemas, el reconocimiento de patrones y la toma de decisiones (Gbakoet *et al.*, 2024; Abate *et al.*, 2023). La IA es una tecnología multifacética con características clave que incluyen la capacidad de aprendizaje automático, la adaptabilidad, la automatización de tareas, el procesamiento del lenguaje natural y la visión por computadora (Abate *et al.*, 2023; Qi *et al.*, 2023). El concepto de IA ha evolucionado significativamente desde sus inicios, cuando John McCarthy la describió como "la ciencia y la ingeniería de hacer máquinas inteligentes" (Dhiman *et al.*, 2024). Hoy en día, la IA abarca una amplia gama de

aplicaciones en diversos campos, incluyendo el transporte, la salud, la manufactura y la logística (Gaur *et al.*, 2023). Las máquinas de IA pueden aprender de datos y experiencias pasadas, adaptarse a nuevas situaciones, automatizar procesos repetitivos y tomar decisiones basadas en análisis de grandes volúmenes de datos (Nemitallah *et al.*, 2023).

La IA se distingue por varias características clave que la hacen excepcionalmente útil en diversas aplicaciones industriales y comerciales. Una de las características más destacadas es su capacidad de aprendizaje automático, que permite a los sistemas de IA aprender y mejorar continuamente a partir de datos y experiencias previas sin necesidad de programación explícita (Gbako *et al.*, 2024). Esta capacidad de adaptación es crucial en entornos dinámicos y complejos donde las condiciones cambian rápidamente. Otra característica fundamental de la IA es la automatización de tareas, lo que permite a las máquinas realizar trabajos repetitivos y monótonos con alta precisión y eficiencia. Esta automatización no solo reduce los costos operativos, sino que también libera a los trabajadores humanos para que se concentren en tareas más creativas y estratégicas (Gaur *et al.*, 2023). Además, la IA incluye el procesamiento del lenguaje natural (NLP), que facilita la interacción entre humanos y máquinas mediante el entendimiento y la generación de lenguaje humano. Esto es particularmente útil en aplicaciones como chatbots, asistentes virtuales y análisis de texto.

La visión por computadora es otra característica crítica de la IA, que permite a las máquinas interpretar y comprender imágenes y videos. Esta tecnología se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, desde la detección de defectos en manufactura hasta la vigilancia y la conducción autónoma (Nemitallah *et al.*, 2023). Además, los sistemas de IA están equipados con capacidades de toma de decisiones basadas en datos, utilizando algoritmos avanzados para analizar grandes volúmenes de datos y extraer información valiosa que puede guiar decisiones estratégicas (Dhiman *et al.*, 2024). Estas características clave permiten que la IA no solo optimice la eficiencia operativa y reduzca costos, sino que también abra nuevas posibilidades para innovaciones tecnológicas y mejoras en la sostenibilidad industrial. Por ejemplo, la capacidad de la IA para procesar y analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real puede conducir a decisiones más informadas y oportunas en la gestión de la cadena de suministro, lo que resulta en una reducción significativa de desperdicios y una mejora en la utilización de recursos (Gow, 2023). Además, la automatización de procesos complejos a través de la IA permite a las empresas adaptarse rápidamente a cambios en el mercado y a demandas fluctuantes, lo que es esencial para mantener la competitividad en un entorno global dinámico (Kolasani, 2024).

Sin embargo, la implementación y gestión efectiva de estas tecnologías son esenciales para maximizar sus beneficios y abordar los desafíos asociados, como el consumo energético y la necesidad de inversiones iniciales significativas (Abate *et al.*, 2023; Qi *et al.*, 2023). El alto consumo energético de los sistemas de IA, especialmente durante el entrenamiento de modelos de aprendizaje profundo, puede contrarrestar algunos de los beneficios ambientales que estas tecnologías buscan proporcionar. Según Rostirolla *et al.* (2022), el uso intensivo de energía por parte de centros de datos y servidores de IA es un desafío importante que necesita ser abordado mediante el desarrollo de tecnologías más eficientes y el uso de fuentes de energía renovable. Además, las inversiones iniciales en infraestructura de IA y en la capacitación de personal representan barreras significativas para empresas que no tienen los recursos necesarios para adoptar estas tecnologías (Lemos *et al.*, 2022). Para superar estos obstáculos, es crucial que las políticas gubernamentales y las iniciativas de apoyo empresarial se centren en proporcionar incentivos financieros y recursos educativos para facilitar la adopción de la IA en diversos sectores industriales (Badghish y Soomro, 2024).

3. Metodología

Este estudio utilizó la revisión narrativa de literatura como enfoque metodológico, siguiendo las directrices de Green *et al.* (2006). Esta metodología permite una evaluación exhaustiva y crítica de la literatura sobre el impacto de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las cadenas de suministro, con un enfoque en la huella de carbono y la sostenibilidad ambiental. Según Baker (2016), las revisiones narrativas ofrecen beneficios distintivos, como la flexibilidad y el amplio alcance, permitiendo abordar temas complejos desde múltiples perspectivas e integrando hallazgos de estudios cualitativos, cuantitativos y mixtos. Esta flexibilidad facilita una comprensión holística del tema, explorando diversas facetas y contextos no abordados en revisiones más rígidas. Además, proporcionan una síntesis detallada y crítica del conocimiento existente, contextualizando los hallazgos en un marco teórico y práctico más amplio. Esto ayuda a identificar patrones, tendencias y lagunas en la literatura, sugiriendo nuevas áreas de investigación.

El estudio se enfocó en la revisión de la literatura de los últimos tres años, ya que encontrar las prácticas más recientes y los procesos actuales en el contexto de la cadena de suministro y la sostenibilidad es crucial para enmarcar esta investigación. Los criterios de selección primarios para los artículos se centraron en identificar trabajos que contengan datos y estudios empíricos sobre el impacto de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las cadenas de suministro, específicamente en la reducción de la huella de carbono. Además, se establecieron las palabras clave necesarias para el estudio avanzado basándose en el enfoque mencionado anteriormente. Los tópicos y preguntas que orientaron la investigación son:

1. Impacto de la IA en la Reducción de la Huella de Carbono

- ¿Cuáles son los principales enfoques y tecnologías de IA utilizados para reducir la huella de carbono en las cadenas de suministro?
- ¿Qué estudios han demostrado una reducción efectiva de emisiones de carbono a través de la implementación de IA en las cadenas de suministro?

2. Avances de la IA para Cadenas de Suministro Sostenibles

- ¿Cuáles son los desarrollos recientes en tecnologías de IA que han mejorado la sostenibilidad de las cadenas de suministro?

3. Mecanismos de Medición del Impacto Ambiental de la IA

- ¿Qué metodologías y herramientas se utilizan para medir el impacto ambiental de la IA en las cadenas de suministro?
- ¿Cuáles son los desafíos y limitaciones asociados con la medición del impacto ambiental de la IA?

2.1. Estrategia de Búsqueda

La búsqueda de literatura relevante se realizó en dos bases de datos principales: ScienceDirect y Scopus. La selección de estas bases de datos se debe a que son ampliamente utilizadas para revisiones de literatura en estudios relacionados con la inteligencia artificial y la sostenibilidad en cadenas de suministro, y contienen una gran cantidad de artículos relevantes. Se utilizaron los siguientes códigos booleanos y criterios para realizar las búsquedas. Para ScienceDirect: "artificial intelligence" AND "supplychain" AND "carbonfootprint" AND "environmentalsustainability", se incluyeron artículos publicados en 2024 y algunos de 2023. Los tipos de artículos fueron, artículos de revisión (1), artículos de investigación (30). Las áreas temáticas fueron limitadas a Business, Management and Accounting (31).

Para el caso de Scopus el código booleano fue: "artificial intelligence" AND "supplychain" AND

"carbonfootprint" AND "sustainability". Se incluyeron artículos publicados entre 2022 y 2024 (se consideró ampliar el período temporal dada la baja cantidad de artículos publicados en el año 2024). Se identificaron 7 artículos, de los cuales se excluyeron 4 por ser conferencias, quedando 3 artículos relevantes.

2.2. Criterios de Inclusión y Exclusión

Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
• Artículos publicados en los últimos tres años. • Estudios revisados por pares. • Artículos relacionados con la inteligencia artificial y la sostenibilidad en las cadenas de suministro. • Artículos en las áreas de Business, Management, and Accounting.	• Estudios publicados recientemente (2023 y 2024). • Publicaciones no revisadas por pares (por ejemplo, artículos de conferencias). • Estudios fuera del ámbito de la gestión empresarial y la contabilidad.

2.3. Selección y Evaluación de la Literatura

- Identificación Inicial: La búsqueda inicial en Science Direct resultó en 31 artículos y en Scopus en 7 artículos, de los cuales se seleccionaron 3. Los títulos y resúmenes de estos artículos se revisaron para evaluar su relevancia.
- Filtración Secundaria: Se eliminaron duplicados y artículos que no cumplieran con los criterios de inclusión. Se revisaron los textos completos de los artículos restantes para una evaluación más detallada. Producto de ello se consideraron 34 artículos.
- Evaluación Crítica: Cada artículo se evaluó críticamente considerando la calidad metodológica, la relevancia y la contribución al tema de estudio. Se consideraron aspectos como el diseño del estudio, la muestra, los métodos de análisis y la validez de los resultados.

4. Resultados

En esta sección se abordará de manera crítica las preguntas guía formuladas en esta revisión narrativa de la literatura. Este análisis incluirá una revisión de los principales enfoques y tecnologías utilizados, así como estudios y ejemplos específicos que han demostrado mejoras significativas en la sostenibilidad y reducción de emisiones de carbono:

4.1. Impacto de la IA en la Reducción de la Huella de Carbono

4.1.1. ¿Cuáles son los principales enfoques y tecnologías de IA utilizados para reducir la huella de carbono en las cadenas de suministro?

La inteligencia artificial (IA) se ha utilizado de diversas maneras para reducir la huella de carbono en las cadenas de suministro, aprovechando sus capacidades para optimizar procesos y mejorar la eficiencia operativa. En la **tabla 2** se describen algunos de los principales enfoques y tecnologías identificados en la literatura reciente:

Tabla 2.

Principales Enfoques y Tecnologías de IA Utilizados para Reducir la Huella de Carbono en las Cadenas de Suministro

#	Enfoque	Descripción	Fuente
1	Optimización de Rutas y Modos de Transporte	La IA analiza grandes cantidades de datos para identificar rutas más eficientes y modos de transporte más sostenibles, reduciendo significativamente las emisiones de carbono.	Gbako <i>et al.</i> (2024)
2	Gestión de Inventario y Demanda	Los algoritmos de IA permiten predecir la demanda de productos y optimizar niveles de inventario, reduciendo desperdicios y emisiones asociadas con el exceso de inventario.	Abate <i>et al.</i> (2023); Qiet <i>al.</i> (2023)
3	Eficiencia Energética en Almacenes	La IA optimiza el uso de energía en almacenes y centros de distribución mediante el control inteligente de iluminación, calefacción y refrigeración, reduciendo consumo de energía.	Gaur <i>et al.</i> (2023)
4	Gestión de Flotas y Vehículos Autónomos	Mejora la gestión de flotas optimizando rutas, mantenimiento y rendimiento de vehículos para reducir emisiones de carbono. Los vehículos autónomos también contribuyen a una conducción más eficiente.	Dhiman <i>et al.</i> (2024)
5	Predicción y Planificación	Los modelos de IA predicen la demanda futura, identifican patrones de consumo y optimizan la planificación de la cadena de suministro, reduciendo inventarios excesivos y mejorando eficiencia energética.	Gaur <i>et al.</i> (2023)
6	Diseño de Embalajes Sostenibles	Mediante el análisis de datos y la simulación, la IA ayuda a diseñar embalajes más eficientes y sostenibles, reduciendo residuos y huella de carbono en las operaciones de la cadena de suministro.	Qi <i>et al.</i> (2023)
7	Optimización de la Captura de Carbono	La IA aumenta la eficiencia de la captura de carbono mediante el análisis en tiempo real y la optimización de condiciones operativas, reduciendo significativamente emisiones de gases de efecto invernadero.	Al-Sakkari <i>et al.</i> (2024)
8	Monitorización y Gestión de Emisiones	La IA permite una monitorización precisa de emisiones de carbono a lo largo de la cadena de suministro, proporcionando datos en tiempo real y análisis detallados para identificar áreas de mejora.	Wang <i>et al.</i> (2024)
9	Eficiencia Energética	La IA mejora la eficiencia energética en operaciones de la cadena de suministro al optimizar el uso de recursos, predecir demanda de energía y gestionar procesos de producción y distribución de manera más inteligente.	Dohale <i>et al.</i> (2024)
10	Optimización de Procesos	La IA se utiliza para optimizar procesos logísticos y de transporte en las cadenas de suministro, reduciendo consumo de combustibles fósiles y emisiones de carbono asociadas a estas actividades.	Nemitallah <i>et al.</i> (2023)

Fuente: Elaboración propia (2024).

Además de los enfoques tradicionales, existen varios enfoques emergentes de inteligencia artificial (IA) que están teniendo un impacto significativo en la reducción de la huella de carbono en las cadenas de suministro. Uno de estos es el uso de la IA para el análisis del ciclo de vida (LCA), permitiendo a las empresas evaluar el impacto ambiental de sus productos y procesos de manera integral y precisa, desde la producción hasta el fin de vida, y facilitando decisiones informadas para minimizar las emisiones de carbono (Wang *et al.*, 2024). Otro enfoque innovador es la integración de blockchain con IA, que proporciona un registro

inmutable y transparente de todas las transacciones en la cadena de suministro, mientras la IA analiza estos datos para identificar y mitigar fuentes de emisiones de carbono, asegurando trazabilidad y responsabilidad (Chen *et al.*, 2024).

La IA para la optimización del uso de materiales reciclados está ganando relevancia, ya que algoritmos de IA pueden analizar la calidad y disponibilidad de estos materiales, optimizando su uso en la producción de nuevos productos y reduciendo la necesidad de materiales vírgenes y las emisiones asociadas (Nahar, 2024). Asimismo, la IA aplicada a la predicción y mitigación de riesgos climáticos permite a las empresas predecir eventos climáticos extremos y planificar estrategias de mitigación para minimizar los impactos en la cadena de suministro. Al anticipar y gestionar estos riesgos, las empresas pueden reducir interrupciones operativas y sus emisiones de carbono asociadas (Ding *et al.*, 2024). Estos enfoques emergentes destacan la versatilidad y el potencial de la inteligencia artificial para ofrecer soluciones innovadoras y efectivas en la lucha contra el cambio climático, proporcionando a las empresas herramientas avanzadas para reducir su huella de carbono y promover prácticas más sostenibles en la cadena de suministro.

4.2. ¿Presenta la IA un impacto negativo en la huella de carbono y la gestión de la cadena de suministro?

A pesar de los beneficios significativos que la inteligencia artificial (IA) ofrece para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de las cadenas de suministro, también existen varios impactos negativos asociados con su implementación. Estos impactos pueden contrarrestar algunos de los beneficios esperados y deben ser considerados cuidadosamente para maximizar los resultados positivos y mitigar los efectos adversos.

Alto Consumo Energético: La implementación y operación de sistemas de IA requieren muchos recursos computacionales, lo que se traduce en un alto consumo energético. Según Chen *et al.* (2024), los centros de datos que alojan modelos de IA y realizan análisis en tiempo real consumen cantidades significativas de electricidad, contribuyendo a las emisiones de carbono y al impacto ambiental. Empresas como OpenAI, que desarrolla modelos avanzados como ChatGPT, requieren grandes cantidades de energía para el entrenamiento y la inferencia de sus modelos. En los Estados Unidos, los centros de datos han aumentado significativamente su consumo de electricidad. Por ejemplo, en Kansas City, la demanda energética de un centro de datos y una fábrica de baterías para vehículos eléctricos fue tan alta que la empresa local de servicios públicos retrasó el cierre de una planta de carbón para satisfacer esta demanda adicional (Kishan y Saul, 2024).

Generación de Residuos Electrónicos: La rápida evolución de la tecnología de IA implica la actualización constante de hardware y equipos, lo que genera una gran cantidad de residuos electrónicos. Estos residuos no solo representan un desafío ambiental debido a su difícil gestión y reciclaje, sino que también pueden liberar sustancias tóxicas si no se manejan adecuadamente (Al-Sakkari *et al.*, 2024). Amazon y Google, por ejemplo, están construyendo y renovando continuamente sus instalaciones de centros de datos para alojar infraestructuras de IA más avanzadas, lo que contribuye a un aumento en la generación de residuos electrónicos (Rico, 2024).

Desigualdad en el Acceso a la Tecnología: La implementación de IA en las cadenas de suministro puede acentuar las desigualdades existentes, especialmente en regiones y empresas con menos recursos. Las pequeñas y medianas empresas (PYMEs) y los países en desarrollo pueden tener dificultades para acceder a la tecnología y a los beneficios que esta ofrece, perpetuando las disparidades económicas y tecnológicas (Ding *et al.*, 2024). Un ejemplo es la

diferencia en la adopción de IA entre empresas tecnológicas de Silicon Valley y PYMEs en países en desarrollo, donde las primeras tienen acceso a tecnologías de punta y las segundas no (Ding *et al.*, 2024).

Dependencia de Recursos No Renovables: Muchos de los componentes utilizados en la fabricación de hardware para IA, como semiconductores y baterías, dependen de recursos no renovables. La extracción y procesamiento de estos materiales pueden tener un impacto significativo en el medio ambiente y contribuir a la degradación de ecosistemas naturales (Maghsoudi *et al.*, 2023). Empresas como Nvidia, que producen GPUs para IA, dependen en gran medida de estos recursos, lo que aumenta la huella de carbono asociada con su fabricación (L, 2024).

Complejidad en la Gestión de Datos: La gestión y análisis de grandes volúmenes de datos necesarios para el funcionamiento de sistemas de IA pueden presentar desafíos en términos de privacidad, seguridad y gobernanza. La implementación de IA puede requerir infraestructuras robustas y políticas estrictas para asegurar que los datos se manejen de manera ética y segura (Nahar, 2024). Empresas como Google y Meta enfrentan dificultades para gestionar de manera ética y segura los datos masivos que recolectan y procesan, lo que puede llevar a problemas de seguridad y privacidad (Foy, 2023).

4.3. Avances de la IA para Cadenas de Suministro Sostenibles

4.3.1. ¿Cuáles son los desarrollos recientes en tecnologías de IA que han mejorado la sostenibilidad de las cadenas de suministro?

Digitalización y tecnologías de la información: La digitalización y el uso de tecnologías como la IA, el Internet de las cosas (IoT) y sistemas de información en tiempo real mejoran la visibilidad y trazabilidad de productos, optimizando operaciones para reducir el desperdicio y mejorar la eficiencia (Gbako *et al.*, 2024). Walmart utiliza sensores IoT para optimizar operaciones logísticas y reducir el desperdicio (Juárez, 2024). Unilever implementa IA y blockchain para garantizar prácticas sostenibles y optimizar procesos logísticos (Law, 2024). IBM integra IA, IoT y blockchain para mejorar la gestión de la cadena de suministro, optimizando inventarios y reduciendo el consumo de energía y emisiones de carbono (IBM, 2024). Siemens emplea estas tecnologías para aumentar la eficiencia operativa y sostenibilidad en fabricación y distribución (Siemens, 2023). Estos ejemplos demuestran cómo la integración de tecnologías avanzadas puede crear cadenas de suministro más eficientes y sostenibles, reduciendo el impacto ambiental.

Optimización de recursos y reducción de emisiones: La optimización de recursos y la reducción de emisiones mediante una mejor gestión y uso eficiente de los recursos, la implementación de tecnologías para disminuir las emisiones de CO₂, y la automatización de tareas son estrategias clave para reducir el impacto ambiental (Abate *et al.*, 2023). Google y Nokia han implementado IA con este propósito. Google ha utilizado IA desarrollada por Deep Mind para optimizar el consumo de energía en sus centros de datos, mejorando la eficiencia energética en un 35% y reduciendo significativamente las emisiones de carbono y los costos operativos (Matias, 2023; World Economic Forum, 2021). Nokia ha empleado el software de gestión energética impulsado por IA, Foresight Optima DC+™ de QiO Technologies, logrando una reducción del 19-29% en el consumo de energía en sus redes de telecomunicaciones, disminuyendo emisiones de carbono y costos operativos sin comprometer la calidad del servicio (Peszt, 2023; WWT, 2023).

Integración de tecnologías emergentes y análisis de Big Data: La integración de tecnologías

emergentes como la IA y blockchain optimiza la gestión de la cadena de suministro, reduce el desperdicio y mejora la trazabilidad. El análisis de Big Data permite identificar patrones, predecir demandas y optimizar operaciones (Qi *et al.*, 2023). HAVI, una empresa de gestión de la cadena de suministro, emplea IA y análisis predictivo para optimizar la planificación, el abastecimiento y la gestión de datos, digitalizando sus operaciones y mejorando la resiliencia y sostenibilidad de sus cadenas de suministro. La integración de blockchain en sus procesos ha mejorado la transparencia y trazabilidad, reduciendo significativamente el desperdicio y aumentando la eficiencia operativa (Gray, 2022). De manera similar, Covariant, una empresa de tecnología robótica, utiliza la combinación de IA y blockchain para mejorar sus operaciones logísticas. Sus robots autónomos, equipados con tecnología de aprendizaje automático, mejoran la eficiencia y precisión en la gestión de inventarios y la manipulación de materiales, ofreciendo soluciones más rápidas y fiables en la cadena de suministro, lo que contribuye a la reducción del desperdicio y al aumento de la sostenibilidad (Covariant, n.d.; Robotics 24/7 Staff, 2023).

Métodos MCDM-ML para la neutralidad de carbono: La integración de técnicas de Aprendizaje Automático (ML) con Métodos de Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM) permite modelar la neutralidad de carbono, priorizando determinantes críticos y utilizando redes bayesianas para predecir el CarbonNeutralityIndex (CNI) (Dohaleet *et al.*, 2024). Hewlett Packard (HP) ha implementado estos métodos avanzados para alcanzar la neutralidad de carbono en su cadena de suministro, utilizando ML y MCDM para predecir su CNI y gestionar eficientemente sus emisiones directas e indirectas, facilitando el logro de sus objetivos de sostenibilidad (Hewlett Packard, 2024). De manera similar, Allbirds, una empresa de calzado sostenible, aplica ML y MCDM para reducir su huella de carbono. Utilizando redes bayesianas, Allbirds modela y predice el impacto de diversas decisiones en su CNI, lo que les permite implementar prácticas de sostenibilidad efectivas, posicionándolos como líderes en la moda sostenible (Allbirds, 2022; Dohaleet *et al.*, 2024).

Optimización de la cadena de suministro y gestión de la energía: La IA optimiza la cadena de suministro, gestiona eficientemente el consumo de energía y mejora las rutas de transporte, reduciendo las emisiones de carbono (Gaur *et al.*, 2023). UPS, con su sistema ORION (On-Road Integrated Optimization and Navigation), analiza datos diarios para optimizar rutas de entrega, ahorrando más de 10 millones de galones de combustible y reduciendo más de 100,000 toneladas métricas de emisiones de carbono anualmente (Conrad, 2024). PepsiCo utiliza algoritmos de aprendizaje automático para predecir la demanda y optimizar la producción, minimizando el desperdicio y reduciendo el consumo de energía en almacenamiento y transporte. Además, emplea IA para monitorear sus equipos de fabricación en tiempo real, predecir fallas y programar mantenimientos, mejorando la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental (Marr, 2019).

Mejora de la eficiencia y reducción de emisiones en procesos industriales: El uso de la IA en procesos industriales optimiza el rendimiento de equipos como calderas mediante la selección de modelos adecuados y el uso de datos representativos (Nemitallah *et al.*, 2023). Un ejemplo destacado es ABB, que desarrolló el sistema ABB Ability™ BE Sustainable with Efficiency AI en colaboración con Brain Box AI. Este sistema optimiza el control de los sistemas HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado) en edificios comerciales, utilizando datos existentes para mejorar el rendimiento energético y reducir las emisiones de carbono hasta en un 40%, además de extender la vida útil del equipo hasta en un 50%, mejorando significativamente la eficiencia y la sostenibilidad (ABB, 2022). De manera similar, Sorgenia, una compañía energética, ha implementado IA para transformar su enfoque de mantenimiento, utilizando software de gestión de emisiones de carbono potenciado por IA para anticipar problemas de mantenimiento, optimizar operaciones y minimizar

interrupciones, reduciendo emisiones y consumo de combustible (Kusznir, n.d.).

4.4. Mecanismos de Medición del Impacto Ambiental de la IA

4.4.1. ¿Qué metodologías y herramientas se utilizan para medir el impacto ambiental de la IA en las cadenas de suministro?

La evaluación del impacto ambiental de la inteligencia artificial (IA) en las cadenas de suministro es esencial para garantizar que su implementación contribuya a la sostenibilidad. Diversas metodologías y herramientas se han desarrollado para cuantificar y gestionar este impacto, proporcionando datos críticos que informan decisiones estratégicas. A continuación, se detallan las principales metodologías y herramientas utilizadas en este contexto.

Software Específico de Evaluación Ambiental: El uso de software como Code Carbon, que calcula las emisiones de carbono asociadas con la ejecución de algoritmos en entornos de sistema o nube, permite a las empresas cuantificar y gestionar el impacto ambiental de la IA en tiempo real. Estas herramientas facilitan la adopción de prácticas sostenibles y la reducción de la huella de carbono en las operaciones diarias (Bains *et al.*, 2024).

Análisis de Ciclo de Vida (ACV): El ACV es una metodología clave para evaluar el impacto ambiental de productos, procesos y servicios a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Esta metodología es esencial para medir el impacto de la IA en las cadenas de suministro, permitiendo identificar y cuantificar las emisiones y el consumo de recursos en cada etapa, proporcionando una visión integral del impacto ambiental total (Abate *et al.*, 2023; Qi *et al.*, 2023; Al-Sakkari *et al.*, 2024; Dohale *et al.*, 2024; Fernando *et al.*, 2023; Chan y Choi, 2023; Ochoa-Barragán *et al.*, 2024; Hong y Xiao, 2024; Akter *et al.*, 2024).

Modelado Predictivo y Simulación: El uso de modelado predictivo y simulación, incluyendo herramientas de gestión ambiental, es crucial para cuantificar y visualizar el impacto ambiental de la IA en diferentes etapas de la cadena de suministro. Estas herramientas facilitan la toma de decisiones informadas y la optimización de procesos para reducir la huella ambiental (Abate *et al.*, 2023; Qi *et al.*, 2023; Al-Sakkari *et al.*, 2024; Dohale *et al.*, 2024; Ochoa-Barragán *et al.*, 2024; Akter *et al.*, 2024).

Indicadores de Sostenibilidad: Se pueden utilizar indicadores específicos de sostenibilidad ambiental para medir el impacto de la IA en las cadenas de suministro, como las emisiones de carbono, el consumo de energía y la eficiencia en el uso de recursos. Estos indicadores proporcionan métricas cuantitativas para evaluar el desempeño ambiental y facilitar la implementación de prácticas sostenibles (Abate *et al.*, 2023; Al-Sakkari *et al.*, 2024; Lin *et al.*, 2024; Dohale *et al.*, 2024; Ochoa-Barragán *et al.*, 2024; Akter *et al.*, 2024).

Teoría de Sistemas y Algoritmos de IA: El uso de enfoques basados en la teoría de sistemas y algoritmos de IA para comprender la relación entre la IA y las emisiones de carbono es una metodología clave. Estos enfoques permiten analizar la eficiencia energética, el consumo de recursos y la huella de carbono de diferentes algoritmos, identificando aquellos más sostenibles desde el punto de vista ambiental (Gaur *et al.*, 2023).

Métodos Combinados: La combinación de metodologías como el modelo de Análisis Envolvente de Datos Difusos (FUNDEA) y algoritmos de IA como ANN, GEP y AIS se utiliza para medir y evaluar el impacto ambiental de la IA en las cadenas de suministro. Estos métodos permiten calcular la eficiencia ambiental y mitigar las emisiones de CO₂.

(Amirteimoori *et al.*, 2023). De igual forma, La implementación de inteligencia artificial y aprendizaje automático en la tecnología CCUS (Carbon capture, utilization and sequestration) presenta una oportunidad para optimizar su cadena de valor (Al-Sakkari *et al.*, 2024).

Modelo para reducir emociones de CO2: La propuesta de Delanoë *et al.* (2023) ofrece una evaluación integral que abarca todo el ciclo de vida del modelo. La metodología se caracteriza por su enfoque bifronte, cuantificando tanto las emisiones de CO2 generadas por el modelo (entrenamiento y uso) como las emisiones ahorradas gracias a su implementación (optimización de procesos). Esta visión holística permite obtener un balance neto del impacto ambiental del modelo, considerando tanto sus beneficios como sus costos.

Metodología de Dinámica de Sistemas: Se utiliza para evaluar el impacto de la innovación basada en IA en el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Esta metodología permite examinar las interacciones complejas y los efectos dinámicos de la IA en la sostenibilidad a nivel global, supera las limitaciones de enfoques estáticos y lineales, y se convierte en una herramienta valiosa para diseñar políticas y estrategias que aprovechen el potencial de la IA para un futuro más sostenible (Nahar, 2024)

Índice integral de inteligencia industrial: La metodología se basa en la construcción de un índice integral de inteligencia industrial que considera tres dimensiones: insumos inteligentes, capacidad de producción inteligente y resultados inteligentes. Mostrando que la IA reduce emisiones a través del avance tecnológico y la optimización de la estructura de producción (Wang *et al.*, 2024).

4.4.2. ¿Cuáles son los desafíos y limitaciones asociados con la medición del impacto ambiental de la IA?

La integración de la inteligencia artificial (IA) en las cadenas de suministro ha mostrado un potencial significativo para mejorar la eficiencia operativa y reducir el impacto ambiental. Sin embargo, medir con precisión este impacto presenta varios desafíos y limitaciones. Abordar estos desafíos es crucial para desarrollar metodologías robustas que permitan una evaluación integral y precisa del impacto ambiental de la IA, promoviendo así prácticas más sostenibles en las operaciones logísticas y de manufactura.

Complejidad de los Sistemas de IA: La IA en las cadenas de suministro implica la integración de múltiples tecnologías y procesos, cada uno con sus propias interacciones y variables, lo que dificulta la evaluación precisa del impacto ambiental. Es necesario considerar tanto los efectos directos como los indirectos de cada componente. La interdependencia de los sistemas tecnológicos crea una red de interacciones complejas que complican la atribución de impactos específicos al uso de la IA (Chen *et al.*, 2024).

Disponibilidad y Calidad de Datos: Para medir con precisión el impacto ambiental de la IA, es crucial disponer de datos detallados y de alta calidad sobre el consumo de recursos, las emisiones de carbono y otros factores ambientales en todas las etapas de la cadena de suministro. La recopilación de estos datos es desafiante debido a la falta de estandarización y la variabilidad en las fuentes de datos. La ausencia de datos fiables limita la capacidad para realizar evaluaciones exhaustivas y precisas, dificultando la comparación de resultados entre diferentes estudios (Qi *et al.*, 2023).

Falta de Estándares y Métricas Uniformes: Sin un marco de referencia común, es difícil comparar resultados entre diferentes estudios y evaluar la efectividad de las estrategias de sostenibilidad. La creación de métricas estandarizadas permitiría una evaluación más

coherente y facilitaría la integración de prácticas sostenibles en operaciones logísticas y de manufactura, además de mejorar la comunicación de resultados a las partes interesadas (Dhiman *et al.*, 2024; Bains *et al.*, 2024).

Interpretación de Resultados: Interpretar los resultados de las evaluaciones del impacto ambiental de la IA es complejo y requiere un análisis detallado y contextualizado. Identificar causas y efectos específicos dentro de un sistema complejo puede ser subjetivo y depender de los métodos utilizados. Además, es crucial seleccionar indicadores relevantes y compararlos con escenarios de referencia adecuados para obtener conclusiones precisas. Este proceso puede estar influenciado por sesgos y limitaciones metodológicas (Amirteimoori *et al.*, 2023).

Consideraciones Éticas y Sociales: Al medir el impacto ambiental de la IA, es crucial considerar los aspectos éticos y sociales, ya que la implementación de estas tecnologías puede afectar a comunidades, trabajadores y otras partes interesadas. Esto añade complejidad a la evaluación, requiriendo un equilibrio entre beneficios ambientales e impactos sociales y éticos. La falta de un enfoque holístico que integre estas dimensiones puede resultar en evaluaciones incompletas (Qi *et al.*, 2023).

Efectos a Largo Plazo: Evaluar los efectos a largo plazo de la implementación de tecnologías de IA es un desafío significativo, ya que los impactos ambientales pueden acumularse y manifestarse con el tiempo. Muchas metodologías actuales no están diseñadas para prever estos efectos futuros, lo que limita la capacidad de las empresas para planificar y desarrollar estrategias de sostenibilidad a largo plazo. Es crucial desarrollar enfoques que capturen estos efectos prolongados para proporcionar una visión completa del impacto ambiental de la IA (Nahar, 2024).

5. Discusión

La integración de la inteligencia artificial (IA) en la gestión de la cadena de suministro presenta una dualidad de impactos, con beneficios significativos y desafíos críticos que deben ser gestionados cuidadosamente. Esta revisión narrativa de literatura ha permitido identificar tanto los aspectos positivos como negativos de la implementación de IA, proporcionando una comprensión holística y equilibrada de su papel en la sostenibilidad de las cadenas de suministro. Uno de los beneficios más destacados de la IA es su capacidad para optimizar procesos operativos, reducir el consumo de energía y minimizar las emisiones de carbono. La aplicación de algoritmos de IA en la optimización de rutas de transporte, gestión de inventarios y eficiencia energética en almacenes ha demostrado reducir significativamente la huella de carbono de las operaciones logísticas.

Estudios como los de Gbako *et al.* (2024) y Gaur *et al.* (2023) demuestran que las tecnologías de IA mejoran la eficiencia operativa y contribuyen a la sostenibilidad ambiental. Por ejemplo, UPS ha utilizado algoritmos de IA para optimizar sus rutas de entrega, ahorrando más de 10 millones de galones de combustible y reduciendo sus emisiones de carbono en más de 100,000 toneladas métricas anualmente, mejorando tanto la eficiencia del servicio como sus objetivos de sostenibilidad (Conrad, 2024). De manera similar, H&M ha implementado IA para optimizar sus rutas de transporte, proyectando reducir sus emisiones de transporte logístico de 10 millones a 6.5 millones de toneladas métricas de CO₂e para 2030, considerando la eficiencia del combustible, patrones de tráfico y condiciones en tiempo real (Capgemini Research Institute, 2024).

Adicionalmente, la IA facilita una gestión más precisa y predictiva de la demanda, evitando el exceso de inventario y el desperdicio de recursos, lo cual es crucial en manufactura y

distribución. Abate *et al.* (2023) y Qi *et al.* (2023) destacan cómo estas tecnologías apoyan una toma de decisiones más eficiente, promoviendo cadenas de suministro más sostenibles y resilientes. Por ejemplo, Domino's Pizza UK & Ireland ha implementado IA y análisis en Dynamics 365 para automatizar la predicción de demanda, mejorando la precisión de sus previsiones y optimizando niveles de inventario, reduciendo el desperdicio y mejorando la satisfacción del cliente (Batra, 2023). Zara también utiliza IA para anticipar tendencias de consumo y gestionar inventarios, ajustando rápidamente su oferta de productos según la demanda actual y reduciendo el exceso de stock y desperdicio, mejorando tanto la eficiencia operativa como la sostenibilidad (Zaytsev, 2023).

Tal como se observó, la implementación de IA enfrenta desafíos significativos, como el alto consumo energético asociado con el entrenamiento y operación de modelos de IA, que puede contrarrestar los beneficios ambientales (Ammanath, 2024). Chen *et al.* (2024) y Qi *et al.* (2023) destacan la necesidad de desarrollar tecnologías de IA más eficientes y sostenibles y de políticas que fomenten el uso de energías renovables en los centros de datos. Pasquini (2024) subraya que el crecimiento en el tamaño y consumo de energía de los modelos de lenguaje grande (LLM) no se detendrá pronto, proponiendo enfoques más eficientes como la parametrización eficiente y el meta-aprendizaje para reducir el consumo energético sin perder capacidades funcionales. La competencia por desarrollar modelos de IA más grandes y complejos aumenta significativamente el consumo de recursos y la huella de carbono de estas tecnologías, lo que resulta en un uso ineficiente de recursos. Crawford (2024) sugiere mejorar la eficiencia de los parámetros y utilizar técnicas de meta-aprendizaje para reducir el consumo de energía sin comprometer el rendimiento.

También es importante notar que, este estudio presenta limitaciones que deben considerarse para interpretar adecuadamente los resultados y su aplicabilidad. La revisión narrativa de literatura, aunque exhaustiva, puede estar sujeta a sesgos de selección debido a su naturaleza no sistemática, lo que puede haber excluido estudios relevantes fuera de las bases de datos consultadas o que no cumplieran ciertos criterios predefinidos. Además, la dependencia de fuentes secundarias puede limitar la profundidad de la interpretación de los datos, ya que los estudios revisados pueden tener sus propias limitaciones metodológicas y sesgos, afectando la validez y generalización de los hallazgos. La revisión de literatura no permite la verificación directa de datos empíricos ni la evaluación detallada de la calidad de los estudios incluidos, lo que podría impactar la robustez de las conclusiones. Futuras investigaciones podrían beneficiarse de un enfoque más sistemático, reduciendo el riesgo de sesgos de selección y mejorando la validez de los hallazgos.

6. Conclusiones

La integración de la IA en la gestión de la cadena de suministro ha demostrado avances significativos en sostenibilidad y eficiencia operativa. Este estudio sintetiza hallazgos clave de sus beneficios como de sus impactos y desafíos. También destaca la importancia de considerar las implicaciones éticas y sociales de la IA en las cadenas de suministro. Las decisiones sobre la adopción de tecnologías de IA deben equilibrar los beneficios ambientales con los posibles impactos sociales, garantizando así una evaluación integral y sostenible. La incorporación de un enfoque holístico es crucial para maximizar los beneficios de la IA y minimizar sus impactos negativos. Asimismo, es importante precisar que tanto la IA como la sostenibilidad son campos en rápida evolución que presentan múltiples oportunidades para futuras investigaciones.

Como, por ejemplo, la exploración de la aplicación de tecnologías de IA en la toma de decisiones del transporte por vías navegables interiores, enfocándose en mejorar la eficiencia

operativa, seguridad y sostenibilidad. Además, es recomendable investigar la adopción de blockchain para garantizar transparencia y seguridad en las transacciones del sector, integrando estos avances con factores de sostenibilidad y medio ambiente (Gbako *et al.*, 2024). Paralelamente, los aspectos éticos y la sostenibilidad económica de la IA en las cadenas de suministro requieren una mayor exploración. Es esencial investigar cómo garantizar la equidad, transparencia y responsabilidad en el uso de algoritmos de IA, así como entender el impacto social de la automatización impulsada por la IA, abordando temas como el desplazamiento laboral y la equidad en el acceso a oportunidades laborales. También se propone investigar los beneficios financieros y la rentabilidad asociados con la adopción de tecnologías sostenibles basadas en IA (Abate *et al.*, 2023).

Otra línea de investigación relevante es la optimización de estrategias de distribución en el comercio electrónico B2C mediante la aplicación de IA y blockchain, mejorando la eficiencia logística y reduciendo costos, especialmente en PYMEs de economías emergentes. También se recomienda investigar el modelado de dinámicas del sistema de la cadena de suministro sostenible utilizando enfoques de pensamiento sistémico (Qi *et al.*, 2023). Además, es crucial evaluar el impacto de la implementación de prácticas de neutralidad de carbono en la industria textil y sus cadenas de suministro. Estudios que analicen los beneficios económicos, ambientales y sociales de estas prácticas pueden proporcionar una comprensión más profunda de su efectividad y viabilidad a largo plazo, y desarrollar herramientas de evaluación y medición específicas para la neutralidad de carbono en esta industria (Dohale *et al.*, 2024).

En definitiva, la IA se presenta como una herramienta transformadora con el potencial de revolucionar las cadenas de suministro y conducir las hacia un futuro más sostenible. Abordar los desafíos de manera integral, integrando la innovación verde, la ética y la responsabilidad social, será crucial para maximizar los beneficios de la IA y construir un futuro más verde y resiliente para todos.

7. Referencias

- Abate, Y., Ukpabi, C. y Karjaluoto, H. (2023). *AI -Sustainability Nexus: A Framework for Future Research*. 23.
- ABB. (2022, June 29). ABB Smart Building's AI-Powered SaaS Increases Energy Efficiency, Reduces Carbon Footprint. ABB. <https://bit.ly/4cHjp1R>
- Akter, S., Babu, M. M., Hani, U., Sultana, S., Bandara, R. y Grant, D. (2024). Unleashing the power of artificial intelligence for climate action in industrial markets. *Industrial Marketing Management*, 117, 92-113. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2023.12.011>
- Allbirds. (2022). *Allbirds 2022 Flight Status. Sustainability Report*. <https://www.allbirds.com/pages/sustainable-practices#reality>
- Al-Sakkari, E. G., Ragab, A., Dagdougui, H., Boffito, D. C. y Amazouz, M. (2024). Carbon capture, utilization and sequestration systems design and operation optimization: Assessment and perspectives of artificial intelligence opportunities. *Science of The Total Environment*, 917, 170085. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170085>

- Amirteimoori, A., Allahviranloo, T., Zadmirzaei, M. y Hasanzadeh, F. (2023). On the environmental performance analysis: A combined fuzzy data envelopment analysis and artificial intelligence algorithms. *Expert Systems with Applications*, 224, 119953. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119953>
- Ammanath, B. (2024). *How to manage AI's energy demand – Today and in the future*. World Economic Forum. <https://bit.ly/3XV4IUr>
- Badghish, S. y Soomro, Y. A. (2024). Artificial Intelligence Adoption by SMEs to Achieve Sustainable Business Performance: Application of Technology–Organization–Environment Framework. *Sustainability*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/su16051864>
- Bains, A., Sridhar, K., Dhull, S. B., Chawla, P., Sharma, M., Sarangi, P. K. y Gupta, V. K. (2024). Circular bioeconomy in carbon footprint components of nonthermal processing technologies towards sustainable food system: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 149, 104520. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104520>
- Baker, J. D. (2016). The Purpose, Process, and Methods of Writing a Literature Review. *AORN Journal*, 103(3), 265-269. <https://doi.org/10.1016/j.aorn.2016.01.016>
- Batra, N. (2023, November 1). *Domino's Pizza: Ensuring customer satisfaction with data-driven demand planning in Microsoft Dynamics 365*. Microsoft Customers Stories. <https://bit.ly/3xTo6Xc>
- Boualam, M. (2021, March 28). *How IoT, AI, and Blockchain Can Create a Sustainable Supply Chain* | SCM Globe. <https://bit.ly/4fduRnN>
- Capgemini Research Institute. (2024). Data: A powerful ally in tackling Scope 3 emissions-reduction targets. Capgemini USA. <https://bit.ly/3xTXUf0>
- Chan, H.-L. y Choi, T.-M. (2023). Logistics management for the future: The IJLRA framework. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 1-19. <https://doi.org/10.1080/13675567.2023.2286352>
- Chen, P., Chu, Z. y Zhao, M. (2024). The Road to corporate sustainability: The importance of artificial intelligence. *Technology in Society*, 76, 102440. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102440>
- Colon, C., Brännström, Å., Rovenskaya, E. y Dieckmann, U. (2021). Fragmentation of production amplifies systemic risks from extreme events in supply-chain networks. *PLOS ONE*, 15(12), e0244196. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244196>
- Conrad, R. (2024, March 1). *AI in Logistics: Driving Sustainability and Efficiency in Supply Chains*. RTS Labs. <https://rtslabs.com/ai-logistics-sustainability-efficiency/>

- Covariant. (n.d.). *Otto Group strengthens its logistics network with hundreds of AI-powered robots*. <https://bit.ly/3xTo81g>
- Crawford, K. (2024). Generative AI's environmental costs are soaring – And mostly secret. *Nature*, 626(8000), 693–693. <https://doi.org/10.1038/d41586-024-00478-x>
- Delanoë, P., Tchuenté, D. y Colin, G. (2023). Method and evaluations of the effective gain of artificial intelligence models for reducing CO2 emissions. *Journal of Environmental Management*, 331, 117261. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117261>
- Dhiman, R., Miteff, S., Wang, Y., Ma, S.-C., Amirikas, R. y Fabian, B. (2024). Artificial Intelligence and Sustainability – A Review. *Analytics*, 3(1), 140-164. <https://doi.org/10.3390/analytics3010008>
- Ding, T., Li, J., Shi, X., Li, X. y Chen, Y. (2023). Is artificial intelligence associated with carbon emissions reduction? Case of China. *Resources Policy*, 85, 103892. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103892>
- Dohale, V., Kamble, S., Ambilkar, P., Gold, S., y Belhadi, A. (2024). An integrated MCDM-ML approach for predicting the carbon neutrality index in manufacturing supply chains. *Technological Forecasting and Social Change*, 201, 123243. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123243>
- Fabri, L., Weissflog, J., y Wenninger, S. (2024). Unraveling the complexity: A taxonomy for characterizing and structuring smart energy services in the building sector. *Journal of Cleaner Production*, 461, 142522. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142522>
- Fernando, Y., Al-Madani, M. H. M. y Shaharudin, M. S. (2023). COVID-19 and global supply chain risks mitigation: Systematic review using a scientometric technique. *Journal of Science and Technology Policy Management*, ahead-of-print(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/JSTPM-01-2022-0013>
- Foy, K. (2023, October 5). *New tools are available to help reduce the energy that AI models devour*. MIT News | Massachusetts Institute of Technology. <https://bit.ly/3Ll0qhG>
- Gaur, L., Afaq, A., Arora, G. K. y Khan, N. (2023). Artificial intelligence for carbon emissions using system of systems theory. *Ecological Informatics*, 76, 102165. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102165>
- Gbako, S., Paraskevadakis, D., Ren, J., Wang, J. y Radmilovic, Z. (2024). A systematic literature review of technological developments and challenges for inland waterways freight transport in intermodal supply chain management. *Benchmarking: An International Journal*, ahead-of-print(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/BIJ-03-2023-0164>

- Gow, G. (2020, September 3). *Environmental Sustainability And #AI* [LinkedIn]. <https://bit.ly/3Y3qo0z>
- Gray, C. (2022, May 5). HAVI: driving savings in the supply chain with AI. *AAI Magazine, Data&Analytics*. <https://bit.ly/3xISIAh>
- Green, B., Johnson, C. y Adams, A. (2006). Writing Narrative Literature Reviews for Peer-Reviewed Journals: Secrets of the Trade. *Journal of Chiropractic Medicine*, 5, 101-117. [https://doi.org/10.1016/S0899-3467\(07\)60142-6](https://doi.org/10.1016/S0899-3467(07)60142-6)
- Herold, D. M. y Marzantowicz, Ł. (2023). Supply chain responses to global disruptions and its ripple effects: An institutional complexity perspective. *Operations Management Research*, 16(4), 2213-2224. <https://doi.org/10.1007/s12063-023-00404-w>
- Hewlett Packard. (2024). *Climate Action*. <https://bit.ly/4f12LMo>
- Hong, Z. y Xiao, K. (2024). Digital economy structuring for sustainable development: The role of blockchain and artificial intelligence in improving supply chain and reducing negative environmental impacts. *Scientific Reports*, 14(1), 3912. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53760-3>
- IBM. (2024, June 24). *IBM Supply Chain Intelligence Suite*. <https://ibm.co/4cBVIYQ>
- Juárez, C. (2024, May 17). Nueva IA de Walmart reduce desperdicio de perecederos y textiles en anaqueles. *The Logistics World*. <https://bit.ly/3LnUkwZ>
- Kishan, S. y Saul, J. (2024, January 25). AI Needs So Much Power That Old Coal Plants Are Sticking Around. *Bloomberg.Com*. <https://bloom.bg/4eVEUNT>
- Kolasani, S. (2024). Revolutionizing manufacturing, making it more efficient, flexible, and intelligent with Industry 4.0 innovations. *International Journal of Sustainable Development Through AI, ML and IoT*, 3(1), 1-17. <https://ijsdai.com/index.php/IJSDAI/article/view/46>
- Kusznir, F. (n.d.). *How AI is accelerating the Energy Transition and carbon negative*. GE Digital. <https://invent.ge/4cAelfP>
- Lynn, J. (2024, May 28). Nvidia's Record Earnings Overshadow New Standard in Chip Energy Efficiency. *Carbon Credits*. <https://bit.ly/4csZrI5>
- Law, M. (2024, January 22). *How Unilever Uses AI & Digital Solutions in its Operations*. Technology Magazine. <https://bit.ly/4f2iD0U>

- Lemos, S. I. C., Ferreira, F. A. F., Zopounidis, C., Galariotis, E. y Ferreira, N. C. M. Q. F. (2022). Artificial intelligence and change management in small and medium-sized enterprises: An analysis of dynamics within adaptation initiatives. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-05159-4>
- Lin, J., Zeng, Y., Wu, S. y Luo, X. (Robert). (2024). How does artificial intelligence affect the environmental performance of organizations? The role of green innovation and green culture. *Information & Management*, 61(2), 103924. <https://doi.org/10.1016/j.im.2024.103924>
- Maghsoudi, M., Shokouhyar, S., Ataei, A., Ahmadi, S. y Shokoohyar, S. (2023). Co-authorship network analysis of AI applications in sustainable supply chains: Key players and themes. *Journal of Cleaner Production*, 422, 138472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138472>
- Markets and Markets. (2023). *Carbon Footprint Management Market Growth Drivers & Opportunities*. <https://bit.ly/3zGYFbZ>
- Marr, B. (2019, April 8). *The Fascinating Ways PepsiCo Uses Artificial Intelligence And Machine Learning To Deliver Success*. Forbes. <https://bit.ly/4cCJu2b>
- Matias, Y. (2023, October 10). *Project Green Light's work to reduce urban emissions using AI*. Google. <https://bit.ly/3xWI709>
- Nahar, S. (2024). Modeling the effects of artificial intelligence (AI)-based innovation on sustainable development goals (SDGs): Applying a system dynamics perspective in a cross-country setting. *Technological Forecasting and Social Change*, 201, 123203. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.123203>
- Nemitallah, M. A., Nabhan, M. A., Alowaifeer, M., Haeruman, A., Alzahrani, F., Habib, M. A., Elshafei, M., Abouheaf, M. I., Aliyu, M. y Alfarraj, M. (2023). Artificial intelligence for control and optimization of boilers' performance and emissions: A review. *Journal of Cleaner Production*, 417, 138109. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138109>
- Ochoa-Barragán, R., Serrano-Arévalo, T. I., Pulido-Ocegueda, J. C., Cerda-Flores, S. C., Ramírez-Márquez, C., Nápoles-Rivera, F. y Ponce-Ortega, J. M. (2024). Sustainable lime production in Michoacan Mexico: An optimal and equitable approach with machine learning. *Journal of Cleaner Production*, 442, 141017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141017>
- Pasquini, N. (2024, March 20). How to Reduce AI's Energy Consumption. *Harvard Magazine, Science & Technology*. <https://www.harvardmagazine.com/node/85960>
- Pesz, B. (2023, June 12). *Optimizing energy efficiency with AI-powered energy management software* | Nokia. <https://nokia.ly/3VY5kWJ>

- Qi, B., Shen, Y. y Xu, T. (2023). An artificial-intelligence-enabled sustainable supply chain model for B2C E-commerce business in the international trade. *Technological Forecasting and Social Change*, 191, 122491. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122491>
- Rico, A. (2024, May 7). Inversiones de las tecnológicas como Apple, Google y Amazon en inteligencia artificial. *Diario La República*. <https://bit.ly/3LlbkUp>
- Robotics 24/7 Staff. (2023, May 10). *Otto Group Works With Covariant to Apply AI Robotics to Its Logistics Network*. Robotics 24/7. <https://bit.ly/4bEG51m>
- Siemens. (2023). *Sustainability report* [Report]. Siemens. <https://bit.ly/4f1NPNI>
- Timmer, M. P., Los, B., Stehrer, R. y de Vries, G. J. (2021). Correction to: Supply Chain Fragmentation and the Global Trade Elasticity: A New Accounting Framework. *IMF Economic Review*, 69(4), 681–681. <https://doi.org/10.1057/s41308-021-00139-3>
- Verma, S. (2019, November 19). *How blockchain and IoT is making supply chain smarter*. IBM Blog. <https://ibm.co/3zMyCju>
- Wang, Q., Zhang, F., Li, R. y Sun, J. (2024). Does artificial intelligence promote energy transition and curb carbon emissions? The role of trade openness. *Journal of Cleaner Production*, 447, 141298. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141298>
- World Economic Forum. (2021, April 1). *4 steps to using AI in an environmentally responsible way*. World Economic Forum. <https://bit.ly/4eZkYK4>
- World Wide Technology WWT. (2023, May 26). *Using AI to Reduce Energy Consumption, Cost and Carbon Emissions in Data Centers*. ATC Insight. <https://bit.ly/3VZklaI>
- Zaytsev, A. (2023, September 23). *Case Study: Zara's Comprehensive Approach to AI and Supply Chain Management*. AIX | AI Expert Network. <https://bit.ly/4bL2IBk>
- Zhou, W., Zhang, Y. y Li, X. (2024). Artificial intelligence, green technological progress, energy conservation, and carbon emission reduction in China: An examination based on dynamic spatial Durbin modeling. *Journal of Cleaner Production*, 446, 141142. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141142>

CONTRIBUCIONES DE AUTORES/AS, FINANCIACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

Financiación: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Agradecimientos: Mi más sincero agradecimiento a Alfredo Guzmán, director de investigaciones de la Corporación Universitaria de Asturias, por su invaluable apoyo y guía durante la realización de este estudio. Su conocimiento y experiencia han sido fundamentales para el desarrollo y la ejecución de esta investigación. Asimismo, agradezco a la Corporación Universitaria de Asturias por proporcionar los recursos y el entorno necesario para llevar a cabo este trabajo.

Conflicto de intereses: No hay conflictos.

AUTOR:

Marelby Amado Mateus

Corporación Universitaria de Asturias.

Doctora en Ciencias de la Dirección por la Universidad del Rosario, con una destacada carrera en la educación superior como docente, investigadora y asesora en marketing y gestión. Actualmente, es tutora de tesis doctorales en la Universidad de la Salle y docente investigadora en la Corporación Universitaria de Asturias. Ha coordinado el Laboratorio de Neuromarketing y liderados procesos de autoevaluación y acreditación de alta calidad. Posee amplia experiencia en desarrollo curricular e innovación pedagógica. Ha publicado diversos artículos en revistas científicas y participado en numerosos eventos académicos internacionales. Su trabajo se centra en la reputación universitaria, el valor percibido y la experiencia del cliente.

marelby.amado@asturias.edu.co

Índice H: 4

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-2653-1251>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=9bp67I0AAAAJ&hl=es>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Marelby-Amado>

Academia.edu: <https://independent.academia.edu/MarelbyAmadoMateus?nbs=user>