



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales
ICADE

La contribución de la Inteligencia Artificial al desarrollo de la sostenibilidad empresarial

Autor: Alina Julia Horn
Director: María Reyes Calderón Cuadrado

MADRID | Junio 2025

Contenido

Lista de abreviaturas.....	iii
Lista de tablas.....	iv
Abstract and Keywords	v
Introducción	1
Metodología	2
1 Tipos de AI y sus habilidades	3
2 Sostenibilidad y sus indicadores	6
2.1 Sostenibilidad.....	6
2.2 Sostenibilidad empresarial	6
2.3 Indicadores de sostenibilidad	7
2.4 Sostenibilidad de AI.....	8
3 AI como herramienta a la sostenibilidad.....	10
3.1 Gestión eficiente de la energía	11
3.2 Gestión eficiente de los materiales y economía circular	15
3.3 Gestión eficiente de agua	17
3.4 Gestión eficiente de la cadena del suministro y del transporte	18
4 El uso de AI en la realidad empresarial.....	21
4.1 Uso de AI en PYMES vs grandes empresas	21
4.2 Uso de AI en países de desarrollo vs países desarrollados	25
4.3 Uso de AI por sector económico	28
Conclusiones	33
Declaración del Uso de Herramientas de Inteligencia Artificial Generativa.....	34
Declaración sobre el Trabajo Científico.....	35
Lista de referencias.....	36

Lista de abreviaturas

AGI.....	Artificial General Intelligence
AI.....	Artificial Intelligence / Inteligencia Artificial
ANI.....	Artificial Narrow Intelligence
ASI.....	Artificial Super Intelligence
EE.UU.....	Estados Unidos
ESG.....	environmental, social and corporate governance / Ambiental, social y de gobernanza
IBM.....	International Business Machines Corporation
IoT.....	Internet of Things / Internet de las cosas
ML.....	Machine Learning
NLP.....	Natural Language Processing / procesamiento del lenguaje natural
PIB.....	Producto Interior Bruto
PYMES.....	Pequeñas y medianas empresas
UNCTAD.....	United Nations Trade and Development
UPS.....	United Parcel Service
XAI.....	Explainable Artificial Intelligence

Lista de tablas

Tabla 1 - Indicadores de sostenibilidad.....	7
Tabla 2 - AI y Eficiencia de la energía.....	12
Tabla 3 - Aplicaciones de AI en la agricultura.....	29

Resumen y palabras clave

En un contexto marcado por la crisis climática y la transformación digital, esta investigación examina cómo la Inteligencia Artificial (AI) puede contribuir al desarrollo de la sostenibilidad empresarial. A pesar de sus posibles impactos medioambientales, la AI ofrece soluciones innovadoras para una gestión más eficiente de recursos como la energía, los materiales, el agua y las cadenas de suministro. El objetivo del trabajo es analizar en qué medida y a través de qué mecanismos específicos la AI puede apoyar a las empresas en alcanzar sus objetivos medioambientales. El enfoque metodológico se basa en una revisión bibliográfica cualitativa, utilizando fuentes académicas, institucionales y sectoriales relevantes. Los resultados muestran que la AI tiene un potencial considerable para optimizar procesos, reducir emisiones y fomentar modelos empresariales sostenibles, aunque también plantea desafíos en cuanto a su propio impacto ecológico. Se concluye que, si se aplica de forma consciente y estratégica, la AI puede ser una herramienta clave para impulsar la sostenibilidad en distintos sectores económicos.

Inteligencia Artificial, sostenibilidad empresarial, eficiencia de recursos, economía circular, tecnología verde

Abstract and Keywords

In the context of the climate crisis and accelerating digital transformation, this thesis explores how Artificial Intelligence (AI) can contribute to the development of corporate sustainability. Despite its own environmental footprint, AI offers innovative solutions for more efficient management of key resources such as energy, materials, water, and supply chains. The aim of this study is to analyze how and to what extent AI can support companies in achieving their environmental goals. A qualitative literature review methodology was applied, drawing from academic, institutional, and industry sources. The findings suggest that AI holds significant potential to optimize processes, reduce emissions, and promote sustainable business models, while also raising concerns about its own ecological impact. The study concludes that, when implemented consciously and strategically, AI can serve as a crucial enabler of sustainability across various economic sectors.

Artificial Intelligence, corporate sustainability, resource efficiency, circular economy, green technology

Introducción

En la era de la Cuarta Revolución Industrial, la Inteligencia Artificial (AI) es cada vez más reconocida como una fuerza altamente transformadora. El Foro Económico Mundial (2018) afirma que esperan que la AI permee todas las industrias y tenga una influencia cada vez mayor en nuestra vida cotidiana. Jiang et al. (2022) subrayan más aún que la AI se considera un factor clave en la transformación de las estructuras sociales y económicas.

A la vista del mayor reto al que se enfrenta la humanidad hoy en día – el cambio climático –, el poder transformador de la AI podría desempeñar un papel crucial para hacer frente a esta crisis.

Especialmente las emisiones de dióxido de carbono resultantes de la producción industrial plantean un problema (Chen et al., 2023). Según Chen et al. (2023), las grandes emisiones de dióxido de carbono se deben principalmente a la dependencia generalizada de los combustibles fósiles en los procesos de fabricación. Por lo tanto, una medida crucial para mitigar estas emisiones es mejorar la eficiencia energética, desarrollar fuentes de energía verdes y promover la conservación de la energía en la producción industrial y las actividades económicas (Chen et al., 2023).

Para mejorar la eficiencia energética, Srivastava et al. (2023) destacan que es necesario hacer frente a las fluctuaciones energéticas y minimizar las emisiones nocivas. Para conseguir minimizar las emisiones nocivas, Srivastava et al. (2023) hace énfasis en la transición a fuentes de energía renovables como parte esencial de las estrategias para mitigar el cambio climático. Para gestionar las fluctuaciones energéticas, proponen utilizar la AI para controlar continuamente las variaciones de los indicadores energéticos. Adicionalmente, la AI puede ayudar a identificar los factores más significativos que contribuyen a las emisiones nocivas, permitiendo intervenciones más específicas y eficaces (Srivastava et al., 2023). El enfoque de Srivastava et al. (2023) es solo una de las muchas formas en que la AI puede impulsar el desarrollo de la sostenibilidad en la economía.

Este trabajo trata de analizar si la AI puede ayudar y cómo al desarrollo de la sostenibilidad empresarial. Concretamente, pretendemos llevar a cabo un análisis algunas soluciones innovadoras de automatización y de uso de AI que permiten cumplir estas expectativas.

Metodología

Este trabajo se basa en una revisión bibliográfica cualitativa como método de investigación principal. El objetivo era resumir los conocimientos académicos y los datos estadísticos existentes sobre los temas examinados. Para ello, fueron identificadas, seleccionadas y analizadas sistemáticamente publicaciones académicas, informes de tendencias, documentos políticos y bases de datos estadísticos de interés. La investigación se centró en artículos de revistas revisadas por expertos, informes institucionales y publicaciones de la industria que aportan conocimientos sobre sostenibilidad, inteligencia artificial y aplicaciones específicas del sector.

Las fuentes fueron obtenidas a través de bases de datos académicas como Google Scholar, EBSCO y Statista, utilizando combinaciones de palabras clave relevantes para cada sección temática. Se hizo especial énfasis en garantizar la credibilidad, relevancia y actualidad de los materiales consultados.

1 Tipos de AI y sus habilidades

Tipos de AI

Existen muchas categorizaciones y clasificaciones diferentes de la AI. La más común es la clasificación basada en las habilidades (IBM Data and AI Team, 2023).

Tipos de AI basados en habilidades:

1. Artificial Narrow AI / Weak AI / ANI
2. General AI / Strong AI / AGI
3. Super AI / Superintelligence / ASI

Todos los tipos de AI que se utilizan hoy en día son Artificial Narrow Intelligence (ANI), cualquier otro tipo es sólo teórico (IBM Data and AI Team, 2023; Naveen Joshi, 2019; Canals & Heukamp, 2020). La ANI está entrenada para realizar una única tarea o un conjunto limitado de tareas (IBM Data and AI Team, 2023) en un dominio de aplicación específico (Canals & Heukamp, 2020). No puede actuar fuera de este conjunto de tareas. Ejemplos de Narrow AI son Siri de Apple, Alexa de Amazon y ChatGPT de OpenAI (IBM Data and AI Team, 2023). Pueden ser capaces de «aprender» después de su implementación, pero sólo dentro de su gama y dominio, no tienen la capacidad de aprender nuevas tareas o de aplicar sus tareas a otros campos (Canals & Heukamp, 2020).

En la actualidad no existe ningún sistema AGI desarrollado y se debate si lo habrá algún día (Canals & Heukamp, 2020). A diferencia de la ANI, la AGI no se limita a un dominio de aplicación, sino que puede aprender tareas fuera de él, así como aplicar sus aprendizajes a otros dominios, de forma similar a un ser humano (IBM Data and AI Team, 2023; Naveen Joshi, 2019; Canals & Heukamp, 2020).

Al igual que la AGI, la ASI solo existe como teoría en la actualidad. Si alguna vez se realiza, sería capaz de pensar, razonar, aprender, emitir juicios y poseer capacidades cognitivas que replicarían e incluso superarían la inteligencia humana (IBM Data and AI Team, 2023; Naveen Joshi, 2019).

Habilidades de AI hoy en día

1. Expert systems / sistemas expertos

Casi todos los sistemas de AI se clasifican como sistemas expertos (Smith y Eckroth, 2017). Estos sistemas solo tienen conocimientos específicos del dominio y de la tarea para resolver problemas concretos (Smith y Eckroth, 2017).

2. Robotics / robótica

La robótica se utiliza principalmente para realizar tareas físicas, rutinarias y repetitivas, como el procesamiento de materiales, el ensamblaje y las inspecciones de calidad ((Raj & Seamans, 2019; IBM Data and AI Team, 2023). Algunos ejemplos notables incluyen aplicaciones en el sector de la salud, la agricultura y productos de consumo como el iRobot Roomba (IBM Data and AI Team, 2023).

3. Computer vision / perception / visión informática o artificial

La visión artificial permite a las máquinas interpretar y analizar el mundo visual, lo que les permite identificar y clasificar objetos dentro de imágenes y secuencias de vídeo ((Pannu, 2015; IBM Data and AI Team, 2023). Entre las aplicaciones comunes se incluyen el reconocimiento de imágenes, la detección de objetos, el reconocimiento facial y la obtención de imágenes basadas en contenido (IBM Data and AI Team, 2023). Esta tecnología es especialmente importante para los casos de uso en los que los sistemas de AI interactúan con el mundo físico y navegan por él, como los coches autoconducidos y los robots de almacén ((Pannu, 2015; IBM Data and AI Team, 2023).

4. Machine learning (ML) / Deep learning / Neural networks

El aprendizaje automático (machine learning) permite optimizar mediante predicciones (Zhou, 2021; IBM, 2023). Empresas como Amazon utilizan el aprendizaje automático para recomendar productos basándose en las actividades previas de los clientes. El aprendizaje automático clásico requiere la intervención humana para identificar tendencias y proporcionar resultados precisos, y se basa en datos estructurados (IBM, 2023; Zhou, 2021). En cambio, el aprendizaje profundo (deep learning) está mucho más automatizado, lo que reduce la necesidad de intervención humana (IBM, 2023). Las redes neuronales (neural networks), que son la base del aprendizaje profundo, imitan la señalización de las neuronas en el cerebro; un ejemplo bien conocido de una red neuronal es el algoritmo de búsqueda de Google (Zhou, 2021; IBM, 2023).

5. Natural language processing (NLP) / procesamiento del lenguaje natural

El procesamiento del lenguaje natural permite a las máquinas «entender» y responder al lenguaje natural, incluida la traducción del lenguaje hablado al escrito y entre diferentes lenguajes naturales (Pannu, 2015). Entre las principales aplicaciones de la NLP se encuentran la comprensión del habla, el procesamiento de la información semántica, la respuesta a preguntas, la obtención de información y la traducción de idiomas (Pannu, 2015).

6. Cognitive Systems & Ayuda a la toma de decisiones

Los sistemas cognitivos y de apoyo a la toma de decisiones utilizan la AI para mejorar la toma de decisiones humana, que a menudo es imperfecta debido a los sesgos y la irracionalidad (Canals y Heukamp, 2020). La AI dentro de sistemas multiagentes puede aumentar la información y la comprensión de individuos o grupos. Un ejemplo es el «IBM cognitive room», que ayuda en la toma de decisiones a la hora de evaluar opciones para fusiones y adquisiciones permitiendo a los grupos interactuar con grandes cantidades de información mediante técnicas de voz, gestos y visualización de datos (Canals y Heukamp, 2020).

7. Modelización, planificación, simulación, previsión

La modelización, la planificación, la simulación y la previsión implican la creación de conjuntos de reglas de transformación para predecir comportamientos y relaciones en el mundo real (Pannu, 2015).

8. Resolución de problemas

La resolución de problemas se refiere a la capacidad de formular un problema en una representación adecuada, planificar su solución y reconocer cuándo se necesita nueva información y cómo obtenerla (Pannu, 2015). Incluye técnicas como la deducción, la resolución interactiva de problemas, la programación automática y la búsqueda heurística (Pannu, 2015).

2 Sostenibilidad y sus indicadores

2.1 Sostenibilidad

La sostenibilidad a menudo se usa como sinónimo de desarrollo sostenible (Meadowcroft, 2019). La Comisión Brundtland (1987) definió el desarrollo sostenible como la capacidad de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas (Comisión Brundtland, 1987). Este concepto destaca la importancia de la viabilidad a largo plazo en las prácticas de desarrollo.

El «Triple Bottom Line framework» de John Elkington (1998) amplía el concepto de sostenibilidad al identificar tres dimensiones clave: económica, social y ambiental (Elkington, 1998). Estos tres pilares trabajan de manera conjunta para garantizar un desarrollo sostenible equilibrado (Elkington, 1998).

Las Naciones Unidas (2024) desarrollaron aún más el concepto de sostenibilidad a través de sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, establecidos en 2015. Estos objetivos buscan abordar los desafíos globales al integrar factores ambientales, sociales y económicos en las agendas de desarrollo (Naciones Unidas, 2024).

Sin embargo, en este trabajo, el enfoque se centrará únicamente en la dimensión ambiental de la sostenibilidad. Según Meadowcroft (2019), la sostenibilidad se asocia a menudo de manera más específica con preocupaciones ambientales, y por lo tanto, para los fines de este análisis, se priorizará la perspectiva ambiental.

2.2 Sostenibilidad empresarial

La sostenibilidad empresarial es un aspecto clave en el contexto actual, especialmente considerando el impacto ambiental generado por las grandes corporaciones. Desde 1988, tan solo 100 empresas han sido responsables de más del 70% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (Riley, 2017). Además, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a nivel mundial han mostrado un aumento constante a lo largo de las décadas, según los datos más recientes (Tiseo, 2024).

Esto pone de relieve la responsabilidad que las empresas tienen no solo con sus accionistas, sino también con la sociedad en general, siendo fundamentales en la adopción de prácticas que promuevan un futuro más sostenible y reduzcan su huella ecológica.

2.3 Indicadores de sostenibilidad

La sostenibilidad abarca diversas dimensiones, cada una con aspectos y medidas específicas. Según el Foro Económico Mundial (2018), existen seis desafíos ambientales críticos: cambio climático, resiliencia ante el clima y desastres, aire limpio, biodiversidad y conservación, seguridad de agua y océanos saludables. Cada uno de estos ámbitos está asociado a numerosos indicadores que permiten medir el progreso y evaluar el impacto de los esfuerzos de sostenibilidad. En la tabla 1, se presentarán ejemplos de indicadores de sostenibilidad relevantes para estos desafíos ambientales.

Tabla 1 - Indicadores de sostenibilidad

<i>Categoría</i>	<i>Indicador</i>
<i>Cambio climático</i>	Emisiones de gases de efecto invernadero, huella de carbono, producción de energía a partir de combustibles fósiles, concentración atmosférica de gases de efecto invernadero, consumo final de energía, millas recorridas por vehículos, cambio en la cubierta de nieve y la profundidad de la nieve, número de refugiados climáticos, migrantes climáticos y personas desplazadas por el cambio climático, récords de temperatura
<i>Resiliencia ante el clima y desastres</i>	Frecuencia de desastres relacionados con el clima, pérdida agrícola directa atribuida a desastres, frecuencia de eventos peligrosos y desastres, pérdida económica directa en el sector de la vivienda atribuida a desastres, número de muertes, personas desaparecidas y personas directamente afectadas por desastres por cada 100,000 habitantes
<i>Aire limpio</i>	Contaminación del aire inducida por el clima (nivel de concentración de ozono troposférico (O3), nivel de concentración de material particulado (PM2.5))
<i>Biodiversidad y conservación</i>	Pérdida agrícola directa atribuida a desastres, área forestal como proporción del área total de tierra, cambio en la cubierta de nieve y la profundidad de la nieve, récords de temperatura, proporción de poblaciones mantenidas dentro de especies, índice de la Lista Roja, índice de hábitat de especies, tasa de propagación de especies exóticas invasoras

<i>Seguridad de agua</i>	Recursos de agua renovables per cápita, calidad del agua, precio al consumidor del agua potable
<i>Océanos saludables</i>	Aumento del nivel del mar, reducción de la cobertura de hielo marino, acidez media del agua marina (pH), proporción de poblaciones de peces dentro de niveles biológicamente sostenibles, aumento del área afectada por el blanqueamiento de corales, número de derrames de petróleo

elaborada por la autora con información basada en datos de: International Monetary Fund, 2025; World Economic Forum, 2018; United Nations Statistics Division, 2023

2.4 Sostenibilidad de AI

Aunque AI tiene mucho que ofrecer en términos de beneficios potenciales para el medio ambiente, es igualmente importante examinar críticamente los inconvenientes medioambientales de AI, ya que estos impactos no deben ser ignorados. Esta sección explorará los aspectos negativos del impacto medioambiental de la AI, sobre todo en términos de consumo de recursos y emisiones de carbono.

Mientras que algunos desarrolladores de AI, como Meta, están empezando a declarar sus emisiones durante el proceso de desarrollo, muchas empresas líderes, como OpenAI, Google y Anthropic, aún no han revelado sus emisiones de carbono (Maslej et al., 2024). Lamentablemente, esta falta de transparencia obstaculiza la capacidad de evaluar con precisión el verdadero coste medioambiental de la AI.

El desarrollo de modelos de AI, sobre todo de grandes modelos generativos, exige cada vez más recursos (Kemene et al., 2024). Se calcula que el consumo de energía necesario para el desarrollo de estos modelos es enorme, lo que genera considerables emisiones de gases de efecto invernadero. Se calcula que sólo el GPT-3 emitió más de 502 toneladas de CO₂ durante su fase de desarrollo (Stanford University, 2024a). En comparación, se dice que los modelos más nuevos y complejos, como el GPT-4, utilizaron 50 veces más electricidad para su entrenamiento, lo que agrava aún más su huella medioambiental (Kemene et al., 2024).

Además, los modelos de AI no sólo contribuyen a las emisiones durante la fase de desarrollo (Maslej et al., 2024). El impacto medioambiental de la inferencia - el proceso de utilizar modelos entrenados para tareas - también puede ser significativo. Aunque las emisiones por consulta durante la inferencia pueden parecer relativamente bajas, el impacto acumulado puede

ser inmenso cuando los modelos se consultan millones de veces al día (Maslej et al., 2024). Por ejemplo, se calcula que el consumo medio de energía de una solicitud de ChatGPT es de 2,9 vatios-hora, casi 10 veces superior al de una búsqueda normal en Google, que consume unos 0,3 vatios-hora por solicitud (de Vries, 2023).

Los sistemas de AI generativa, en particular, pueden consumir hasta 33 veces más energía que el software para tareas específicas (Kemene et al., 2024). Se calcula que GPT-3, por ejemplo, consume casi 1.300 megavatios-hora (MWh) de electricidad, lo que equivale aproximadamente al consumo eléctrico anual de 130 hogares en Estados Unidos (Kemene et al., 2024). Con los rápidos avances de la AI, la potencia de cálculo necesaria para sostener su crecimiento se duplica aproximadamente cada 100 días (Kemene et al., 2024). En 2023, la AI era responsable de un consumo de energía de 4,5 gigavatios en todo el mundo, lo que representaba el 8% del consumo total de energía de los centros de datos ese año, y se prevé que esta cifra aumente a 14 -18,7 gigavatios en 2028 (Schneider Electric, 2024).

El consumo de energía y las emisiones de carbono resultantes no son las únicas amenazas medioambientales asociadas a la AI. El consumo de agua durante el desarrollo de modelos como GPT-3 también es considerable. Por ejemplo, se ha estimado que el entrenamiento de GPT-3 requirió aproximadamente 4.800 millones de litros de agua si se utilizó el centro de datos de Microsoft en Iowa (Li et al., 2023). En caso de que el modelo se entrenara en un centro de datos diferente, como uno en Washington, el consumo de agua podría haber alcanzado los 15.000 millones de litros (Li et al., 2023).

3 AI como herramienta a la sostenibilidad

Responder a los retos de la sostenibilidad exige un cambio fundamental en la forma de gestionar los recursos naturales. La economía mundial actual depende en gran medida de recursos finitos y cada vez más escasos, como los combustibles fósiles, el agua y las materias primas. Estos recursos no sólo tienen una disponibilidad limitada, sino que también conllevan importantes consecuencias medioambientales a lo largo de su ciclo de vida, desde su extracción hasta su eliminación. Por ello, la gestión eficiente de los recursos se ha convertido en un requisito clave para el desarrollo sostenible y para alcanzar objetivos climáticos como las emisiones netas cero, en las que los gases de efecto invernadero causados por las actividades humanas se equilibran con los esfuerzos de eliminación (Wood, 2021).

Para gestionar los recursos de forma más eficiente, las organizaciones necesitan disponer de información precisa sobre cómo se utilizan actualmente. En este contexto, la optimización de procesos se convierte en un elemento central de las estrategias de sostenibilidad. Según los principios del Lean Management, toda mejora de procesos empieza por una medición precisa (Höfer, 2016). Los datos actúan como base para comprender las condiciones actuales, identificar ineficiencias y evaluar el impacto de los cambios. Sin los datos adecuados, las organizaciones no pueden tomar decisiones informadas sobre cómo reducir los residuos, optimizar los sistemas o mitigar el impacto medioambiental.

La inteligencia artificial es una valiosa herramienta de apoyo a este enfoque de la sostenibilidad basado en los datos. Los sistemas de AI pueden generar, organizar, analizar y visualizar grandes cantidades de datos, transformándolos en información práctica (Neike, 2025). Esto incluye no sólo tipos de datos convencionales como texto o valores numéricos, sino también formatos industriales más complejos como modelos 3D o diagramas de procesos (Neike, 2025). La capacidad de la AI para gestionar e interpretar información tan diversa permite a las empresas comprender mejor el impacto medioambiental de sus operaciones y mejorar el uso de los recursos en consecuencia (Microsoft, 2025).

Más concretamente, la AI permite a las organizaciones medir y optimizar sistemas complejos – como cadenas de suministro, redes energéticas o ecosistemas agrícolas – que antes eran demasiado dinámicos o interdependientes para ser gestionados con las herramientas analíticas tradicionales (Microsoft, 2025). Al identificar las ineficiencias y predecir el comportamiento de los sistemas, la AI permite tomar decisiones más inteligentes que mejoran los resultados medioambientales y económicos. De este modo, contribuye a reducir los residuos y las

emisiones al tiempo que aumenta la productividad, sobre todo en los sectores industriales (Cowls et al., 2021; Neike, 2025).

La combinación de la AI con la gestión del conocimiento refuerza aún más este proceso. Los sistemas de AI pueden guardar y difundir conocimientos organizativos, convirtiendo los datos acumulados en un activo estratégico que apoya la toma de decisiones en todos los departamentos (Kovačić et al., 2022). A través de esta integración, la AI contribuye a crear nuevos conocimientos analizando tendencias, apoyando simulaciones y destacando áreas de mejora. A medida que las organizaciones se adaptan a las cambiantes condiciones ambientales y económicas, la AI les permite seguir siendo flexibles y competitivas mediante la actualización continua de su base de conocimientos y sus procesos operativos (Kovačić et al., 2022).

Por último, la AI transforma los datos en bruto en una base para la innovación sostenible. Acelera el descubrimiento de materiales con bajas emisiones de carbono, soluciones de energías renovables y procesos de producción eficientes mediante el procesamiento de inmensos conjuntos de datos y la ejecución de simulaciones que serían demasiado costosas o requerirían demasiado tiempo con los métodos tradicionales (Microsoft, 2025; Cowls et al., 2021). En este sentido, la AI no es solo una solución tecnológica, sino también un facilitador estratégico de la sostenibilidad, que ofrece la posibilidad de replantearse cómo se consumen y conservan los recursos en todos los sectores.

3.1 Gestión eficiente de la energía

Como se menciona en la introducción, el uso extensivo de combustibles fósiles en los procesos de fabricación es uno de los principales responsables de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) (Chen et al., 2023). Por lo tanto, la mejora de la eficiencia energética, el desarrollo de energías verdes y la conservación de los recursos son esenciales para hacer frente al cambio climático (Chen et al., 2023).

La AI puede aumentar significativamente la eficiencia de la energía y contribuir a la sostenibilidad de las empresas mejorando la gestión de la energía en diversos sectores (Srivastava et al., 2023). El uso de tecnologías de AI en la generación, el suministro, el almacenamiento y las aplicaciones de energía permite a las empresas optimizar el uso de la energía, reducir los residuos y contribuir a la sostenibilidad medioambiental (Ahmad et al., 2021). Al aprovechar la AI, las empresas no sólo abordan las ineficiencias energéticas, sino que

también fomentan la transición hacia prácticas energéticas más ecológicas y sostenibles (Kemene et al., 2024; Srivastava et al., 2023).

Ahmad et al. (2021) analizan varias formas en las que la AI puede contribuir a la eficiencia de la energía, tal y como se resume en la tabla 2.

Tabla 2 - AI y Eficiencia de la energía

<i>Área</i>	<i>Contribuciones de AI a la eficiencia de la energía</i>
<i>Generación de Electricidad</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Optimización de la generación de energía eólica y solar mediante predicciones y pronósticos meteorológicos mejorados. - Ajuste de la capacidad de generación ante fluctuaciones en las fuentes de energía renovable. - Apoyo a la integración de energías renovables en la red eléctrica. - Uso de AI para predecir la demanda de electricidad y los modelos de precios.
<i>Transmisión de Energía</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Optimización del flujo de energía y la capacidad de la red. - Mejora del control de frecuencia y voltaje para la estabilidad de la red. - Monitoreo y análisis en tiempo real del flujo de energía para un mejor control de la red. - Detección y diagnóstico de fallos para prevenir cortes y perturbaciones.
<i>Redes de Distribución Eléctrica</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora de la estabilidad de la red mediante pronósticos de la demanda y precios futuros de energía. - Uso de IoT y AI para el monitoreo y la seguridad de las redes inteligentes. - Sistemas de gestión de redes impulsados por AI para maximizar la eficiencia de la red y la integración de energías renovables.

Almacenamiento de Energía

- Uso de drones para el mantenimiento y monitoreo de líneas y redes eléctricas de difícil acceso.

- Optimización de la distribución de energía mediante la gestión inteligente del almacenamiento y la predicción de la demanda energética.

- Mejora de la eficiencia del almacenamiento de energía con sistemas controlados por AI.

- Extensión de la vida útil de las baterías mediante mantenimiento predictivo basado en datos recopilados.

- Uso de AI para controlar y maximizar los retornos energéticos de los sistemas de almacenamiento.

Aplicaciones Energéticas

- Uso más eficiente de la energía en edificios y transporte mediante sistemas de control inteligentes.

- Aplicación de AI en el suministro de energía para predecir cargas y demandas del lado del consumidor.

- Mejora de la automatización en aplicaciones energéticas para reducir el consumo de energía.

- Uso de AI para optimizar la operación y el mantenimiento de plantas y dispositivos.

Eficiencia Energética en los Sistemas Energéticos

- Uso de AI para el desarrollo y mejora de nanomateriales con el fin de aumentar la eficiencia energética (por ejemplo, mejores celdas solares).

- AI para mejorar la eficiencia de turbinas eólicas y baterías mediante nanotecnología.

- Uso de AI para analizar y seleccionar nanomateriales óptimos para el sector energético.

- Empleo de AI y nanotecnología para reducir las pérdidas energéticas y mejorar el aislamiento térmico en los sistemas energéticos.

elaborada por la autora con información basada en Ahmad et al. (2021)

Otros autores amplían esta lista de aplicaciones de la AI para la eficiencia energética, como Srivastava et al. (2023), que destacan la fabricación de electrodomésticos y dispositivos inteligentes diseñados a partir del sistema smart-house para mejorar su eficiencia de la energía.

Kemene et al. (2024) también mencionan la inestabilidad de la producción de energías renovables y la dificultad de predecir tanto la oferta como la demanda. La variabilidad de la producción de energías renovables a menudo da lugar a una sobreproducción en las horas de mayor demanda y a una infraproducción en las de menor demanda (Kemene et al., 2024). La AI podría mejorar la eficiencia de la energía analizando vastos conjuntos de datos, desde tendencias meteorológicas hasta tendencias de consumo energético. Según Kemene et al. (2024), la AI puede predecir la producción de energía con notable precisión. Con estas previsiones de AI, los clientes que tienen una gran demanda de energía (como los centros de formación de AI, en este ejemplo) podrían programar sus turnos y su consumo energético para asegurarse de que utilizan la energía cuando hay electricidad de fuentes renovables disponible (Kemene et al., 2024).

Muchas grandes empresas ya utilizan AI para la eficiencia de la energía, como Google, Microsoft, General Electric, Siemens, British Petroleum (BP) y Royal Dutch Shell (Ahmad et al., 2021).

Por ejemplo, Google y Trane Technologies utilizaron algoritmos de DeepMind y machine learning para optimizar la eficiencia de la energía de las plantas enfriadoras de grandes edificios (The Batch, 2023). El sistema de AI aprendió a tomar decisiones de eficiencia energética respetando las restricciones de seguridad, lo que se tradujo en un ahorro energético del 9-13% (The Batch, 2023). Este enfoque demostró cómo la AI puede mejorar la eficiencia operativa manteniendo la seguridad en entornos complejos (The Batch, 2023).

Dannouni et al. (2023) estiman que la AI tiene el potencial de reducir entre el 5 y el 10% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero para 2030.

Los nuevos hardwares y tecnologías ofrecen un mayor rendimiento con un menor consumo de energía, como el «superchip» de NVIDIA, que afirma ser capaz de ofrecer un rendimiento 30 veces superior con un consumo de energía 25 veces inferior (Kemene et al., 2024).

Un análisis de Accenture y el Foro Económico Mundial muestra que las tecnologías digitales podrían ayudar a reducir hasta un 20% de la reducción necesaria para alcanzar las trayectorias de cero emisiones netas de la Agencia Internacional de la Energía (George et al., 2022).

3.2 Gestión eficiente de los materiales y economía circular

Los residuos son un importante problema medioambiental debido a su potencial para contaminar el aire, el agua y el suelo (Fang et al., 2023). La acelerada urbanización, el crecimiento demográfico y el desarrollo económico han aumentado considerablemente la generación de residuos en todo el mundo (Fang et al., 2023). En 2016, se generaron aproximadamente 2.010 billones de toneladas de residuos sólidos urbanos en todo el mundo, y se espera que esta cifra aumente a 3.400 millones de toneladas en 2050 (Fang et al., 2023). Sin embargo, solo el 33% de los residuos sólidos se gestiona correctamente, mientras que el resto se elimina en vertederos ilegales o vertederos no controlados (Fang et al., 2023).

La generación de residuos está causada por la producción industrial, la construcción, las actividades agrarias, las emisiones de contaminantes, el consumo y los métodos ineficientes de desecho (Fang et al., 2023). El Parlamento Europeo identifica los sectores clave que consumen más recursos, como la electrónica, las baterías, los vehículos, los embalajes, los plásticos, los textiles, la construcción, los alimentos y el agua (Parlamento Europeo, 2023).

Para mitigar el impacto de los residuos, se emplean varias estrategias, como el reciclaje, el compostaje, la reutilización de materiales, la utilización de energías renovables y la adopción de tecnologías ecológicas (Fang et al., 2023).

La inteligencia artificial tiene el potencial de revolucionar la gestión de residuos optimizando su recogida, procesamiento, clasificación y predicción (Fang et al., 2023). Las aplicaciones de AI pueden aumentar la eficiencia, reducir costes, mejorar la seguridad y aumentar la recuperación de materiales en el reciclaje, lo que se traduce en importantes beneficios medioambientales (Fang et al., 2023; Lakhouit, 2025). Por ejemplo, la optimización de la logística de residuos impulsada por AI puede reducir las distancias de transporte hasta en un 36,8%, disminuyendo el consumo de combustible y las emisiones de carbono (Fang et al.,

2023). Además, se están utilizando tecnologías mejoradas con AI, como drones autónomos y robots submarinos, para identificar y eliminar los residuos plásticos de los océanos con mayor eficacia (Microsoft, 2025).

Más allá de los beneficios medioambientales, las prácticas circulares ofrecen ventajas estratégicas para empresas. Al reutilizar los materiales, las industrias pueden mejorar la «seguridad de los materiales», algo especialmente relevante para sectores que dependen de recursos escasos como el litio y el cobalto (Lu y Serafeim, 2023).

Muchos países desarrollados, como Austria, Alemania, Nueva Zelanda y Estados Unidos, ya han empezado a aplicar soluciones de AI para maximizar la utilización de los recursos y la eficiencia del reciclaje en todo el ciclo de gestión de los residuos (Fang et al., 2023).

Un marco crucial para minimizar los residuos es el modelo de economía circular, que promueve compartir, alquilar, reutilizar, reparar, «refurbish» y reciclar materiales y productos durante el mayor tiempo posible (Parlamento Europeo, 2023). El objetivo es ampliar los ciclos de vida de los productos y reducir la dependencia de los recursos vírgenes (Parlamento Europeo, 2023). Este enfoque requiere el desarrollo de diseños de productos y envases más sostenibles y eficientes desde el principio (Parlamento Europeo, 2023).

La AI desempeña un papel fundamental en el avance de los principios de la economía circular mediante la optimización del diseño de productos, la selección de componentes y el uso de materiales (McKinsey, 2019). Las soluciones impulsadas por la AI permiten a las empresas implantar modelos de negocio circulares y mejorar la eficiencia de las infraestructuras (McKinsey, 2019). El análisis predictivo, los sistemas de clasificación automatizados y el seguimiento de materiales impulsado por AI pueden facilitar mayores tasas de reciclaje y mejorar la recuperación de residuos (McKinsey, 2019). Sin embargo, deben abordarse desafíos como los altos costes de implementación, los requisitos de calidad de los datos y las limitaciones tecnológicas para garantizar una adopción generalizada (Lakhout, 2025).

Una de las empresas más conocidas que adoptan la circularidad es Patagonia (Rattalino, 2017). La empresa estadounidense aplica varias estrategias de reducción de residuos, como ofrecer servicios de reparación, proporcionar instrucciones para que los clientes reparen los productos por sí mismos y asociarse con plataformas de reventa como eBay para ampliar la vida útil de los productos (Rattalino, 2017; Patagonia, 2021). Patagonia demuestra que las prácticas empresariales sostenibles pueden ser responsables con el medio ambiente y rentables económicamente (Rattalino, 2017).

A mayor escala, los beneficios económicos de la transformación en una economía circular son considerables. McKinsey (2019) calcula que una economía circular en Europa podría generar un beneficio neto de 1,8 billones de euros para 2030. Además, Lu y Serafeim (2023) proyectan que los modelos económicos circulares podrían crear billones de dólares en valor en todo el mundo, haciendo de la circularidad una estrategia financieramente viable tanto para las empresas como para los gobiernos.

3.3 Gestión eficiente de agua

El agua es un recurso crítico y finito que requiere una gestión sostenible para satisfacer la creciente demanda mundial (European Commission, 2025). El sector agrario es el mayor consumidor de agua, representando aproximadamente el 71,7% de las extracciones mundiales de agua en 2021, principalmente para riego, ganadería y piscicultura (FAO Aquastat, 2025). Los sectores industrial y municipal representan el 15,07% y el 13,26% de las extracciones mundiales de agua, respectivamente (FAO Aquastat, 2025). Con la rápida urbanización, el crecimiento de la población y el desarrollo económico, el consumo mundial de agua sigue aumentando, lo que incrementa la necesidad de estrategias eficientes de gestión del agua (European Commission, 2025).

Especialmente las aguas subterráneas, fuente crucial de agua dulce, deben protegerse de la contaminación y la extracción excesiva para garantizar su sostenibilidad a largo plazo (European Commission, 2025). La agricultura, como uno de los mayores contribuyentes al cambio climático, agrava el agotamiento de los recursos hídricos a través de la degradación del suelo, la deforestación y el consumo excesivo de agua dulce (Microsoft, 2025). La aplicación de prácticas agrícolas sostenibles, como el riego de precisión y los métodos de secuestro de carbono, puede mitigar estos problemas y mejorar la eficiencia de agua (Microsoft, 2025).

La inteligencia artificial desempeña un papel cada vez más importante en la optimización de la gestión del agua mediante el aprovechamiento del análisis de datos, los modelos predictivos y la automatización. Las tecnologías basadas en AI, integradas con el Internet de las Cosas (IoT), permiten monitorizar en tiempo real los recursos de agua, las infraestructuras y los hábitos de consumo (Dada et al., 2024). Los dispositivos IoT, como los sensores inteligentes, recopilan datos sobre turbidez, niveles de pH, concentraciones químicas y velocidades de flujo del agua en las redes de distribución (Dada et al., 2024). Estos datos facilitan la detección temprana de

pérdidas, el mantenimiento de las infraestructuras y el control de la calidad del agua, reduciendo en última instancia la ineficacia y las pérdidas de agua (Dada et al., 2024).

En las aplicaciones agrarias, la AI mejora la eficiencia del riego analizando los niveles de humedad del suelo, las previsiones meteorológicas y las características de los cultivos. Este enfoque basado en datos minimiza el desperdicio de agua mientras maximiza el rendimiento de los cultivos, abordando el importante reto del consumo de agua en el sector (Balassiano et al., 2025). La AI también contribuye a la eficiencia operativa en el tratamiento del agua mediante la predicción de fallos en los equipos, la optimización de los programas de mantenimiento y la mejora de la gestión de activos a través de la supervisión basada en sensores (Balassiano et al., 2025). Por ejemplo, la ciudad de Tucson (EE.UU.) ha aplicado análisis basados en la AI para identificar tendencias en los fallos históricos de las tuberías, lo que ha permitido realizar mejoras específicas en las infraestructuras y optimizar la asignación presupuestaria (Balassiano et al., 2025).

Las capacidades predictivas de la AI se extienden al tratamiento de aguas residuales, donde algoritmos inteligentes optimizan los procesos de depuración, reduciendo el consumo de energía y mejorando la eficiencia del reciclaje del agua (Dada et al., 2024). Además, las imágenes por satélite potenciadas por la AI permiten evaluar en tiempo real el estado de las tuberías, lo que ayuda a realizar un mantenimiento proactivo y a minimizar las pérdidas de agua (Balassiano et al., 2025).

3.4 Gestión eficiente de la cadena del suministro y del transporte

Una cadena de suministro incluye todas las actividades, organizaciones y recursos implicados en la producción y distribución de un producto o servicio, desde las materias primas hasta los consumidores finales (Darnall et al., 2008; Shoushtari et al., 2021). Incluye proveedores, fabricantes, transportistas, proveedores de almacenamiento, minoristas y clientes (Darnall et al., 2008; Shoushtari et al., 2021). La gestión eficaz de estas complejas redes es esencial para garantizar que los bienes y servicios se entregan a tiempo, de forma rentable y fiable (Shoushtari et al., 2021).

Las cadenas de suministro tienen un impacto significativo en los resultados medioambientales y sociales. Son responsables de la mayor parte de la huella medioambiental de una empresa, y las emisiones indirectas a menudo superan a las directas en un factor de más de 11 (McGrath y Jonker, 2024). La gestión sostenible de la cadena de suministro, que integra consideraciones

ecológicas y sociales en las operaciones de la cadena de suministro, se ha convertido en una prioridad clave para las empresas mundiales (Lewis, 2016; McGrath & Jonker, 2024). Sin embargo, la escala y la complejidad de las cadenas de suministro mundiales plantean desafíos a la hora de aplicar prácticas sostenibles, sobre todo en la supervisión de los proveedores, la reducción de emisiones y la gestión de residuos (UN Global Compact, 2025).

La gestión de la sostenibilidad dentro de la cadena de suministro requiere prestar atención a numerosos factores, como la responsabilidad medioambiental, la transparencia, la colaboración y la selección de proveedores (McGrath y Jonker, 2024). Por ejemplo, las empresas optimizan cada vez más la logística y utilizan energías renovables para reducir las emisiones, al tiempo que promueven los principios de la economía circular para minimizar los residuos (McGrath y Jonker, 2024).

La Inteligencia Artificial se presenta como un potente facilitador de la eficiencia y la innovación en las cadenas de suministro. Los sistemas basados en AI mejoran la toma de decisiones a todos los niveles – estratégico, táctico y operativo – al procesar grandes volúmenes de datos e identificar patrones que, de otro modo, permanecerían ocultos (Tsolakis et al., 2022; IBM, 2025; Downie & Finn, 2024). Estas capacidades permiten a las empresas mejorar la capacidad de respuesta, reducir costes y gestionar de forma proactiva las posibles interrupciones (Tsolakis et al., 2022; IBM, 2025; Downie & Finn, 2024).

Los algoritmos de machine learning y el análisis predictivo ayudan a predecir la demanda con mayor exactitud, optimizar el inventario y detectar a tiempo los riesgos de suministro. Al analizar tendencias pasadas y datos en tiempo real, la AI mejora la capacidad de reaccionar ante las fluctuaciones del mercado y planificar en consecuencia (Shoushtari et al., 2021; Walch, 2025). Además, la AI facilita la automatización de procesos rutinarios, reduciendo errores, cuellos de botella e ineficiencias operativas (Downie & Finn, 2024).

La AI contribuye significativamente a que las cadenas de suministro sean más sostenibles. Favorece la reducción de emisiones al permitir la optimización de rutas, la planificación inteligente de envíos y el uso eficiente del espacio de almacenamiento (Shoushtari et al., 2021; McGrath y Jonker, 2024). Al mejorar la transparencia y la capacidad de control de la cadena de suministro, la AI ayuda a las empresas a supervisar el rendimiento de los proveedores y garantiza el cumplimiento de las normas medioambientales y sociales (Downie y Finn, 2024).

Además, la AI permite a las empresas adoptar estrategias de economía circular minimizando los residuos y facilitando la reutilización, el reciclaje o la eliminación responsable de los

productos. El análisis de datos en tiempo real también mejora las auditorías y los informes de sostenibilidad, que son fundamentales para el cumplimiento de la normativa y la confianza de las distintas partes interesadas (McGrath y Jonker, 2024).

El transporte es una parte fundamental de la cadena de suministro, y su optimización es crítica para mejorar tanto la eficiencia como la sostenibilidad. La AI ayuda a la gestión del transporte analizando datos como el consumo de combustibles, los patrones de tráfico y los plazos de entrega para proponer las rutas más eficientes (Shoushtari et al., 2021). Empresas como UPS han aprovechado la AI para reducir los costes de transporte y mejorar los plazos de entrega ajustando dinámicamente las redes logísticas en función de los datos en tiempo real (Shoushtari et al., 2021).

El mantenimiento predictivo es otra área en la que AI mejora significativamente la eficiencia del transporte. Al identificar con antelación posibles fallos de los equipos, las empresas pueden evitar paradas imprevistas y mantener unos plazos de entrega coherentes (IBM, 2025). Estas innovaciones contribuyen a reducir las emisiones, recortar los costes operativos y aumentar la satisfacción del cliente (Shoushtari et al., 2021; IBM, 2025).

La AI está transformando el sector de la gestión de la cadena de suministro y el transporte al hacer que las operaciones se basen más en los datos y sean más resistentes y sostenibles. Desde la mejora de la transparencia y las capacidades predictivas hasta la optimización del uso de los recursos y la logística del transporte, la AI ofrece una multitud de oportunidades para mejorar la eficiencia de la cadena de suministro y, al mismo tiempo, apoyar los objetivos medioambientales y sociales. A medida que aumente la complejidad de las cadenas de suministro mundiales, la AI desempeñará un papel cada vez más importante en la gestión responsable y eficaz de la cadena de suministro.

4 El uso de AI en la realidad empresarial

4.1 Uso de AI en PYMES vs grandes empresas

Pequeñas y medianas empresas (PYMES)

Las pequeñas y medianas empresas (PYMES) desempeñan un papel fundamental en la transformación medioambiental y económica. A escala mundial, constituyen aproximadamente el 90% de todas las empresas y contribuyen en casi un 70% al empleo y al PIB, constituyendo la base de las economías emergentes y desarrolladas (Al-Saleh, 2023). Sin embargo, su impacto medioambiental es igualmente significativo. Las PYMES son responsables de entre el 60% y el 70% de las emisiones industriales, y la huella de carbono combinada de las PYMES proveedoras es, de media, cinco veces mayor que la de las grandes empresas (Al-Saleh, 2023). Dada su prevalencia e influencia, es vital situar a las PYMES en el centro de las estrategias climáticas.

A pesar de su importancia, muchas PYMES se enfrentan a importantes barreras a la hora de adoptar prácticas sostenibles. Uno de los principales desafíos es la falta de recolección de datos e informes sobre emisiones e impacto ambiental (British Chambers of Commerce, 2021). Un estudio realizado en el Reino Unido reveló que sólo el 11% de las PYMES miden su huella de carbono, y casi un tercio aún no han buscado orientación para elaborar una hoja de ruta neta cero (British Chambers of Commerce, 2021). Muchas pequeñas empresas tampoco comprenden del todo conceptos clave de sostenibilidad, como el de cero emisiones netas, y no consideran que los objetivos medioambientales sean una prioridad inmediata, especialmente tras las presiones económicas derivadas de la pandemia (British Chambers of Commerce, 2021). Los limitados recursos financieros, los elevados costes iniciales de adaptación y la falta de conocimientos agravan aún más el problema (British Chambers of Commerce, 2021; Alainati et al., 2024). Esta falta de datos no solo impide el progreso de las PYMES en materia de sostenibilidad, sino que también plantea problemas a las grandes empresas que dependen de estos pequeños proveedores para cumplir sus propios objetivos medioambientales, sociales y de gobernanza (Al-Saleh, 2023).

Aquí es precisamente donde la inteligencia artificial puede ser transformadora. La AI permite a las pequeñas empresas recoger, procesar e interpretar datos medioambientales que, de otro modo, no tendrían la capacidad de gestionar (Alainati et al., 2024). En la actualidad, muchas PYMES no realizan un seguimiento sistemático de las emisiones, los residuos o el consumo de energía (British Chambers of Commerce, 2021), pero las tecnologías de AI pueden automatizar

estos procesos y ofrecer información en tiempo real (Alainati et al., 2024). Desde el control del consumo de energía hasta la optimización de la logística, las soluciones basadas en la AI ayudan a reducir las emisiones. Por ejemplo, el uso de la AI para gestionar los sistemas energéticos de los edificios, la transición de las flotas de vehículos a la electricidad o la evaluación de la sostenibilidad de los materiales de la cadena de suministro puede reducir significativamente las emisiones (Wilser, 2022; Bank of America, 2024). La AI también facilita la toma de mejores decisiones estratégicas a través del análisis predictivo, lo que permite a las PYMES alinear mejor sus operaciones con los objetivos climáticos (Alainati et al., 2024).

La capacidad de la AI para interpretar conjuntos de datos grandes y complejos es especialmente importante, ya que las PYMES disponen de recursos limitados para el tratamiento y el análisis manual de datos (Alainati et al., 2024). Además, la AI permite la automatización individualizada, ayuda al servicio de atención al cliente a través de chatbots y mejora el marketing mediante el conocimiento del comportamiento y el análisis de tendencias (Alainati et al., 2024). Estas funciones no sólo aumentan la sostenibilidad, sino que también impulsan la eficiencia operativa, lo que permite a las PYMES reducir costes y seguir siendo competitivas en los mercados digitales (Alainati et al., 2024). Las pequeñas empresas también pueden utilizar herramientas de AI para hacer un seguimiento de los riesgos, mejorar la logística y generar informes de sostenibilidad automatizados, contribuyendo así al cumplimiento de las normas medioambientales sin sobrecargar los recursos internos (US Small Business Administration, 2025).

Contrariamente a la presunción de que solo las grandes empresas se benefician de la AI, las PYMES están accediendo cada vez más a estas herramientas (McKinsey & Company, 2024). Más aún, las empresas más pequeñas - especialmente las start-ups con 11 a 20 empleados - demostraron los mayores índices de adopción de AI en 2023, con aproximadamente un 70% utilizando herramientas de AI semanalmente (Statista & Zero To Mastery, 2023). Esta tendencia se ve reforzada por la creciente disponibilidad de plataformas de autoaprendizaje, recursos en línea y herramientas de bajo coste que permiten a los empresarios integrar la AI sin grandes conocimientos técnicos (Alainati et al., 2024). Aunque el acceso se está ampliando, siguen existiendo obstáculos: Las PYMES no disponen a menudo de personal cualificado, se enfrentan a problemas de ciberseguridad y se encuentran con dificultades de aplicación que pueden impedir una adopción más amplia (Alainati et al., 2024; US Small Business Administration, 2025). Unas soluciones de AI adaptadas, asequibles y escalables – así como

políticas públicas de apoyo – son fundamentales para ayudar a las pymes a superar estas limitaciones (Alainati et al., 2024; US Small Business Administration, 2025).

Varios ejemplos del mercado real ilustran cómo la AI y las colaboraciones empresariales ya están apoyando a las PYMES en temas de sostenibilidad. El Proyecto Gigatón de Walmart, cuyo objetivo es reducir 1 gigatonelada de CO₂ de su cadena de suministro para 2030, incluye apoyo a medida para que las PYMES proveedoras cumplan las normas ESG, como herramientas de seguimiento de datos y financiación prioritaria (Al-Saleh, 2023). Gucci incentiva la sostenibilidad concediendo préstamos a bajo interés a pequeños proveedores, mientras que IKEA financia innovaciones ecológicas que le ayudan a cumplir sus objetivos climáticos (Al-Saleh, 2023).

Por último, las PYMES que adoptan la sostenibilidad y la AI no sólo contribuyen a la lucha mundial contra el cambio climático, sino que también se posicionan para la competitividad a largo plazo. Al mostrar su compromiso con el medio ambiente, las pequeñas empresas pueden atraer a clientes más grandes con requisitos ESG y conseguir ventajas estratégicas (Wilser, 2022). Con la AI como facilitador esencial, las PYMES pueden superar las deficiencias existentes en datos, recursos y eficiencia, convirtiendo la sostenibilidad de un reto en una oportunidad de crecimiento.

Grandes empresas y empresas multinacionales

A diferencia de las pequeñas y medianas empresas, las grandes empresas y las empresas multinacionales se enfrentan desde hace mucho tiempo a una presión social y normativa cada vez mayor para que demuestren su responsabilidad medioambiental y social (Lewis, 2016). Este mayor interés se ha traducido en un aumento de los informes de sostenibilidad, sobre todo entre las empresas más grandes del mundo (Lewis, 2016). Sin embargo, con el aumento de los informes de sostenibilidad, también ha crecido la preocupación en torno a la credibilidad y la profundidad de dichos informes, y muchas grandes empresas han sido acusadas de prácticas de «greenwashing» (Peng et al., 2023).

El greenwashing generalmente consiste en publicar información vaga o selectiva sobre sostenibilidad para convencer a las partes interesadas sobre el comportamiento medioambiental de una empresa. Este comportamiento es facilitado con frecuencia por la falta de garantías obligatorias de terceros y de supervisión reglamentaria (Peng et al., 2023). Los incentivos para el greenwashing están profundamente arraigados en las culturas empresariales que dan

prioridad a los resultados financieros a corto plazo frente a la responsabilidad medioambiental a largo plazo (Peng et al., 2023).

Las grandes empresas también se enfrentan a desafíos estructurales a la hora de aplicar auténticas estrategias de sostenibilidad. Entre ellos se incluyen la navegación por diversos entornos normativos, la conciliación de diferencias culturales y la gestión de operaciones geográficamente dispersas (Abdul-Azeez et al., 2024). Las iniciativas de sostenibilidad que son eficaces en una región pueden ser irrelevantes o incluso contraproducentes en otra debido a las variaciones en las infraestructuras, las condiciones medioambientales y las expectativas sociales (Abdul-Azeez et al., 2024). Además, equilibrar la rentabilidad con los objetivos medioambientales sigue siendo un dilema central, ya que las prácticas sostenibles suelen conllevar importantes costes iniciales (Abdul-Azeez et al., 2024).

La complejidad de las cadenas de suministro mundiales de las multinacionales presenta otro obstáculo. En las cadenas de suministro intervienen numerosos agentes, desde proveedores hasta distribuidores, cada uno de los cuales opera bajo sistemas de gobernanza diferentes y con distintos niveles de compromiso con la sostenibilidad (Marano et al., 2024). La fragmentación de estas redes complica la supervisión y la responsabilidad, creando puntos ciegos en los que los abusos de los derechos humanos y las violaciones del medio ambiente pueden pasar desapercibidos (Marano et al., 2024). Incluso las iniciativas bienintencionadas de sostenibilidad de la cadena de suministro, como los códigos de conducta y las certificaciones de terceros, han sido objeto de críticas por no lograr cambios significativos, especialmente en los mercados emergentes (Marano et al., 2024).

4.2 Uso de AI en países de desarrollo vs países desarrollados

La distinción entre países en desarrollo y desarrollados habitualmente se basa en diferentes criterios clave, como la renta per cápita, las estructuras económicas y sociales, las condiciones sociales y los niveles de libertad económica y política (Sanford & Sandhu, 2002). Según la UNCTAD (2025), esta clasificación suele seguir una división regional tradicional, en la que los países en desarrollo suelen incluir la mayoría de las naciones de África, América Latina y el Caribe, y partes de Asia y Oceanía, mientras que los países desarrollados se encuentran principalmente en América del Norte y Europa, junto con naciones como Japón, la República de Corea, Israel, Australia y Nueva Zelanda. Además, las Naciones Unidas reconocen subgrupos específicos como los países menos desarrollados, los países en desarrollo sin litoral y los pequeños países insulares en desarrollo dentro de la categoría más amplia de economías en desarrollo.

Los retos medioambientales, la sostenibilidad y la sostenibilidad empresarial en las naciones en desarrollo deben entenderse dentro de sus contextos socioeconómicos y medioambientales particulares (Miyan, 2015). Los países en desarrollo se enfrentan a menudo a presiones medioambientales cada vez más intensas, como sequías cada vez más graves, provocadas por la sobreexplotación de los recursos y la inestabilidad climática (Miyan, 2015). Estos impactos afectan de manera desproporcionada a los países menos desarrollados debido a sus vulnerabilidades estructurales, lo que provoca problemas como la inseguridad alimentaria, la pérdida de biodiversidad y la migración forzada (Miyan, 2015).

A la hora de evaluar la sostenibilidad y las emisiones a escala mundial, es esencial tener en cuenta que, aunque países en desarrollo como China se han convertido en grandes emisores en los últimos años, esto está estrechamente ligado a su gran población y a su rápida industrialización (Ritchie et al., 2024; Global Carbon Project, 2024). Aun así, las emisiones históricas de los países desarrollados siguen siendo significativamente más elevadas, y Estados Unidos es responsable de las mayores emisiones acumuladas desde el siglo XVIII (Ritchie et al., 2024; Global Carbon Project, 2024).

En cuanto a las políticas de sostenibilidad, muchas empresas de regiones en desarrollo están empezando a adoptar la redacción de informes de sostenibilidad (KPMG International, 2024). Por ejemplo, en la región Asia-Pacífico se ha producido un aumento considerable de las tasas de redacción de informes, que han pasado del 49 % en 2011 al 92 % en 2024 (KPMG

International, 2024). Sin embargo, en otras regiones como África se han registrado descensos recientes, lo que indica un progreso poco uniforme (KPMG International, 2024).

Los esfuerzos de sostenibilidad de las empresas en estas regiones suelen depender de las condiciones locales y están menos formalizados que en las economías desarrolladas. Tienden a ser más filantrópicas y a estar más arraigadas en las relaciones sociales que regidas por marcos estructurados (Jamali y Karam, 2016). Además, los estudiosos sostienen que los modelos de responsabilidad social de las empresas elaborados en los países desarrollados no siempre son transferibles a los países en desarrollo, debido a los diferentes objetivos y contextos sociopolíticos (Jamali y Karam, 2016).

La inteligencia artificial se adopta cada vez más en todo el mundo, aunque el ritmo y las pautas de esta adopción difieren significativamente entre los países desarrollados y los países en desarrollo. En los países de renta alta, la sólida infraestructura tecnológica, las inversiones a gran escala en investigación y desarrollo y una mano de obra altamente cualificada han permitido el uso generalizado de la AI en sectores como las finanzas, la fabricación y el análisis empresarial (Aderibigbe et al., 2023). Países como China, India y Singapur han mostrado altos índices de uso de la AI, con más del 60% de las empresas informando de su uso activo en 2022 (IBM, 2022). En cambio, muchos países de renta baja siguen estando infrarrepresentados en la adopción e investigación de la AI. Las limitaciones de infraestructura, como un acceso a Internet poco fiable y unas instalaciones de almacenamiento de datos inadecuadas, dificultan la integración perfecta de las tecnologías de IA (Aderibigbe et al., 2023; Khan et al., 2024; Statista Market Insights, 2025).

Los obstáculos a la implementación de la AI en los países en desarrollo son diversos. Entre los principales retos se encuentran una infraestructura digital insuficiente, la falta de estrategias nacionales de AI, una representación mínima en la investigación mundial sobre AI y la escasez de profesionales formados en campos relacionados con la AI (Aderibigbe et al., 2023; Khan et al., 2024; Statista Market Insights, 2025). Los países en desarrollo también se enfrentan a una gran dependencia de la tecnología importada, como los semiconductores, lo que limita su autonomía en el desarrollo de la AI (Sun, 2025). A pesar de estos obstáculos, cada vez se hacen más esfuerzos para invertir en infraestructuras de AI y desarrollo de talentos, como se observa en las iniciativas nacionales de países como India y China (Mannuru et al., 2023; Saleh, 2025).

Sin embargo, la AI tiene un gran potencial para hacer frente a problemas críticos en los países en desarrollo, especialmente en áreas como la agricultura, la sanidad y la educación. En

agricultura, las herramientas basadas en AI pueden ayudar a optimizar el rendimiento de los cultivos, evaluar las condiciones meteorológicas y del suelo y reducir el uso de pesticidas mediante la agricultura de precisión, como han demostrado empresas en Kenia y India (Folorunso et al., 2024). En sanidad, la AI facilita el diagnóstico y el tratamiento a distancia, mejorando el acceso en zonas desatendidas (Folorunso et al., 2024). Al permitir una mejor gestión de los recursos y prestación de servicios, la AI puede contribuir a unas prácticas de desarrollo más sostenibles y ayudar a mitigar retos medioambientales como el cambio climático y la inseguridad alimentaria (Folorunso et al., 2024).

Dada la diversidad del contexto socioeconómico y tecnológico de los países en desarrollo, resulta útil examinar individualmente determinados contextos nacionales para comprender mejor las distintas trayectorias y retos de la adopción de la AI.

En Indonesia, por ejemplo, la creciente economía digital y la población experta en tecnología han posicionado al país como un mercado emergente para las tecnologías de AI (Siahaan, 2024). Aunque la preparación gubernamental va a la zaga de sus homólogos regionales, como Singapur y Malasia, la IA se está integrando rápidamente en los negocios y la educación (Siahaan, 2024). Según los informes, casi la mitad de los estudiantes indonesios utilizan herramientas de AI para fines académicos, y las empresas locales están empezando a adoptar soluciones de AI (Siahaan, 2024). A pesar de estos avances, retos como la insuficiente mano de obra cualificada, las deficiencias de la infraestructura digital y los problemas de ciberseguridad obstaculizan una implementación más amplia (Siahaan, 2024).

En China, el desarrollo de la AI se ha convertido en una prioridad estratégica nacional (Slotta, 2025). Con el apoyo del gobierno y una inversión significativa, las empresas chinas están avanzando rápidamente en las capacidades de AI, en particular en sectores como la agricultura inteligente, la producción y FinTech (Slotta, 2025). Según Slotta (2025), la gran población del país y el uso generalizado de la tecnología proporcionan vastos conjuntos de datos cruciales para el desarrollo de la AI (Slotta, 2025). Además, China ha adoptado una estrategia de «AI+», promoviendo aplicaciones intersectoriales (Slotta, 2025). Una motivación clave es abordar los retos demográficos a largo plazo, como la reducción de la mano de obra, mediante la automatización (Slotta, 2025).

4.3 Uso de AI por sector económico

La economía se divide tradicionalmente en tres sectores principales: el sector primario, que se centra en la extracción de recursos naturales (por ejemplo agricultura, pesca, minería); el sector secundario, que implica la fabricación de bienes a partir de esos recursos (por ejemplo producción de alimentos y construcción); y el sector terciario, que proporciona servicios a los consumidores (por ejemplo comercio minorista, banca, ocio) (BBC, 2024).

A continuación, examinaremos cómo contribuye la AI a la sostenibilidad dentro de cada uno de estos sectores.

Sector primario

Las actividades agrícolas y ganaderas afectan significativamente a la sostenibilidad medioambiental. Son los principales responsables de la deforestación, el agotamiento del agua dulce, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático (BBC, 2024; Microsoft, 2025; Tiseo, 2021; Tudi et al., 2021). El sector agrícola por sí solo consume aproximadamente el 70% del agua dulce del mundo e impulsa el 80% de la deforestación, sobre todo en las regiones tropicales, lo que provoca la degradación del suelo y la desertificación (Tiseo, 2021). La conversión de bosques para la producción agrícola y ganadera también provoca la liberación de grandes cantidades de dióxido de carbono, lo que intensifica el calentamiento global (Tiseo, 2021).

Además, el uso excesivo de pesticidas, aunque crucial para el rendimiento de los cultivos, provoca una contaminación generalizada al contaminar el aire, el suelo y el agua, lo que supone riesgos para los ecosistemas y la salud humana (Tudi et al., 2021; Tiseo, 2021). Además, la basura agrícola contribuye en gran medida a la contaminación del agua, comprometiendo aún más la calidad del agua dulce (Tiseo, 2021). En general, las prácticas agrícolas insostenibles siguen siendo un obstáculo importante para los objetivos de sostenibilidad global, ya que alimentan la degradación ecológica en múltiples ámbitos (BBC, 2024; Microsoft, 2025; Tiseo, 2021; Tudi et al., 2021). Por lo tanto, es esencial utilizar todos los recursos de la forma más eficiente posible para reducir el impacto ambiental y preservar los ecosistemas naturales.

La inteligencia artificial está revolucionando la agricultura al aumentar la productividad, la sostenibilidad y la eficiencia en todas las fases de la cadena de suministro agroalimentaria (Ben Ayed y Hanana, 2021; Javaid et al., 2022). Dado el crecimiento previsto de la población

mundial hasta los 9.000-10.000 millones en 2050, la producción de alimentos debe aumentar hasta un 110%, lo que exige un cambio hacia prácticas agrícolas inteligentes y sostenibles (Ben Ayed y Hanana, 2021). Las tecnologías de AI, en particular el Machine Learning (ML), ofrecen herramientas avanzadas de toma de decisiones basadas en datos que mejoran la predicción del rendimiento de los cultivos, el análisis del suelo, la gestión del riego y la detección de enfermedades. Estas aplicaciones no solo aumentan la eficiencia, sino que también reducen el uso de agua, fertilizantes y pesticidas (Javaid et al., 2022).

El ML se utiliza en las cuatro etapas principales de la agricultura – preproducción, producción, procesamiento y distribución – a través de una variedad de algoritmos como las redes neuronales (Ben Ayed & Hanana, 2021). Por ejemplo, en la preproducción, la AI ayuda a predecir la calidad del suelo y las necesidades de riego (Ben Ayed y Hanana, 2021).

Tabla 3 - Aplicaciones de AI en la agricultura

<i>Etapas</i>	<i>Aplicación de AI</i>
<i>Preproducción</i>	Previsión del rendimiento de los cultivos, cartografía de las propiedades del suelo, optimización del riego
<i>Producción</i>	Detección de enfermedades, predicción meteorológica, cosecha inteligente
<i>Procesamiento</i>	Control de calidad, detección de fraudes, eficiencia del procesamiento
<i>Distribución</i>	Supervisión del almacenamiento, logística del transporte, análisis del consumidor

elaborada por la autora con información basada en datos de: Ben Ayed & Hanana, 2021

Estas innovaciones, junto con tecnologías como drones o blockchain, apoyan una transformación de la agricultura basada en los datos, abordando tanto la seguridad alimentaria como los desafíos medioambientales (Javaid et al., 2022; Ben Ayed & Hanana, 2021).

La agricultura inteligente es una combinación de AI, automatización e Internet de las Cosas (IoT) para reducir el impacto ambiental de la agricultura y aumentar la eficiencia y la productividad. Mediante el uso de herramientas basadas en la AI, como el análisis predictivo y la sensorización del suelo en tiempo real, los agricultores pueden tomar decisiones informadas que optimizan el uso del agua, minimizan los residuos y reducen las emisiones de gases de

efecto invernadero (Gomstyn y Jonker, 2023). Por ejemplo, los sistemas de riego basados en la nube en zonas propensas a la sequía como Texas y California han permitido mejorar el rendimiento y la conservación del agua, lo que demuestra el potencial de la tecnología para promover la agricultura sostenible (Gomstyn & Jonker, 2023).

La robótica y los drones también son fundamentales para la agricultura inteligente, ya que permiten la aplicación selectiva de fertilizantes y pesticidas. Esta precisión reduce el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas, uno de los principales factores de degradación medioambiental (Gomstyn y Jonker, 2023). Además, los sensores permiten la detección temprana de infestaciones en los cultivos o enfermedades en el ganado, lo que garantiza intervenciones oportunas que favorecen el bienestar animal y reducen las pérdidas (Iberdrola, 2025).

La agricultura inteligente no sólo ayuda a mitigar el impacto climático de la producción alimentaria, sino que también mejora la calidad de los alimentos y la resiliencia del sistema (Gomstyn y Jonker, 2023; Tiseo, 2021). Al alinear la innovación tecnológica con prácticas sostenibles como la rotación de cultivos o la agrosilvicultura, la agricultura puede ser más eficiente en el uso de los recursos y más respetuosa con el medio ambiente (Tiseo, 2021). Así pues, la integración de la AI en la agricultura favorece tanto los objetivos ecológicos como la creciente demanda de alimentos en todo el mundo.

Sector secundario

El sector industrial es uno de los principales contribuyentes al consumo mundial de energía y a las emisiones de gases de efecto invernadero. A nivel mundial, la industria fue responsable de casi una cuarta parte de todas las emisiones de CO₂ en el mismo año (Comisión Europea et al., 2024). En Estados Unidos, representaba alrededor del 33% del uso total de energía en 2023, dependiendo principalmente de los combustibles fósiles (U.S. Energy Information Administration, 2023). En España, fue la segunda fuente de emisiones después del transporte (Burgueño Salas, 2024). La ineficiencia energética, la dependencia de recursos no renovables y los altos niveles de residuos materiales plantean retos continuos (Nurhaeni et al., 2024; Jamwal et al., 2021; Sah et al., 2024; Leong et al., 2024). Es urgente integrar procesos más sostenibles para apoyar los objetivos climáticos y la conservación de recursos a largo plazo.

Las tecnologías de AI están transformando las operaciones industriales al permitir la optimización energética en tiempo real, el mantenimiento predictivo y la automatización de

procesos. La aplicación de la AI en la fabricación ha dado lugar a reducciones de hasta el 30% en el uso de energía y a descensos significativos en las emisiones de CO₂ (Nurhaeni et al., 2024). Estas mejoras son posibles gracias a sistemas de control impulsados por AI y análisis de datos que adaptan la producción a la demanda, detectan ineficiencias y reducen los residuos operativos (Nurhaeni et al., 2024).

La fabricación inteligente combina AI, digital twins, IoT y automatización para mejorar la productividad y la sostenibilidad. Siemens es líder mundial en este ámbito (Leong et al., 2024). A través de tecnologías como sus plataformas Industrial Edge y MindSphere, Siemens permite la captura y el análisis de datos en tiempo real, el mantenimiento predictivo y la robótica adaptativa (Leong et al., 2024). Su uso de digital twins permite la simulación del ciclo completo y la optimización de los procesos industriales (Leong et al., 2024). En la fábrica inteligente de Amberg en Alemania, estas innovaciones se han traducido en una mayor flexibilidad de la producción, una reducción de los tiempos de inactividad y una mejora de la calidad del producto (Leong et al., 2024).

A pesar de su potencial, la integración de la AI en la fabricación se enfrenta a obstáculos. Muchos de los sistemas industriales existentes se basan en tecnologías obsoletas que no son compatibles con las herramientas de AI de uso intensivo de datos, lo que obliga a actualizar los sistemas (Sah et al., 2024). Además, la escasez de trabajadores cualificados en AI, ciencia de datos e integración de sistemas obstaculiza el uso (Sah et al., 2024). La calidad y la estandarización de los datos siguen siendo preocupaciones importantes, ya que los datos incoherentes o no integrados reducen la eficacia de la Inteligencia Artificial (Sah et al., 2024).

Sector terciario

En comparación con la agricultura o la producción, las empresas del sector servicios generalmente tienen un menor impacto medioambiental directo. Sin embargo, áreas como la eficiencia de la energía de los edificios de oficinas y la gestión de instalaciones pueden ofrecer un potencial significativo para reducir la huella medioambiental (de Querol Cumbreira & Todorova, 2023; Bosch Energy and Building Solutions Deutschland, 2025).

Sin embargo, las empresas de este sector pueden contribuir significativamente a los objetivos climáticos, por ejemplo, centrándose en sus infraestructuras, especialmente en los edificios en los que operan. El entorno construido, incluidos los edificios de oficinas, es uno de los principales responsables de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. Alrededor

del 40% de las emisiones totales están relacionadas con los edificios y la construcción, y la mayor parte procede del uso de energía operativa, como la calefacción, la refrigeración, la iluminación y el funcionamiento de los electrodomésticos (de Querol Cumbreira & Todorova, 2023).

En este contexto, las tecnologías de AI pueden desempeñar un papel crucial al permitir la creación y optimización de edificios inteligentes. Estos edificios aprovechan los sistemas interconectados, los sensores IoT y la automatización para reducir el consumo de recursos, mejorar la comodidad de los ocupantes y mantener la seguridad (Bosch Energy and Building Solutions Deutschland, 2025; Fundación Endesa, 2025). Los edificios inteligentes pueden responder activamente a los datos medioambientales y operativos en tiempo real, mejorando la eficiencia de la iluminación, los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado y el uso de electrodomésticos (Comisión Europea, 2023; Fundación Endesa, 2025).

Los sistemas asistidos por AI son especialmente valiosos para hacer que los edificios sean más transparentes y receptivos. A través de gemelos digitales – representaciones virtuales de espacios físicos –, las empresas pueden simular condiciones ambientales ideales, controlar el rendimiento y reducir el despilfarro de energía (Bosch Energy and Building Solutions Deutschland, 2025; Fundación Endesa, 2025). Estas capacidades son cada vez más esenciales dado el aumento de los costes energéticos, los nuevos requisitos de información sobre sostenibilidad y la flexibilidad necesaria para los entornos de trabajo modernos (Bosch Energy and Building Solutions Deutschland, 2025).

Además, la integración de tecnologías inteligentes en los edificios no se limita a las nuevas construcciones. La reconversión de estructuras existentes con sistemas inteligentes – como iluminación inteligente, soluciones de ahorro de agua y fuentes de energía renovables como paneles solares en los tejados – puede reducir significativamente las emisiones operativas (de Querol Cumbreira y Todorova, 2023).

Conclusiones

A lo largo de este trabajo se ha demostrado que la inteligencia artificial puede desempeñar un papel fundamental en el desarrollo de la sostenibilidad empresarial. En un contexto global marcado por el cambio climático, la escasez de recursos y una presión creciente por parte de los stakeholders, las empresas se enfrentan a la necesidad urgente de transformar sus modelos operativos hacia prácticas más sostenibles. La AI, con su capacidad para recopilar, analizar y aplicar grandes volúmenes de datos, representa una herramienta estratégica clave para alcanzar estos objetivos.

Los distintos capítulos han evidenciado que la AI puede mejorar la eficiencia energética y la gestión de recursos como el agua y los materiales. A través de aplicaciones como el mantenimiento predictivo, la optimización de procesos o la gestión inteligente de edificios, la AI contribuye a reducir emisiones, minimizar residuos y aumentar la transparencia operativa.

Sin embargo, también se han analizado las limitaciones y retos que acompañan a la adopción de estas tecnologías. El impacto ambiental de los modelos de AI – especialmente en términos de consumo energético y de agua – así como la falta de transparencia por parte de los desarrolladores, plantean interrogantes importantes sobre la sostenibilidad de la propia AI.

Por otro lado, el uso de AI varía considerablemente según el tamaño de la empresa, la región geográfica y el sector económico. Mientras que las grandes corporaciones ya están aplicando sistemas avanzados para cumplir con los estándares ESG, las pequeñas y medianas empresas enfrentan barreras importantes como la falta de recursos y conocimiento. No obstante, también ellas pueden beneficiarse de soluciones de AI accesibles que les permitan mejorar su rendimiento ambiental y su competitividad.

En definitiva, la AI no es una solución mágica, pero sí una palanca poderosa para acelerar la transición hacia una economía más sostenible. Su verdadero potencial reside en integrarla de forma estratégica y responsable dentro de los procesos empresariales, con una visión clara de los objetivos de sostenibilidad. Solo así será posible construir modelos de negocio que no solo generen valor económico, sino que también respeten los límites del planeta y promuevan un desarrollo más justo para las generaciones futuras.

Declaración del Uso de Herramientas de Inteligencia Artificial Generativa

Por la presente, yo, Alina Julia Horn, estudiante de Grado en Administración y Dirección de Empresas, con Mención Internacional (E4), de la Universidad Pontificia Comillas al presentar mi Trabajo Fin de Grado titulado " La contribución de la Inteligencia Artificial al desarrollo de la sostenibilidad empresarial", declaro que he utilizado la herramienta de Inteligencia Artificial Generativa ChatGPT u otras similares de IAG de código sólo en el contexto de las actividades descritas a continuación:

1. **Constructor de plantillas:** Para diseñar formatos específicos para secciones del trabajo.
2. **Corrector de estilo literario y de lenguaje:** Para mejorar la calidad lingüística y estilística del texto.
3. **Revisor:** Para recibir sugerencias sobre cómo mejorar y perfeccionar el trabajo con diferentes niveles de exigencia.
4. **Traductor:** Para traducir textos de un lenguaje a otro.

Afirmo que toda la información y contenido presentados en este trabajo son producto de mi investigación y esfuerzo individual, excepto donde se ha indicado lo contrario y se han dado los créditos correspondientes (he incluido las referencias adecuadas en el TFG y he explicitado para que se ha usado ChatGPT u otras herramientas similares). Soy consciente de las implicaciones académicas y éticas de presentar un trabajo no original y acepto las consecuencias de cualquier violación a esta declaración.

Fecha: *Madrid, 02.06.2025*

Firma: *Alina Horn*

Declaración sobre el Trabajo Científico

Por la presente, declaro que he redactado este trabajo de forma autónoma, sin utilizar más fuentes ni medios auxiliares que los indicados, y que he señalado como tales todas las partes que han sido citadas literalmente o parafraseadas. Asimismo, confirmo haber respetado el Reglamento General de Estudios y Evaluación de Grado y Máster de la Universidad Pontificia Comillas ICADE, así como las normas específicas del programa de estudios y las directrices para garantizar las buenas prácticas científicas de esta universidad.

Declaro igualmente que este trabajo, o partes del mismo, no forman parte de ninguna otra evaluación académica, ni en esta institución ni en ninguna otra.

Madrid, 02.06.2025 Alina Horn

Alina Julia Horn

Lista de referencias

- Abdalla, A. N., Nazir, M. S., Tao, H., Cao, S., Ji, R., Jiang, M., & Yao, L. (2021). Integration of energy storage system and renewable energy sources based on artificial intelligence: An overview. *Journal of Energy Storage*, 40(40), 102811. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102811>
- Abdul-Azeez, O. Y., Nwabekee, U. S., Ebele Agu, E., & Ignatius Ijomah, T. (2024). Strategic approaches to sustainability in multinational corporations: A comprehensive review. *International Journal of Frontline Research in Science and Technology*, 3(2), 38–54. <https://doi.org/10.56355/ijfrst.2024.3.2.0046>
- Aderibigbe, A. O., Ohenhen, P. E., Nwaobia, N. K., Gidiagba, J. O., & Ani, E. C. (2023). ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DEVELOPING COUNTRIES: BRIDGING THE GAP BETWEEN POTENTIAL AND IMPLEMENTATION. *Computer Science & IT Research Journal*, 4(3), 185–199. <https://doi.org/10.51594/csitrj.v4i3.629>
- Ahmad, T., Zhu, H., Zhang, D., Tariq, R., Bassam, A., Ullah, F., AlGhamdi, A. S., & Alshamrani, S. S. (2021). Energetics Systems and artificial intelligence: Applications of industry 4.0. *Energy Reports*, 8, 334–361. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.256>
- Al-Saleh, H. (2023, January 6). *Why big business must support SMEs for growth and net zero*. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/stories/2023/01/why-big-businesses-must-support-smes-growth-net-zero/>
- Alainati, S., Al-Hunaiyyan, A., Al-Duaiji, A., & Al-Hammad, F. (2024). INVESTIGATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN SMALL AND MEDIUM-SIZED ENTERPRISES: A CASE STUDY OF THE COLLEGE OF BUSINESS STUDIES. *International Journal of EBusiness and EGovernment Studies (IJELEG)*, 16(3), 115–136. <https://doi.org/10.34109/ijeleg.2024160306>
- Alloghani, M. A. (2023). *Artificial Intelligence and Sustainability* (1st ed.). Springer Cham. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-45214-7>
- Balassiano, E., Gu, C., & Taqi, J. E. (2025, March 25). *AI in water management: Balancing innovation and consumption* | White & Case LLP. Whitecase.com; White & Case. <https://www.whitecase.com/insight-our-thinking/ai-water-management-balancing-innovation-and-consumption>

Bank of America. (2024, December 3). *Boost Savings and Sustainability Through Energy Efficiency*. Bank of America. <https://business.bankofamerica.com/resources/savings-and-sustainability-through-energy-efficiency.html>

BBC. (2024). *Sectors of industry - Role of business in society - National 5 Business management Revision*. BBC Bitesize. <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zy4yh39/revision/3>

Ben Ayed, R., & Hanana, M. (2021). Artificial Intelligence to Improve the Food and Agriculture Sector. *Journal of Food Quality*, 2021(1), 1–7. <https://doi.org/10.1155/2021/5584754>

Bosch Energy and Building Solutions Deutschland. (2025). *Smart Buildings: Definition und Lösungen*. Bosch Energy and Building Solutions Deutschland. <https://www.boschbuildingsolutions.com/de/de/trends-und-themen/smart-buildings/>

British Chambers of Commerce. (2021, August 9). *Carbon footprint a mystery to 9 out of 10 small businesses*. www.britishchambers.org.uk; BCC. <https://www.britishchambers.org.uk/news/2021/08/carbon-footprint-a-mystery-to-9-out-of-10-small-businesses/>

Brundtland Commission. (1987). *Report of the world commission on environment and development: Our common future*. United Nations. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>

Burgueño Salas, E. (2024, April 24). *Spain: greenhouse gas emissions share by sector*. Statista; elEconomista. <https://www.statista.com/statistics/1322798/distribution-of-ghg-emissions-by-sector-spain/>

Business Wire. (2025, March 13). *New Solution by Clarity AI Enables Analysts to Conduct Sustainability Research in a Fraction of the Time*. APNews.com; AP News. <https://apnews.com/press-release/business-wire/artificial-intelligence-north-america-cd4428050f6b4074955f6628cb45d8d2>

Cambridge University Press. (2025). *Cambridge Dictionary*. Cambridge Dictionary; Cambridge University Press. <https://dictionary.cambridge.org/>

Canals, J., & Heukamp, F. (2020). *The Future of Management in an AI World: Redefining Purpose and Strategy in the Fourth Industrial Revolution*. IESE Business School.

Chen, C., Hu, Y., Karuppiah, M., & Kumar, P. M. (2021). Artificial intelligence on economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47(47), 101358. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101358>

Chen, L., Chen, Z., Zhang, Y., Liu, Y., Osman, A. I., Farghali, M., Hua, J., Al-Fatesh, A., Ihara, I., Rooney, D. W., & Yap, P.-S. (2023). Artificial intelligence-based solutions for climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *21*(5), 2525–2557. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01617-y>

Choudhary, M. P., & Garg, V. (2013, August). *Causes, Consequences and Control of Air Pollution*. All India Seminar on Methodologies for Air Pollution Control, Jaipur, Rajasthan, India. https://www.researchgate.net/profile/Dr-Mahendra-Choudhary/publication/279202084_Causes_Consequences_and_Control_of_Air_Pollution/links/55966ac008ae5d8f39313c98/Causes-Consequences-and-Control-of-Air-Pollution.pdf

Cowls, J., Tsamados, A., Taddeo, M., & Floridi, L. (2021). The AI gambit: Leveraging Artificial Intelligence to Combat Climate change—opportunities, challenges, and Recommendations. *AI & SOCIETY*, *38*(1). <https://doi.org/10.1007/s00146-021-01294-x>

Dada, M. A., Majemite, M. T., Obaigbena, A., Daraojimba, O. H., Oliha, J. S., & Nwokiedegwu, Z. Q. S. (2024). Review of smart water management: IoT and AI in water and wastewater treatment. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, *21*(1), 1373–1382. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.0171>

Dannouni, A., Deutscher, S. A., Dezzaz, G., Elman, A., Gawel, A., Hanna, M., Hyland, A., Kharij, A., Maher, H., Patterson, D., Jones, E. R., Rothenberg, J., Tber, H., Texier, M., & Ziat, A. (2023, November 20). *How AI Can Speed Climate Action*. BCG Global; Boston Consulting Group. <https://www.bcg.com/publications/2023/how-ai-can-speedup-climate-action>

de Querol Cumbreira, F., & Todorova, M. (2023). *Environmental sustainability in the building sector*. Statista. <https://www.statista.com/study/147140/environmental-sustainability-in-the-building-sector/>

de Vries, A. (2023). The growing energy footprint of artificial intelligence. *Joule*, *7*(10), 2191–2194. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.09.004>

Diccionario de la lengua española. (2024). *inteligencia* | *Diccionario de la lengua española*. “Diccionario de La Lengua Española” - Edición Del Tricentenario; Real Academia Española. <https://dle.rae.es/inteligencia>

Downie, A., & Finn, T. (2024, May 21). *What Is AI in Supply Chain?* | IBM. www.ibm.com; IBM. <https://www.ibm.com/think/topics/ai-supply-chain>

- Duden. (2024). *Duden | Sprache sagt alles*. Www.duden.de. <https://www.duden.de/>
- Egbueri, J. C. (2022). Predicting and analysing the quality of water resources for industrial purposes using integrated data-intelligent algorithms. *Groundwater for Sustainable Development*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100794>
- Elkington, J. (1998). Accounting for the Triple Bottom Line. *Measuring Business Excellence*, 2(3), 1–6. <https://johnelkington.com/archive/TBL-elkington-chapter.pdf>
- European Commission. (2023, December 8). *Overview Article - Smart buildings and smart technologies in Europe: state of play and perspectives | BUILD UP*. Build-Up.ec.europa.eu. <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/overview-article-smart-buildings-and-smart-technologies-europe-state>
- European Commission. (2025). *Groundwater*. European Commission - Environment; European Commission. https://environment.ec.europa.eu/topics/water/groundwater_en#overview
- European Commission; EDGAR/JRC; Expert(s) (Crippa et al.); IEA; Statista. (2024, January 8). *Share of global CO2 emissions by sector 2020*. Statista; European Commission; EDGAR/JRC; Expert(s) (Crippa et al.); IEA; Statista. <https://www.statista.com/statistics/1129656/global-share-of-co2-emissions-from-fossil-fuel-and-cement/>
- European Parliament. (2023, May 24). *Circular Economy: Definition, Importance and Benefits*. European Parliament. <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>
- Fang, B., Yu, J., Chen, Z., Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., Hamza, E. H., Rooney, D. W., & Yap, P.-S. (2023). Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01604-3>
- FAO Aquastat. (2025, March). *Water withdrawal shares worldwide by sector*. Statista; FAO (Aquastat). <https://www.statista.com/statistics/1258433/water-withdrawals-shares-worldwide-by-sector/>
- Fetzer, J. H. (1990). What is Artificial Intelligence? *Artificial Intelligence: Its Scope and Limits*, 4(1), 4–26. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1900-6_1
- Folorunso, A., Olanipekun, K., Adewumi, T., & Samuel, B. (2024). A policy framework on AI usage in developing countries and its impact. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 21(1), 154–166. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2024.21.1.0192>

Fountaine, T., Mccarthy, B., & Saleh, T. (2019). *Building the AI-Powered Organization*. Harvard Business Review. https://wuyuansheng.com/doc/Databricks-AI-Powered-Org__Article-Licensing-July21-1.pdf

Füller, J., Hutter, K., Wahl, J., Bilgram, V., & Tekic, Z. (2022). How AI revolutionizes innovation management – Perceptions and implementation preferences of AI-based innovators. *Technological Forecasting and Social Change*, 178(178). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121598>

Fundación Endesa. (2025). *Smart building casa domótica*. Endesa. <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/smart-building-casa-domotica>

Garske, B., Bau, A., & Ekardt, F. (2021). Digitalization and AI in European Agriculture: A Strategy for Achieving Climate and Biodiversity Targets? *Sustainability*, 13(9), 4652. <https://doi.org/10.3390/su13094652>

George, G., & Schillebeeckx, S. J. D. (2022). Digital transformation, sustainability, and purpose in the multinational enterprise. *Journal of World Business*, 57(3). <https://doi.org/10.1016/j.jwb.2022.101326>

George, M., O'Regan, K., & Holst, A. (2022, May 23). *Digital technologies can cut global emissions by 20%. Here's how*. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/stories/2022/05/how-digital-solutions-can-reduce-global-emissions/>

Ghobakhloo, M., Fathi, M., Iranmanesh, M., Vilkas, M., Grybauskas, A., & Amran, A. (2024). Generative artificial intelligence in manufacturing: opportunities for actualizing Industry 5.0 sustainability goals. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 35(9), 94–121. <https://doi.org/10.1108/jmtm-12-2023-0530>

Global Carbon Atlas, & Statista. (2023, November 13). *CO2 emissions by country*. Statista; Statista & Global Carbon Atlas. <https://www.statista.com/statistics/271748/the-largest-emitters-of-co2-in-the-world/>

Global Carbon Project. (2024, November). *CO2 emissions worldwide by key country 2018*. Statista; Global Carbon Project. <https://www.statista.com/statistics/270499/co2-emissions-in-selected-countries/>

Gomstyn, A., & Jonker, A. (2023, December 10). *Smart farming*. Ibm.com; IBM. <https://www.ibm.com/think/topics/smart-farming>

- González, M. S., Román, C. B., Lagos, C. R., & Lombana, G. V. (2025). Business management of sustainability, CSR and Artificial Intelligence. A new frontier in decision-making. *Región Científica*, 4(1). <https://doi.org/10.58763/rc2025382>
- Haefner, N., Wincent, J., Parida, V., & Gassmann, O. (2020). Artificial Intelligence and Innovation management: A review, framework, and research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, 162(120392). sciencedirect. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120392>
- Hallegatte, S. (2014). *Natural Disasters and Climate Change*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08933-1>
- Höfer, S. (2016). Lean Sales: Steigerung des Wertschöpfungsanteils in Vertriebsprozessen. In *Erfolgsfaktor Lean Management 2.0* (pp. 189–208). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49752-4_11
- Iberdrola. (2025). *Smart farming, precision agriculture to achieve a more sustainable world*. Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/innovation/smart-farming-precision-agriculture>
- IBM. (2022, May). *AI adoption rate selected countries 2022*. Statista; IBM. <https://www.statista.com/statistics/1378695/ai-adoption-rate-selected-countries/>
- IBM. (2023, June 6). *AI vs. machine learning vs. deep learning vs. neural networks | IBM*. Wwww.ibm.com; IBM. <https://www.ibm.com/think/topics/ai-vs-machine-learning-vs-deep-learning-vs-neural-networks>
- IBM. (2025, February 24). *How does AI improve efficiency?* IBM; IBM. <https://www.ibm.com/think/insights/how-does-ai-improve-efficiency>
- IBM Data and AI Team. (2023, October 12). *Types of Artificial Intelligence | IBM*. Wwww.ibm.com; IBM. <https://www.ibm.com/think/topics/artificial-intelligence-types>
- IBM, & Morning Consult. (2023, November). *AI adoption rate selected countries 2023*. Statista; IBM; Morning Consult. <https://www.statista.com/statistics/1462656/ai-adoption-rate-numerous-countries/>
- International Monetary Fund. (2025). *Climate Change Indicators Dashboard*. Climatedata.imf.org. <https://climatedata.imf.org/>

- Isabelle, D. A., & Westerlund, M. (2022). A Review and Categorization of Artificial Intelligence-Based Opportunities in Wildlife, Ocean and Land Conservation. *Sustainability*, 14(4), 1979. <https://doi.org/10.3390/su14041979>
- Jamali, D., & Karam, C. (2016). Corporate social responsibility in developing countries as an emerging field of study. *International Journal of Management Reviews*, 20(1), 32–61. <https://doi.org/10.1111/ijmr.12112>
- Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., & Giallanza, A. (2021). Industry 4.0 Technologies for Manufacturing Sustainability: A Systematic Review and Future Research Directions. *Applied Sciences*, 11(12). MDPI. <https://doi.org/10.3390/app11125725>
- Javaid, M., Haleem, A., Khan, I. H., & Suman, R. (2022). Understanding the potential applications of Artificial Intelligence in Agriculture Sector. *Advanced Agrochem*, 2(1), 15–30. ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/j.aac.2022.10.001>
- Jiang, Y., Li, X., Luo, H., Yin, S., & Kaynak, O. (2022). Quo vadis artificial intelligence? *Discover Artificial Intelligence*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44163-022-00022-8>
- Jobin, A., Ienca, M., & Vayena, E. (2019). The global landscape of AI ethics guidelines. *Nature Machine Intelligence*, 1(9), 389–399. <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0088-2>
- Kemene, E., Valkhof, B., & Tladi, T. (2024, July 22). *AI and energy: Will AI reduce emissions or increase demand?* World Economic Forum; World Economic Forum. <https://www.weforum.org/stories/2024/07/generative-ai-energy-emissions/>
- Khan, M. S., Umer, H., & Faruqe, F. (2024). Artificial intelligence for low income countries. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03947-w>
- Kolk, A. (2005). Sustainability reporting. *VBA Journaal*, 21(3), 34–42. University of Amsterdam. <https://dare.uva.nl/search?identifier=fe0a3f48-dde4-4d2d-80eb-d993d29e6541>
- Kovačić, M., Mutavdžija, M., Buntak, K., & Pus, I. (2022). Using Artificial Intelligence for Creating and Managing Organizational Knowledge. *Tehnicki Vjesnik - Technical Journal*, 29(4), 1413–1418. <https://doi.org/10.17559/tv-20211222120653>
- KPMG International. (2024, November). *Sustainability reporting rates of firms worldwide from 2011 to 2024, by region*. Statista; KPMG International. <https://www.statista.com/statistics/1338724/sustainability-reporting-rates-worldwide/>

- Lakhout, A. (2025). Revolutionizing urban solid waste management with AI and IoT: A review of smart solutions for waste collection, sorting, and recycling. *Results in Engineering*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104018>
- Leong, W. Y., Leong, Y. Z., & Leong, W. S. (2024, January 12). Smart Manufacturing Technology for Environmental, Social, and Governance (ESG) Sustainability. *IEEE. 5th Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)*, Yunlin, Taiwan. <https://doi.org/10.1109/ecice59523.2023.10383150>
- Lewis, J. K. (2016). *Corporate Social Responsibility/Sustainability Reporting among the Fortune Global 250: Greenwashing or Green Supply Chain?* University of Rhode Island; Salve Regina University. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2850721>
- Li, P., Yang, J., Islam, M., & Ren, S. (2023). *Making AI Less “Thirsty”: Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models*. Cornell University. <https://arxiv.org/pdf/2304.03271>
- LinkedIn, & Stanford University. (2023, April). *Worldwide: AI talent concentration 2023, by region* | Statista. Statista. <https://www.statista.com/statistics/1472176/ai-talent-concentration-by-region/>
- Lu, S., & Serafeim, G. (2023, June 12). *How AI Will Accelerate the Circular Economy*. Harvard Business Review. <https://hbr.org/2023/06/how-ai-will-accelerate-the-circular-economy>
- Mannuru, N. R., Shahriar, S., Teel, Z. A., Wang, T., Lund, B., Tijani, S., Pohboon, C. O., Agbaji, D., Alhassan, J. K., Galley, J., Kousari, R., Ogbadu-Oladapo, L., Saurav, S., Srivastava, A., Tummuru, S. P., Uppala, S., & Vaidya, P. (2023). Artificial Intelligence in Developing countries: the Impact of Generative Artificial Intelligence (AI) Technologies for Development. *Information Development*. <https://doi.org/10.1177/02666669231200628>
- Marano, V., Wilhelm, M., Kostova, T., Doh, J., & Beugelsdijk, S. (2024). Multinational Firms and Sustainability in Global Supply chains: Scope and Boundaries of Responsibility. *Journal of International Business Studies*, 55. <https://doi.org/10.1057/s41267-024-00706-6>
- Maslej, N., Fattorini, L., Perrault, R., Parli, V., Reuel, A., Brynjolfsson, E., Etchemendy, J., Ligett, K., Lyons, T., Manyika, J., Niebles, J. C., Shoham, Y., Wald, R., & Clark, J. (2024). Artificial Intelligence Index Report 2024. In *HAI Stanford University* (pp. 155–156). AI Index Steering Committee. https://hai-production.s3.amazonaws.com/files/hai_ai-index-report-2024-smaller2.pdf

Mayer, H., Yee, L., Chui, M., & Roberts, R. (2025, January 28). *Superagency in the workplace: Empowering people to unlock AI's full potential*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/superagency-in-the-workplace-empowering-people-to-unlock-ais-full-potential-at-work>

McCarthy, J. (1955, August 31). *A proposal for the Dartmouth summer research project on Artificial Intelligence*. Www-Formal.stanford.edu. <https://www-formal.stanford.edu/jmc/history/dartmouth/dartmouth.html>

McGrath, A., & Jonker, A. (2024, March 14). *Sustainable Supply Chain Management*. Ibm.com; IBM. <https://www.ibm.com/think/topics/sustainable-supply-chain-management>

McKinsey. (2019, January 23). *Artificial intelligence and the circular economy: AI as a tool to accelerate the transition* | McKinsey. Www.mckinsey.com; McKinsey Sustainability. <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/artificial-intelligence-and-the-circular-economy-ai-as-a-tool-to-accelerate-the-transition>

McKinsey & Company. (2024, May 30). *The state of AI in early 2024: Gen AI adoption spikes and starts to generate value* | McKinsey. Www.mckinsey.com; McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai>

Meadowcroft, J. (2019). sustainability | Description, Theories, & Practices. In *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/sustainability>

Microsoft. (2025). *Improving Sustainability with AI* | Microsoft Sustainability. Microsoft.com. <https://www.microsoft.com/en-us/sustainability/learning-center/improving-sustainability-with-ai>

Mitchell, T. (1997). *Machine Learning*. <https://www.cs.cmu.edu/~tom/files/MachineLearningTomMitchell.pdf>

Miyan, M. A. (2015). Droughts in Asian Least Developed Countries: Vulnerability and sustainability. *Weather and Climate Extremes*, 7, 8–23. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.06.003>

Munsif, R., Zubair, M., Aziz, A., & Nadeem Zafar, M. (2021). Industrial Air Emission Pollution: Potential Sources and Sustainable Mitigation. In R. Viskup (Ed.), *Environmental Emissions*.

Naveen Joshi. (2019, June 26). 7 Types Of Artificial Intelligence. *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/cognitiveworld/2019/06/19/7-types-of-artificial-intelligence/>

- Neike, C. (2025, March 13). *AI for sustainability - Industrial Use Case - Cedrik Neike*. I by IMD. <https://www.imd.org/ibyimd/artificial-intelligence/how-ai-will-help-us-pursue-sustainability-goals-the-industrial-use-case/>
- Nishant, R., Kennedy, M., & Corbett, J. (2020). Artificial intelligence for sustainability: Challenges, opportunities, and a research agenda. *International Journal of Information Management*, 53, 102104. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102104>
- Nurhaeni, H., Delhi, A., Daeli, O. P. M., Anjani, S. A., & Yusuf, N. A. (2024). Optimizing Electrical Energy Use through AI: An Integrated Approach for Efficiency and Sustainability. *International Transactions on Artificial Intelligence (ITALIC)*, 2(2), 106–113. <https://doi.org/10.33050/italic.v2i2.533>
- Oxford English Dictionary. (2023). *artificial intelligence, n. meanings, etymology and more* | Oxford English Dictionary. [www.oed.com. https://www.oed.com/dictionary/artificial-intelligence_n?tab=meaning_and_use#38531565](https://www.oed.com/dictionary/artificial-intelligence_n?tab=meaning_and_use#38531565)
- Pannu, A. (2015). Artificial Intelligence and its Application in Different Areas. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 4(10).
- Patagonia. (2021, March 10). *Our Quest for Circularity - Patagonia Stories*. Patagonia.com; Patagonia. <https://www.patagonia.com/stories/our-quest-for-circularity/story-96496.html?msockid=384bf2e5fd256f4210a5e669fc0e6e52>
- Peng, X., Li, J., Tang, Q., Lan, Y., & Cui, X. (2023). Do environmental scores become multinational corporations' strategic “greenwashing” tool for window-dressing carbon reduction? A cross-cultural analysis. *Business Strategy and the Environment*, 33(3). <https://doi.org/10.1002/bse.3586>
- Raj, M., & Seamans, R. (2019). Primer on artificial intelligence and robotics. *Journal of Organization Design*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s41469-019-0050-0>
- Ramos, L., Rivas Echeverría, F., Pérez, A. G., & Casas, E. (2023). Artificial intelligence and sustainability in the fashion industry: a review from 2010 to 2022. *SN Applied Sciences*, 5(12). <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05587-2>
- Raper, R., Boeddinghaus, J., Coeckelbergh, M., Gross, W., Campigotto, P., & Lincoln, C. N. (2022). Sustainability Budgets: A Practical Management and Governance Method for

- Achieving Goal 13 of the Sustainable Development Goals for AI Development. *Sustainability*, 14(7), 4019. <https://doi.org/10.3390/su14074019>
- Rattalino, F. (2017). Circular advantage anyone? Sustainability-driven innovation and circularity at Patagonia, Inc. *Thunderbird International Business Review*, 60(5), 747–755. <https://doi.org/10.1002/tie.21917>
- Ravishankara, A. R., Daniel, J. S., & Portmann, R. W. (2009). Nitrous Oxide (N₂O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century. *Science*, 326(5949), 123–125. <https://doi.org/10.1126/science.1176985>
- Riley, T. (2017, July 10). *Just 100 companies responsible for 71% of global emissions, study says*. The Guardian; The Guardian. <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/jul/10/100-fossil-fuel-companies-investors-responsible-71-global-emissions-cdp-study-climate-change>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2019, November). *Outdoor Air Pollution*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/outdoor-air-pollution>
- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2024, January). *Greenhouse gas emissions*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>
- Sah, B. P., Begum, S., Bhuiyan, M. R., & Shahjalal, M. (2024). THE ROLE OF AI IN PROMOTING SUSTAINABILITY WITHIN THE MANUFACTURING SUPPLY CHAIN ACHIEVING LEAN AND GREEN OBJECTIVES. *ACADEMIC JOURNAL on BUSINESS ADMINISTRATION, INNOVATION & SUSTAINABILITY*, 4(3), 79–93. <https://doi.org/10.69593/ajbais.v4i3.97>
- Saleh, S. (2025, March 27). *Topic: AI industry in MENA*. Statista. <https://www.statista.com/topics/13351/ai-industry-in-mena/#topicOverview>
- Sanford, J. E., & Sandhu, A. (2002). Developing Countries: Definitions, Concepts and Comparisons. In *Policyarchive.org*. Library of Congress. Congressional Research Service. <https://www.policyarchive.org/handle/10207/1566>
- Schank, R. C. (1987). What Is AI, Anyway? *AI Magazine*, 8(4), 59–65. <https://doi.org/10.1609/aimag.v8i4.623>

Schneider Electric. (2024, June). *AI global power consumption forecast 2028* | Statista. Statista; Schneider Electric. <https://www.statista.com/statistics/1536969/ai-electricity-consumption-worldwide/>

Shoushtari, F., Ghafourian, E., & Talebi, M. (2021). Improving Performance of Supply Chain by Applying Artificial Intelligence. *International Journal of Industrial Engineering and Operational Research*, 3(1), 14–23. <https://bgsiran.ir/journal/ojs-3.1.1-4/index.php/IJIEOR/article/download/43/33>

Siahaan, M. (2024, September 24). *Topic: Artificial Intelligence (AI) in Indonesia*. Statista. <https://www.statista.com/topics/12740/artificial-intelligence-ai-in-indonesia/#topicOverview>

Siemens. (2025). *Smart manufacturing is sustainable manufacturing*. Siemens.com. <https://www.siemens.com/global/en/company/stories/industry/2025/production-sustainability-digital-enterprise-twin.html>

Silvestre, B. S., Silva, M. E., Cormack, A., & Thome, A. M. T. (2020). Supply chain sustainability trajectories: learning through sustainability initiatives. *International Journal of Operations & Production Management*, 40(9), 1301–1337. <https://doi.org/10.1108/ijopm-01-2020-0043>

Slotta, D. (2025, March 14). *Topic: Artificial intelligence in China*. Statista. <https://www.statista.com/topics/8383/artificial-intelligence-in-china/#topicOverview>

Smith, R. G., & Eckroth, J. (2017). Building AI Applications: Yesterday, Today, and Tomorrow. *AI Magazine*, 38(1), 6–22. <https://doi.org/10.1609/aimag.v38i1.2709>

Smolka, A. (2006). Natural disasters and the challenge of extreme events: risk management from an insurance perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1845), 2147–2165. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1818>

Srivastava, P. R., Mangla, S. K., Eachempati, P., & Tiwari, A. K. (2023). An explainable AI approach to understanding drivers of economic energy consumption and sustainability. *Energy Economics*, 125, 106868. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106868>

Stanford University. (2024a, April). *CO2 emission of AI models 2024* | Statista. Statista; Stanford University. <https://www.statista.com/statistics/1465353/total-co2-emission-of-ai-models/>

Stanford University. (2024b, April). *Worldwide: AI talent concentration 2023, by region* | Statista. Statista; Stanford University. <https://www.statista.com/statistics/1472176/ai-talent-concentration-by-region/>

Statista Market Insights. (2025, March). *AI Service Robotics - Worldwide* | Statista Market Forecast. Statista. <https://www.statista.com/outlook/tmo/artificial-intelligence/ai-robotics/ai-service-robotics/worldwide#methodology>

Statista, & Zero To Mastery. (2023, July). *Weekly AI tool usage by company size worldwide 2023*. Statista; Zero to Mastery. <https://www.statista.com/statistics/1450299/weekly-ai-tool-usage-company-size/>

Sun, S. (2025). *Powerhouse in the making: AI market in India* | Statista. Statista. <https://www.statista.com/study/198792/powerhouse-in-the-making-ai-market-in-india/>

The Batch. (2023, September 27). *Google's DeepMind Algorithms Boost Energy Efficiency*. DeepLearning.AI; The Batch. <https://www.deeplearning.ai/the-batch/google-deepmind-algorithms-dramatically-boost-energy-efficiency-data-centers/>

Tiseo, I. (2021, December). *Environmental impacts of the food industry*. Statista. <https://www.statista.com/study/102117/environmental-impacts-of-the-food-industry/>

Tiseo, I. (2024, November). *Annual carbon dioxide (CO₂) emissions worldwide from 1940 to 2023*. Statista; Global Carbon Budget. <https://www.statista.com/statistics/276629/global-co2-emissions/>

Tsolakis, N., Schumacher, R., Dora, M., & Kumar, M. (2022). Artificial intelligence and blockchain implementation in supply chains: a pathway to sustainability and data monetisation? *Annals of Operations Research*, 327(1), 157–210. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04785-2>

Tudi, M., Daniel Ruan, H., Wang, L., Lyu, J., Sadler, R., Connell, D., Chu, C., & Phung, D. T. (2021). Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>

Turrentine, J., & Mackenzie, J. (2023, October 31). *Air Pollution: Everything You Need to Know*. NRDC. <https://www.nrdc.org/stories/air-pollution-everything-you-need-know#causes>

U.S. Energy Information Administration. (2023, January). *U.S. energy consumption by sector 2020*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/239790/total-energy-consumption-in-the-united-states-by-sector/>

Ukonu, C. (2023, November 13). *4 ways AI can super-charge sustainable development*. World Economic Forum; World Economic Forum. <https://www.weforum.org/stories/2023/11/ai-sustainable-development/>

UN Global Compact. (2025). *Supply Chain Sustainability*. Unglobalcompact.org; UN Global Compact. <https://unglobalcompact.org/what-is-gc/our-work/supply-chain/>

UNCTAD. (2025, March). *UNCTADstat - Classifications*. Unctadstat.unctad.org. <https://unctadstat.unctad.org/EN/Classifications.html>

United Nations. (2024). *The 17 Sustainable Development Goals*. United Nations. <https://sdgs.un.org/goals>

United Nations Statistics Division. (2023, January 31). *UNSD — Environment Statistics*. Un.org; United Nations. <https://unstats.un.org/unsd/envstats/climate%20change/cisat.cshtml>

United States Environmental Protection Agency. (2023, July 16). *Basic Information about NO2*. US EPA. <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2>

US Small Business Administration. (2025, February 14). *AI for small business*. Sba.gov; US Small Business Administration. <https://www.sba.gov/business-guide/manage-your-business/ai-small-business>

van Wynsberghe, A. (2021). Sustainable AI: AI for Sustainability and the Sustainability of AI. *AI and Ethics*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s43681-021-00043-6>

Verganti, R., Vendraminelli, L., & Iansiti, M. (2020). Innovation and Design in the Age of Artificial Intelligence. *Journal of Product Innovation Management*, 37(3), 212–227. <https://doi.org/10.1111/jpim.12523>

Walch, K. (2025, February 18). *How AI Is Reshaping The Entire Supply Chain*. Forbes. <https://www.forbes.com/sites/kathleenwalch/2025/02/18/how-ai-is-reshaping-the-entire-supply-chain/>

Wilser, J. (2022, October 13). *How Small Businesses Can Have a Big Impact in the Climate Fight*. Time; Time. <https://time.com/6213434/climate-change-action-companies-businesses/>

Wood, J. (2021, November 9). *What does net zero emissions mean and how can we get there?* World Economic Forum. <https://www.weforum.org/stories/2021/11/net-zero-emissions-cop26-climate-change/>

World Economic Forum. (2018). *Harnessing Artificial Intelligence for the Earth*. https://www3.weforum.org/docs/Harnessing_Artificial_Intelligence_for_the_Earth_report_2018.pdf

World Health Organization. (2022). *Household air pollution data*. Wwww.who.int; WHO. <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution/household-air-pollution>

World Health Organization. (2024). *Air Pollution*. World Health Organization. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1

Wu, C.-J., Raghavendra, R., Gupta, U., Acun, B., Ardalani, N., Maeng, K., Chang, G., Aga, F., Huang, J., Bai, C., Gschwind, M., Gupta, A., Ott, M., Melnikow, A., Candido, S., Brooks, D., Chauhan, G., Lee, B., Lee, H.-H., & Akyildiz, B. (2022). SUSTAINABLE AI: ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS, CHALLENGES AND OPPORTUNITIES. In D. Marculescu, Y. Chi, & C. Wu (Eds.), *Proceedings of Machine Learning and Systems 4 (MLSys 2022)*. https://proceedings.mlsys.org/paper_files/paper/2022/file/462211f67c7d858f663355eff93b745e-Paper.pdf

Zhou, Z.-H. (2021). *Machine Learning*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1967-3> (Original work published 2016)