

**Inteligencia Artificial Verde
Curso 2023-24**

Nombre del/la estudiante: Miriam Rodrigues da Costa

E-mail: mrodrigues0@uoc.edu

Nombre del Tutor/a: Juan Anel Garcia

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	<i>Inteligencia Artificial Verde</i>
Nombre del/la estudiante:	<i>Miriam Rodrigues da Costa</i>
Nombre del Tutor/a:	<i>Juan Anel Garcia</i>
Fecha de entrega:	<i>01/07/2024</i>
Resumen del trabajo:	
<p>La presente investigación analiza los efectos que la inteligencia artificial provoca en la cadena de suministro. La implementación de estas innovaciones permite a las empresas alcanzar nuevos niveles de eficiencia operativa, optimización de costos y uso inteligente de recursos. Los desarrollos facilitan una perfecta sincronía entre las operaciones logísticas y los principios de sostenibilidad ambiental. Creando un modelo de negocio que es tanto rentable como ecológicamente responsable.</p> <p>Nuestro objetivo es desentrañar cómo la IA puede reformular el tejido de las cadenas de suministro, abarcando desde una perspectiva teórica hasta su aplicación efectiva en entornos operativos reales. Se analiza el estado actual de la inteligencia artificial en la optimización de procesos y se proyectan escenarios futuros, donde la tecnología avanzada se funde con métodos de gestión sostenible.</p> <p>Reconocemos tanto los retos como las barreras para su implementación, incluyendo cuestiones regulatorias y la adaptabilidad a cambios rápidos. Por esta razón, el trabajo busca ofrecer una visión integral y balanceada basándose en la literatura reciente. Destacando tanto las limitaciones como las oportunidades disruptivas que la tecnología presenta en el contexto de una economía globalizada. Se propone un análisis exhaustivo del potencial de esta herramienta para transformar la logística hacia modelos más verdes en el eco-mercado.</p>	
Abstract:	
<p>This research analyses the effects of artificial intelligence on the supply chain. The implementation of these innovations enables companies to achieve new levels of operational efficiency, cost optimisation and intelligent use of resources. The developments facilitate a perfect synchronisation between logistics operations and the principles of environmental sustainability. Creating a business model that is both profitable and ecologically responsible.</p> <p>Our aim is to unravel how AI can reshape the fabric of supply chains, ranging from a theoretical perspective to its effective application in real operational environments. We analyse the current state of artificial intelligence in process</p>	

optimisation and project future scenarios, where advanced technology merges with sustainable management methods. We recognise both the challenges and barriers to implementation, including regulatory issues and adaptability to rapid change. For this reason, the paper seeks to provide a comprehensive and balanced view based on recent literature. It highlights both the limitations and the disruptive opportunities that the technology presents in the context of a globalised economy. A comprehensive analysis of the potential of this tool to transform logistics towards greener models in the eco-market is proposed.

Palabras clave:

Inteligencia artificial, Cadena de suministro, Tecnología, Sostenibilidad, Regulaciones.



Inteligencia Artificial Verde © 2024 by Miriam Rodríguez da Costa is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ÍNDICE

FICHA DEL TRABAJO FINAL	ii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	v
SIGLAS Y ACRÓNIMOS	v
CAPÍTULO 1	1
Introducción.....	1
1.1. Motivación y alcance	1
1.2. Objetivos imprescindibles para lograr el correcto alcance de las metas del trabajo.....	2
CAPÍTULO 2	3
2.1 Definiciones y desarrollo histórico de la IA	3
2.2 El estado del arte	6
Introducción.....	6
2.2.1. Revisión de literatura sobre IA en la cadena de suministro.....	7
El desempeño de la IA en la cadena de suministro.....	7
2.3 Disciplinas de la IA	9
3. Tecnologías inteligentes.....	11
3.1.1. Sistemas útiles	11
3.1.2. Reporting colaborativo.....	11
3.1.3. Inteligencia artificial un habilitador de la sostenibilidad	14
3.2. Hacia un objetivo sostenible.....	16
Casos de eficiencia energética.....	16
3.3. Principios de Sostenibilidad en la gestión de la cadena de suministro... ..	18
3.4. Conexión de las teorías de logística verde con los principios	19
CAPÍTULO 3	20
Metodología.....	20
3.1. Herramientas de análisis	20
3.2. Economía circular y simbiosis industrial	30
3.2.1. Estrategias y oportunidades	30
3.3. Aplicación de algoritmos genéticos para rutas de transportes sostenibles.	32
CAPÍTULO 4	37
Los beneficios del algoritmo genético	37
4.1. Ventajas de los algoritmos genéticos	37
4.2. Estudios de caso y evaluación de resultados.....	38
4.3. Impactos éticos, socioeconómicos y de sostenibilidad.....	39
CAPÍTULO 5	42
Desafíos, barreras y estrategias de Implementación	42
5.1. Desafíos Técnicos y Organizativos	42
5.2. Estrategias para superar barreras.....	43
CAPÍTULO 6	45
Conclusiones.....	45
6.1. Principales hallazgos.....	45
6.2. Reflexión Final.....	47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1- Línea de tiempo. Elaboración propia basada en la (Fuente: [5]) ..	5
Ilustración 2- Producción de emisiones anuales de carbono en España hasta 2022. Elaboración propia basada en Norvento enerxía (Fuente: [17])	12
Ilustración 3- Extraída de “In Statista” “Google el mayor comprador de energía limpia”. (Fuente: [21])	16
Ilustración 4- Extraída del “Resumen del impacto positivo y negativo en el ODS”. (Fuente: [24]).....	22
Ilustración 5- Elaboración propia basada en Statista (Fuente: [25]).....	23
Ilustración 6- Elaboración propia basada en el “Informe PwC” (Fuente: [26])..	25
Ilustración 7- Elaboración propia basada en ZEW (Fuente: [27]). Procesos de IA utilizados en empresas de la economía alemana y del sector TIC alemán en 2019 (en %)......	26
Ilustración 8- Elaboración propia basada en el “In Statista” (Fuente: [28]).....	26
Ilustración 9- Elaboración propia basada en el “In Statista” (Fuente: [29]).....	27
Ilustración 10- Elaboración propia basada en el “Afi – microdatos EPA anuales” (Fuente: [30]).....	28
Ilustración 11- Elaboración propia basada en el “Smartlighting” (Fuente: [31]).	29
Ilustración 12- Elaboración propia basada en “Proyecto Coralís de la Unión europea” (Fuente: [34]).	31
Ilustración 13- Elaboración propia basada en “Algoritmos Genéticos” (Fuente: [36]).....	32
Ilustración 14- Métodos de reproducción elaboración propia basada en “Algoritmos Genéticos” (Fuente: [37]).	34
Ilustración 15- Operaciones de cruzamiento para generar nuevos descendientes elaboración propia basada en “Algoritmos Genéticos” (Fuente: [38]).....	35
Ilustración 16- Elaboración propia “Ejes de la nueva ley de IA” (Fuente: [43]).	39

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

IA.....	Inteligencia Artificial
IoT.....	Internet de las cosas
I+D.....	Investigación y desarrollo
ML.....	Machine learning o aprendizaje automático
DL.....	Deep learning o aprendizaje profundo
KPI´s.....	Indicadores clave de rendimiento
RPA.....	Automatización robótica de procesos
AMR.....	Robots móviles autónomos
ONU.....	Organización de las Naciones Unidas
UE.....	Unión Europea
CEO.....	Director ejecutivo
ODS.....	Objetivos de Desarrollo Sostenible
CC.AA.....	Comunidades Autónomas
TIC.....	Tecnologías de la información y comunicación

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. Motivación y alcance

La inteligencia artificial de aquí en adelante (IA) está transformando la cadena de suministro al convertir datos en conocimiento. La tecnología disruptiva es el nuevo elixir de la logística moderna, activando cambios que alientan a las empresas a buscar crecimiento y liderazgo. En el contexto de un mundo digitalizado, la adopción de la IA se presenta como una necesidad imperativa para mantener la relevancia y la competitividad en el mercado. Chopra y Meindl (2008) ^[1] definen la cadena de suministro como una red que incluye todas las entidades, directas o indirectas involucradas en cumplir con la demanda del cliente. Abarca a fabricantes, proveedores, transportistas, almacenes, minoristas e incluso a los propios clientes. Integrando todas las funciones necesarias para recibir y satisfacer una solicitud. Añadir IA en los procesos logísticos mencionados optimiza la eficiencia operativa. Impulsando una toma de decisiones más informada y estratégica. Al tiempo que fortalece la posición de las empresas en un mercado volátil y exigente. No obstante, este estudio se pregunta ¿cuáles son las mejoras que la IA puede proporcionar para mitigar la huella de carbono en la cadena de suministro? La capacidad de la IA en conjunto con otras tecnologías como el internet de las cosas (IoT), algoritmos inteligentes, el Big data, entre otros. Amplía las posibilidades para que las cadenas de suministro se dirijan hacia modelos más sostenibles y resilientes.

S. Russell y P. Norvig (2010) ^[2], destacan la aceleración de los progresos en IA impulsados por avances en aprendizaje automático. Tareas complejas como reconocimiento de voz, identificación de objetos, locomoción bípeda y conducción autónoma se han resuelto considerablemente. Abriendo nuevos mercados e incentivos para invertir en esta tecnología disruptiva. Un consenso reciente gira en torno al concepto de “agente racional”, capaz de percibir su entorno y actuar óptimamente para alcanzar objetivos. Dicho aporte ha incitado el desarrollo de subcampos como robótica y procesamiento del lenguaje natural, considerados casos particulares del paradigma de la IA. En este trabajo; se busca condensar los aspectos medulares y ofrecer una visión panorámica de los objetivos perseguidos. Se examina los impactos sociales, éticos y ambientales de su adopción, proponiendo estrategias de mitigación. Se aspira la inclusión de la IA; considerando las mejores prácticas y lecciones aprendidas de casos de estudio. La motivación radica en la amplia capacidad de esta tecnología para adaptarse a los diversos sectores industriales, incluyendo la cadena de suministro y logística.

El trabajo busca comprender el potencial de la IA como herramienta para abordar desafíos ambientales. Sin embargo, una de las debilidades identificadas es la falta de demanda de mano de obra especializada en esta área para las empresas. Es necesario contar con habilidades técnicas y analíticas, que permitan perfeccionar y promover prácticas sostenibles

mediante la aplicación efectiva de la IA. De esta manera, se podrá aprovechar al máximo las oportunidades de esta tecnología. Así, resulta valioso entender que la sostenibilidad, los bienes y servicios son una prioridad estratégica para las empresas que buscan ser más competitivas y exitosas en el mercado actual.

1.2. Objetivos imprescindibles para lograr el correcto alcance de las metas del trabajo

- El estudio explora las bases teóricas de la IA y su aplicación directa en la cadena de suministro.
- Comprender y evaluar los principios, regulaciones, alternativas innovadoras y sostenibles.
- Se analiza diferentes aspectos de la IA desde técnicos como algoritmos hasta los organizativos.
- Define claramente los desafíos y potenciales beneficios de esta tecnología.
- Propone estrategias y establece un marco viable para una implementación efectiva.

El trabajo se organiza en varios apartados, cada uno abordando aspectos relevantes de la IA aplicada a la sostenibilidad de la cadena de suministro.

A lo largo de la sección 2, se introducen las definiciones y la evolución histórica de la IA, proporcionando un contexto sólido para el estudio. Se realiza un análisis detallado de las tecnologías y metodologías actuales en el campo de la IA. Se discute el aprendizaje automático y su importancia, examinando el impacto y las aplicaciones del aprendizaje profundo. Además, se adentra en el uso del procesamiento del lenguaje natural en diversas aplicaciones.

Con respecto a la sección 3, tratamos de las tecnologías inteligentes. Se indagan sobre los sistemas útiles como la visión artificial, la robótica, el aprendizaje automático y la automatización robótica de procesos. Se realiza una revisión de la literatura sobre la IA en la cadena de suministro, examinando cómo la IA puede habilitar la sostenibilidad. Además, se analizan casos de uso de eficiencia energética, los principios de sostenibilidad en la gestión de la cadena de suministro y las teorías de logística verde.

En la sección 4, se aborda el enfoque metodológico y las herramientas de análisis. Se realiza un análisis cualitativo de las percepciones y experiencias de los actores en la cadena de suministro respecto a la IA. Evaluamos de modo cuantitativo el impacto real en la sostenibilidad y su nivel de adopción. Además, se examinan las estrategias y oportunidades de la simbiosis industrial. Finalmente, miramos con atención la aplicación de algoritmos genéticos.

La sección 5, se centra en los estudios de caso y la evaluación de resultados. Se analiza la optimización de rutas de transporte para minimizar los impactos ambientales y económicos, y se evalúa el rendimiento y la efectividad de los algoritmos genéticos. Por otro lado, abordamos los impactos éticos, socioeconómicos y de sostenibilidad. Abordamos la ley regulatoria de la UE para la IA, sus beneficios y consecuencias. También valoramos la automatización en la cadena de suministro, los impactos socioeconómicos (I+D, empleo, desigualdades). En conclusión, se establece que la IA mejora diversos aspectos de la cadena de suministro y contribuye de manera oportuna a la reducción de la huella de carbono.

Dentro del marco de la sección 6, damos a conocer los desafíos, barreras y estrategias de implementación. Se proponen estrategias para superar las barreras y se presentan las conclusiones. Consideramos los principales hallazgos y recomendaciones prácticas, así como las implicaciones para el futuro y una reflexión personal final.

CAPÍTULO 2

2.1 Definiciones y desarrollo histórico de la IA

La inteligencia artificial (IA) es una disciplina de la ciencia computacional dedicada al desarrollo de sistemas capaces de ejecutar tareas que tradicionalmente requerirían inteligencia humana. Este campo, profundamente enraizado en la historia de la tecnología y la informática, ha sido influenciado por numerosos pioneros, destacando “Alan Turing” considerado el padre de la informática. Turing planteó la posibilidad de que las máquinas pudieran “pensar”. La “Prueba de Turing” ^[3] propuesta en su artículo de 1950 “Computing Machine and Intelligence”. Sigue siendo una referencia vigente en el debate sobre la capacidad cognitiva de las máquinas, marcando el inicio formal del campo de la IA.

“El objetivo último de la IA, lograr que una máquina tenga una inteligencia de tipo general similar a la humana, es uno de los objetivos más ambiciosos que se ha planteado la ciencia. Por su dificultad, es comparable a explicar el origen de la vida, el origen del universo o conocer la estructura de la materia” (BBVA, 2024). ^[4]

El desarrollo teórico y práctico de la IA ha avanzado desde los días de Turing, hasta contribuciones importantes de expertos como S. Russell y Peter Norvig. Su obra “Artificial Intelligence: a Modern Approach”, ofrece una visión diferenciada de los objetivos y capacidades de la IA. Distinguiendo entre sistemas diseñados para pensar y actuar de manera humana y racional. El trabajo estableció una base sólida para el estudio académico de la IA,

permitiendo entender la evolución del campo desde sus inicios conceptuales hasta sus aplicaciones prácticas.

La IA se define como *“el estudio de agentes que perciben el mundo a su alrededor, piensan para decidir cómo alcanzar sus objetivos y luego actúan en consecuencia”* (Russell, S.J. y Norvig, P, 2004, p. 1023). ^[5]

El Logic Theorist es considerado uno de los primeros programas de inteligencia artificial en la historia. Desarrollado por Allen Newell, Herbert A. Simon y Cliff Shaw entre 1955 y 1956. El programa fue diseñado para imitar el proceso de pensamiento humano en la resolución de problemas de lógica. Específicamente en la lógica proposicional. La IA lejos de ser estática es un campo en constante evolución, impulsado por la curiosidad, la necesidad y el ingenio humano. Históricamente, es el legado de visionarios que imaginaron máquinas capaces de razonar, aprender y actuar de manera autónoma. Desde las teorías fundacionales de Turing hasta los modernos sistemas de aprendizaje automático y profundo. La IA ha evolucionado hasta convertirse en sinónimo de innovación tecnológica centrada en el tratamiento y análisis de datos.

LÍNEA DE TIEMPO

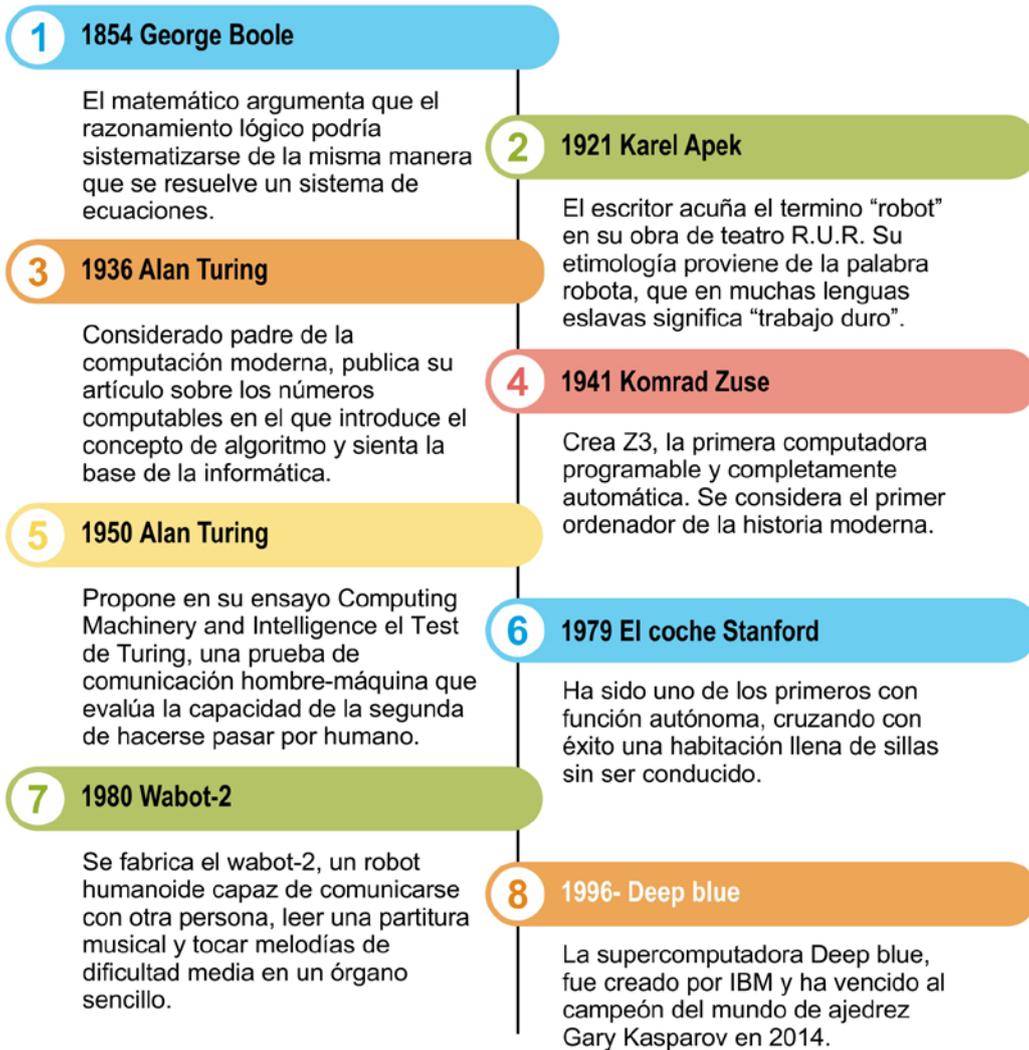


Ilustración 1- Línea de tiempo. Elaboración propia basada en la (Fuente: [5])

En la primera década del siglo XXI, la IA comenzó a ser parte de nuestra vida diaria mediante asistentes virtuales, sistemas de recomendación y motores de búsqueda inteligente. Google, Apple y Amazon fueron pioneras en incorporar IA en sus productos y servicios. En los años 2010, el aprendizaje profundo y la capacidad de procesamiento mejorada aceleraron el progreso en el reconocimiento de voz, la visión por computadora y el procesamiento del lenguaje natural. Recientemente, la tecnología ha comenzado a integrarse en iniciativas de sostenibilidad y gestión ambiental. Proyectos que utilizan IA para monitorear el cambio climático, gestionar recursos naturales de manera eficiente y promover prácticas agrícolas sostenibles están en auge. Además, la IA está jugando un papel decisivo en el desarrollo de ciudades inteligentes, mejorando la gestión del tráfico, el consumo de energía y los servicios públicos. Mientras la IA continúe evolucionando, demostrando su capacidad para transformar industrias y mejorar la sostenibilidad. Debemos sumar esfuerzos para que este desarrollo esté acompañado de una reflexión ética profunda y de políticas regulatorias adecuadas. Solo así podremos asegurar que la IA

potencie la innovación, contribuyendo a un crecimiento justo y sostenible para toda la sociedad. La dualidad entre el avance tecnológico y la responsabilidad ética, debe ser el núcleo de cualquier discusión futura sobre la IA y su impacto en el mundo.

2.2 El estado del arte

Introducción

El futuro de la IA verde dependerá de nuestra capacidad para balancear innovación tecnológica con principios éticos y sostenibles. Su desarrollo vertiginoso en las últimas décadas está fomentando el interés académico por investigaciones profundas relacionadas con su impacto en la sociedad, economía y medio ambiente. En respuesta a estos desafíos, ha emergido un nuevo campo de investigación conocido como “Inteligencia artificial verde” o “Algoritmo verde”^[6]. Cuyo propósito es desarrollar sistemas de IA más eficientes y sostenibles desde los diversos puntos de vista ambientales. Desde una perspectiva técnica, diversos estudios han explorado estrategias para reducir el consumo energético y las emisiones de carbono asociadas con el entrenamiento y la ejecución de modelos de IA.

Otras investigaciones como la compresión de modelos, la cuantización de pesos y la optimización de hardware. Igualmente, han demostrado competencia para disminuir la huella ambiental de estos sistemas. Aún que se han logrado resultados, los estudios realizados hasta la fecha se encuentran en una etapa temprana. Reconocen que se presentan varias limitaciones de alcance, metodología y duración que justifican la necesidad de más investigaciones. Esto se debe en parte, a la falta de incentivos económicos para adoptar estas tecnologías, el escaso apoyo a investigaciones, así como a la resistencia al cambio y la inercia organizacional.

Por otra parte, la IA verde ha encontrado aplicaciones en áreas como la gestión de recursos naturales, la optimización de sistemas de energía renovable y la predicción del cambio climático, entre otros. Por ejemplo, los modelos de IA se han utilizado para optimizar la ubicación y el diseño de parques eólicos y solares, maximizando los beneficios a la cadena de suministro y minimizando su impacto ambiental. El estudio de Waller y Fawcett (2013) ^[7] destaca cómo las técnicas de IA, como el ML y el DL, han optimizado la gestión de inventarios, la previsión de la demanda y la planificación de rutas. Mejorando el consumo de los insumos y contribuyendo a la sostenibilidad.

Asimismo, la IA ha demostrado que se puede mejorar la eficiencia energética en edificios favoreciendo el concepto de ciudades inteligentes. Mediante el análisis de datos de sensores y la optimización del consumo de energía en tiempo real, se logran ahorros importantes. Sin embargo, a pesar de estos avances, persisten desafíos en el campo de la IA verde. Uno de los principales retos es la falta de métricas y estándares universalmente aceptados, para

evaluar la sostenibilidad de los sistemas. Lo que hace más difícil la comparación y la selección de soluciones verdaderamente ecológicas. Por esta razón, existe una brecha relacionada con la implementación práctica de soluciones de IA verde en entornos industriales. Desde una perspectiva ética y social, surgen preocupaciones sobre la homogeneidad y la accesibilidad de la IA verde. Existe el riesgo de que estas tecnologías se concentren en manos de unos pocos actores privilegiados. Exacerbando las desigualdades en acceso a recursos y beneficios ambientales. Para analizar los diversos problemas comentados; cada sección de este estudio evaluará si el desarrollo tecnológico de la IA coincide con los objetivos de sostenibilidad de la cadena de suministro.

2.2.1. Revisión de literatura sobre IA en la cadena de suministro

El desempeño de la IA en la cadena de suministro

En el ámbito de la cadena de suministro, múltiples estudios de diversos autores han analizado y debatido acerca del impacto y la eficacia de la IA. Las investigaciones han arrojado luz sobre la influencia significativa que la IA puede tener en la optimización de los procesos logísticos, la toma de decisiones estratégicas y la gestión eficiente de inventarios. En este contexto, analizamos en profundidad las conclusiones y perspectivas ofrecidas para clarificar cómo la IA está transformando la cadena de suministro en la actualidad.

Según el autor Baha (2023) [\[8\]](#), la IA posee capacidades avanzadas para procesar grandes volúmenes de datos provenientes de diversas fuentes, como sensores, pronósticos meteorológicos y redes sociales. Dichas habilidades de analizar datos en tiempo real, identificar patrones, tendencias, predicciones sobre la demanda futura, dinamizan la cadena y generan un desempeño más preciso en comparación con otros métodos. El autor sostiene que la IA tiene un largo alcance para optimizar las rutas de transporte, la producción y entrega, haciendo de este un instrumento funcional, accesible y viable.

Argumenta que desempeño de la cadena de suministro se mide también a través de varios indicadores clave. La IA mejora la percepción y entendimiento de estos indicadores, mediante la automatización de procesos y la optimización de la toma de decisiones basada exclusivamente en datos. La IA también facilita la integración de datos de diversas fuentes, refinando la coordinación entre los diferentes actores de la cadena de suministro. Aunque, indica que mayor capacidad tecnológica requiere mayor capacidad de colaboración y adaptación.

Un punto de vista alternativo es el del autor Cohen (2024) [\[9\]](#). El mismo argumenta que la intersección entre la IA y la cadena de suministro; ha sido un factor clave para identificar cuantiosas mejoras en numerosos sectores. Se ha observado que las herramientas basadas en IA, pueden procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real. Lo que a su vez ayuda a las empresas a

optimizar sus planos de producción e inventario en diferentes ubicaciones, seleccionando las soluciones logísticas más oportunas y rentables.

Podemos entender que la visibilidad de la cadena de suministro debe de ser tratada como un elemento crítico para la resiliencia. La falta de visibilidad más allá de los proveedores directos, puede exponer a las empresas a interrupciones causadas por diversos factores; como desastres naturales, pandemias o problemas geopolíticos. A partir de estas experiencias, el mundo logístico ha sentido la necesidad de herramientas que puedan desempeñar un papel colaborativo, con capacidad de responder con inmediatez a las crisis y problemas ambientales.

A parte, son especialmente útiles para mapear, recopilar y sintetizar datos de diversas fuentes en diferentes formatos e idiomas. Por ejemplo, la IA puede extraer información relevante de datos estructurados y no estructurados. Facilitando a las empresas trazar diferentes niveles de prioridad, productividad y mejorar la comunicación entre los socios. En última instancia, el autor subraya que la IA está empoderando la industria 4.0 a través de la prevención. La capacidad de la IA para recomendar cambios estratégicos en la configuración logística. Posiciona a esta tecnología, como un aliado invaluable en la construcción de cadenas robustas adaptadas a un entorno empresarial cada vez más complejo.

Si bien hemos argumentado que la integración de IA en las cadenas de suministro mejora la resiliencia, es importante considerar la perspectiva de Pablo (2024) ^[10]. El autor afirma que la naturaleza compleja y dinámica de las cadenas de suministro hace que la identificación de KPI's sea un desafío considerable. Esta concepción nos permite entender mejor los desafíos multifacéticos asociados con la adopción de tecnologías avanzadas en las cadenas globales. Se argumenta que no existe un conjunto de indicadores universalmente aplicable y adecuado para la diversa gama de sistemas. Lo que complica la tarea de seleccionar KPI's que puedan medir de manera efectiva el desempeño. Esta diversidad en los sistemas se debe a factores como la variabilidad en los productos, los procesos, las geografías y las estructuras organizativas. El estudio presenta una metodología basada en la IA para analizar KPI's dentro de las cadenas de suministro. Incluyendo el uso de redes neuronales artificiales y operadores de secuencia gris.

Estas técnicas manejan la incertidumbre y la variabilidad en los datos, proporcionando predicciones más precisas y fiables. La sostenibilidad ambiental debe ser evaluada a través de KPI's que miden la huella de carbono, el consumo de energía y la gestión de residuos. Tales indicadores; ayudan a las empresas a adquirir conocimientos para reducir su impacto ambiental y promover prácticas más verdes. Por ejemplo, medir las emisiones de CO2 y el uso de materiales reciclados, permite identificar oportunidades para minimizar el daño ecológico y adoptar energías renovables, mejorando así su reputación y el cumplimiento normativo.

En términos de sostenibilidad económica, los KPI's consideran factores como el costo total de propiedad y la rotación de inventarios. Estos indicadores cumplen con la función de optimizar los costos operativos y potenciar los tiempos de entrega, asegurando que las empresas puedan competir en el mercado global. Por su parte, la sostenibilidad social se mide a través de KPI's que monitorean las condiciones laborales, la diversidad e inclusión y el impacto comunitario. Se trata de indicadores que aseguran que las empresas respeten los derechos de los trabajadores, promuevan un entorno laboral seguro, fortalezca las relaciones con los stakeholders, contribuyendo de forma positiva a todos los eslabones de la cadena. De modo que la implementación de KPI's relacionados con la sostenibilidad ambiental, económica y social proporciona una visión integral del desempeño de la cadena de suministro.

2.3 Disciplinas de la IA

A continuación, se presenta una breve descripción de las principales tecnologías o ramas que conforman la IA. La información sentará las bases para una mejor comprensión de los capítulos posteriores.

2.3.1. El aprendizaje automático, conocido en inglés como “Machine Learning” (ML) [\[11\]](#), es una subdisciplina de la IA que se centra en el desarrollo de algoritmos y modelos. Dando acceso para que las máquinas puedan aprender a partir de datos y mejorar su rendimiento con el tiempo. Sin ser explícitamente programadas para cada tarea específica. Los modelos de aprendizaje automático pueden ser supervisados, no supervisados o semi-supervisados, dependiendo de la disponibilidad y el tipo de datos de entrenamiento.

Se destacan tres tipos principales de aprendizaje automático:

El aprendizaje supervisado comienza con un conjunto conocido de datos. Los algoritmos utilizan estos datos etiquetados para aprender a hacer predicciones o clasificaciones sobre nuevos datos.

Aprendizaje no supervisado; con esta aproximación los algoritmos deben identificar patrones y estructuras en datos no etiquetados. Es útil para tareas como la agrupación (clustering) y la reducción de dimensionalidad.

Aprendizaje por refuerzo se basa en la interacción con un entorno dinámico. Los algoritmos aprenden a tomar decisiones secuenciales, mediante la maximización de una función de recompensa acumulativa.

2.3.2. El aprendizaje profundo o “Deep Learning” [\[12\]](#) se centra en la creación de redes neuronales artificiales capaces de aprender y realizar tareas de manera similar a como lo hacen los seres humanos. Utiliza capas de neuronas artificiales para procesar los datos de entrada y aprender a través de un proceso iterativo de ajuste de los pesos de las conexiones entre neuronas. Podemos decir que este tipo de aprendizaje puede procesar y analizar datos de manera más precisa. Especialmente cuando se trata de datos no estructurados como imágenes, texto y audio. Las redes neuronales convolucionales, han

mejorado drásticamente la precisión en tareas de clasificación y detección de objetos en imágenes. Las redes identifican patrones visuales complejos, ideales para aplicaciones en seguridad, automóviles autónomos entre otros.

2.3.4. Otra rama clave es el procesamiento del lenguaje natural, cuya función es permitir que las computadoras entiendan, interpreten y generen lenguaje humano. En otras palabras, su objetivo es equipar a las máquinas con capacidades semejantes a de los humanos de la manera más realista posible. Para lograrlo, se emplean técnicas computacionales, que analizan y representan textos en varios niveles de análisis lingüístico. Las técnicas implican una serie de procesos; que transforman el texto escrito o hablado en una forma procesable por un ordenador. Entre estos procesos se incluyen la identificación de palabras y frases, el análisis de estructuras gramaticales, la extracción de información relevante, la interpretación del significado y el contexto del texto.

A través de estos métodos, las máquinas pueden realizar tareas específicas como la clasificación de documentos, el análisis de sentimientos y la traducción automática. Su funcionamiento se basa en la combinación de algoritmos y modelos de aprendizaje automático. Inicialmente, los sistemas de lenguaje natural se construyeron con reglas programadas manualmente. No obstante, con el avance de la tecnología; se han introducido modelos estadísticos y de aprendizaje profundo que permiten a los sistemas aprender de grandes volúmenes de datos.^[13]

2.3.5. La visión por computador o (computer visión) ^[14] es otra área relevante. Consiste en dotar a las máquinas con la capacidad de percibir, analizar e interpretar imágenes y videos. Se trata de una aplicación directa de la IA, que utiliza técnicas para emular la capacidad humana de percepción visual. Los avances en aprendizaje automático y redes neuronales profundas han complementado su desarrollo. La realidad aumentada también se basa en esta tecnología.

2.3.6. El aprendizaje profundo (Deep Learning) ^[15] distinto a otras técnicas del aprendizaje automático. Es considerado por algunos expertos como la tecnología de la cuarta revolución industrial. Busca extraer características de alto nivel directamente a partir de los datos, sin necesidad de una extracción manual. Las redes neuronales están compuestas por múltiples capas de neuronas artificiales interconectadas. Cada capa procesa la información de la capa anterior, filtrando características cada vez más abstractas y complejas. Este proceso jerárquico hace con que las redes neuronales aprendan representaciones internas de los datos. La herramienta se ha aplicado en diversos campos, entre ellos el de la automoción. Bajo esta tónica, a medida que aumenta la disponibilidad de datos y la capacidad computacional, el aprendizaje profundo sigue mejorando su precisión. Sin embargo, también enfrenta desafíos como la necesidad de grandes volúmenes de datos de

entrenamiento; el alto costo computacional y la falta de interpretabilidad de los modelos.

2.3.7. La automatización robótica de procesos (RPA); se refiere a la utilización de “robots de software” o “bots” para automatizar tareas y procesos repetitivos basados en reglas. Se fundamentan en técnicas como las neuronales mencionadas líneas arriba. La fusión de la IA en conjunto con la robótica y otras tecnologías; están acelerando una transformación hacia procesos hiperautomatizados e inteligentes. Dentro de este marco, tanto la IA como la automatización de procesos; ofrecen a las pequeñas empresas la posibilidad de equidad frente a empresas de mayor tamaño.

3. Tecnologías inteligentes

Con este planteamiento, todas estas tecnologías contribuyen cada una a su manera a que la cadena de suministro sea más sostenible. Los sistemas de IA y robótica viabilizan la monitorización y el control en tiempo real de los procesos de producción. Capaces de identificar áreas débiles y la optimización del uso de energía, materias primas, agua, rutas de transporte y gestión de residuos industriales. Además, pueden simular y probar diseños de productos antes de su fabricación, analizando su ciclo de vida. Como resultado, se crean productos sostenibles que rebajan tanto las emisiones de gases de efecto invernadero como el consumo de combustible, mitigando el impacto ambiental.

3.1.1. Sistemas útiles

Los sistemas de visión artificial y robótica son útiles en plantas de reciclaje para clasificar y separar materiales contaminantes.

El aprendizaje automático (machine learning) ^[16] se utiliza para analizar grandes volúmenes de datos ajustando los parámetros de los procesos y limitando el desperdicio.

La automatización robótica de tareas repetitivas en conjunto con robots colaborativos; reducen el consumo energético en comparación con los métodos tradicionales. Asimismo, los robots móviles autónomos (AMR) en almacenes y centros de distribución refuerza el uso de recursos responsables.

Los algoritmos de IA pueden procesar datos de sensores detectando patrones que indiquen posibles fallas en los equipos. En efecto, posibilita realizar el mantenimiento preventivo evitando las paradas no planificadas. Atenuando el impacto ambiental asociado a la fabricación de nuevas máquinas.

3.1.2. Reporting colaborativo

La industria en España es responsable del 22,4 % del total de emisiones contaminantes. Particularmente, el sector del transporte contribuye con un 29,6 % de estas emisiones debido al uso predominante de combustibles fósiles.

Ante esta problemática, surge la necesidad de explorar otras soluciones innovadoras y sostenibles como el “reporting colaborativo”.

EMISIONES ANUALES DE CO2 DE 1970-2022 EN ESPAÑA

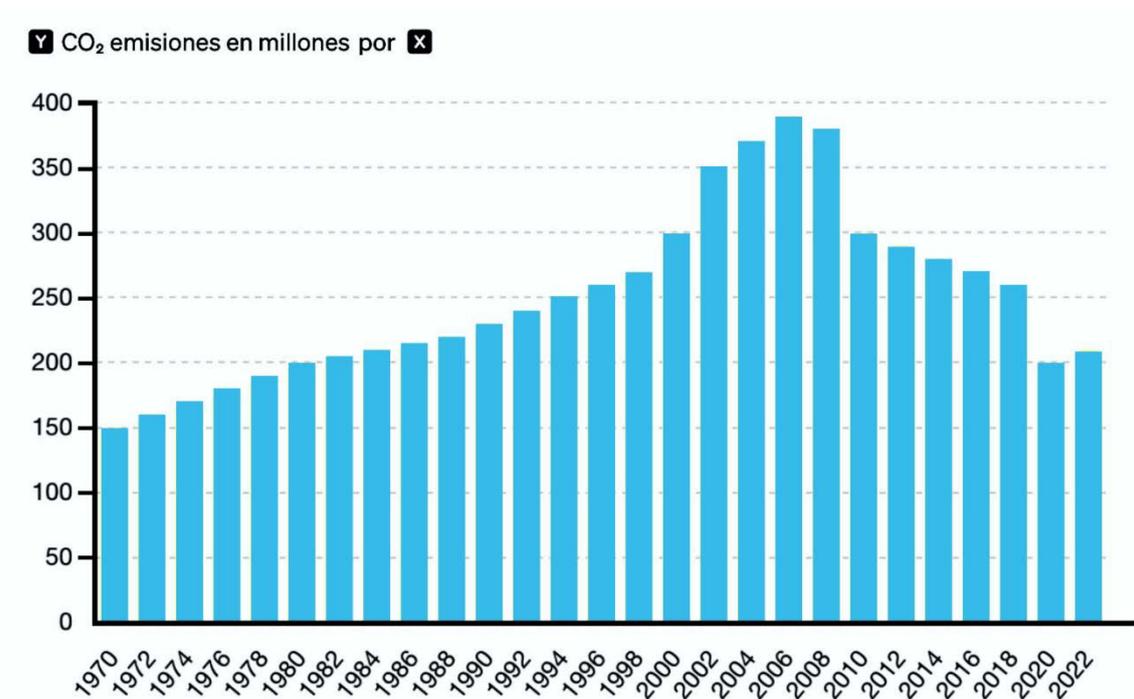


Ilustración 2- Producción de emisiones anuales de carbono en España hasta 2022. Elaboración propia basada en Norvento enerxía (Fuente: [17])

El concepto de reporting colaborativo, se basa en la premisa de que las organizaciones no operan de manera aislada. Sino que forman parte de un ecosistema empresarial más amplio. Esta colaboración se extiende a la recolección y el análisis de datos. Facilitando una visión más completa del desempeño corporativo en términos de sostenibilidad y responsabilidad social. El esfuerzo entre empresas faculta compartir mejores prácticas, estandarizar métodos de reporte, emplear la comparabilidad de los datos. Lo que resulta en una gestión más efectiva de los riesgos y oportunidades relacionados con la sostenibilidad en la cadena de suministro.

La información puede abarcar diversos aspectos, tales como:

1. Incluye estados financieros, informes de auditoría, análisis de rentabilidad y otros datos económicos que reflejan la salud financiera de la empresa.
2. Detalla el desempeño de las operaciones diarias, la eficiencia de los procesos y la gestión de recursos.

3. Informa sobre el impacto ambiental de las actividades de la empresa, incluyendo la huella de carbono, el uso de recursos naturales y las iniciativas de sostenibilidad.
4. Aborda aspectos relacionados con la responsabilidad social corporativa (RSC), como las prácticas laborales, la diversidad e inclusión y las contribuciones a la comunidad.
5. Describe la estructura de gobierno corporativo, las políticas de ética y cumplimiento y la gestión de riesgos.

De manera más específica el reporting ligado a sostenibilidad de la cadena de suministro implica:

- Cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por las actividades de la empresa.
- Evaluación del impacto ambiental de estas emisiones y su contribución al cambio climático.
- Descripción de las iniciativas y estrategias implementadas para reducir las emisiones de carbono.
- Presentación de la información de manera que sea comprensible y comparable con otras empresas y sectores.

Las cadenas de suministros se enfrentan la presión diaria de reducir su huella de carbono y reportar de manera transparente sus emisiones. En función de cumplir con las regulaciones ambientales, satisfacer las crecientes expectativas de sus aliados, que demandan información detallada sobre el impacto ambiental de las operaciones corporativas. El reporting corporativo es un método que aporta un beneficio complementario a la empresa.

La adopción de nuevas formas de reporting corporativo, como la inclusión de información sobre la huella de carbono. Supone a las empresas identificar áreas de mejora y desarrollar estrategias contundentes para reducir sus emisiones. Esta iniciativa produce la comparación entre empresas y sectores, promoviendo una competencia saludable en términos de sostenibilidad. A parte, impulsa la innovación en tecnologías limpias y prácticas operativas más conscientes. Por ejemplo, empresas líderes en el sector han empezado a implementar sistemas de gestión de energía avanzados y vehículos eléctricos para minimizar su impacto ambiental. Asimismo, la ausencia de estándares uniformes puede llevar a inconsistencias en las mediciones, dificultando la autenticidad de datos entre diferentes empresas y sectores. Una estandarización transparente incentivaría a las empresas a adoptar prácticas

más sostenibles. Inclusive, otorgaría a los reguladores y a los consumidores tomar decisiones más informadas basadas en datos contrastados.

El papel de la IA en el reporting de la huella de carbono resulta necesario para evaluar el impacto ambiental corporativo. Estas herramientas digitales y los sistemas de información avanzados, proporcionan a las empresas la capacidad de reaccionar rápidamente ante cualquier desviación de los objetivos de sostenibilidad. En otras palabras, la IA tiene la capacidad de predecir futuros escenarios de emisión basados en tendencias actuales. Dando una respuesta más rápida a los cambios regulatorios, fortaleciendo la resiliencia y competitividad de las organizaciones en un entorno cada vez más orientado hacia la sostenibilidad. De ahí que, la colaboración entre los diferentes actores de la cadena de suministro es inequívoca para progresar en términos ambientales. Iniciativas conjuntas entre proveedores, fabricantes y distribuidores pueden conducir a la creación de cadenas de suministro más flexibles. Por ejemplo, el uso compartido de almacenes y flotas puede reducir significativamente la huella de carbono del sector.

3.1.3. Inteligencia artificial un habilitador de la sostenibilidad

La IA integrada profundamente en nuestra sociedad y mejorada por años de desarrollo, ha cambiado nuestra manera de abordar los problemas ambientales. En el ámbito logístico actúa como un soporte para alcanzar objetivos sostenibles, maximizando las oportunidades y minimizando los riesgos.

Sin embargo, su integración conlleva a cambios organizacionales que impactan tanto en el contexto interno como externo de las empresas. En el plano externo enriquece la experiencia del cliente, mejorando las interacciones desde el primer contacto hasta el apoyo postventa. Internamente modifica la estructura y el funcionamiento empresarial, afectando los objetivos corporativos, las dinámicas laborales, el liderazgo y las jerarquías internas. Tales transformaciones han pasado de ser opcional a esencial. Como apunta el informe elaborado por digital Mckinsey en colaboración con la fundación (Cotec, 2017). ^[18] La digitalización podría suponer para España un incremento del PIB de entre un 1,8% y un 2,3% hasta 2025.

Mirando desde otro ángulo, si tenemos en cuenta que el cambio climático podría reducir los recursos y materias primas para el año 2050. Sumado a las crecientes demandas de la comunidad inversora y las exigencias de los consumidores contemporáneos que priorizan la sostenibilidad. Incorporar la IA en la cadena de suministro se convierte en una cuestión de supervivencia empresarial. Por otro lado, la gestión global de proveedores presenta desafíos significativos en términos de rastreo, recopilación y medición de datos ambientales. Aunado a esto, la necesidad de cumplir con estándares internacionales de sostenibilidad añade una capa adicional de complejidad, requiriendo que estos datos se sintetizan claramente para tomar decisiones.

Para que una empresa sea sostenible, es preciso que la sostenibilidad forme parte de su ADN e involucre toda su cadena de suministro.

De acuerdo con el Pacto Mundial de las Naciones Unidas, *“la sostenibilidad de la cadena de suministro se basa en la gestión de los impactos ambientales, sociales y económicos, y el fomento de las prácticas de buen gobierno, a lo largo del ciclo de vida de los bienes y servicios”* (ONU, 2010).^[19]

La IA responde a estos desafíos, mediante soluciones simplificadas e integrales que aumentan la visibilidad de la cadena, midiendo el rendimiento real y monitoreando su desempeño de extremo a extremo. Aportando retroalimentación continua sobre emisiones, generación de residuos, consumo de agua y uso de energía, asegurando una gestión ambiental más realista. Además, al evaluar riesgos identifica áreas con deficiencias y sugiere oportunidades de mejora. Su capacidad predictiva analiza niveles de inventario, patrones de venta y tendencias, lo que permite prever la oferta y la demanda. Combate la sobreproducción, reduce los desperdicios, extendiendo la vida útil de los productos y evitando que los residuos terminen en el vertedero. Al aplicar estos cambios, avanzamos también hacia estrategias de transporte que mitigan las emisiones de carbono.

En cuanto a la eficiencia energética, investigaciones han demostrado que la IA puede anticipar la gestión del consumo de energía en tiempo real, debido a su capacidad para analizar y aprender de vastos conjuntos de datos. Al optimizar el consumo a través de redes inteligentes, complementa las energías renovables, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y promoviendo el uso sostenible de los recursos. Todo esto se puede complementar con el sello (PNAV).

El sello forma parte del “Plan Nacional de Algoritmos Verdes” (PNAV) ^[20], consta de un programa con una inversión de 257,7 millones de euros de los fondos europeos Next Generation de la UE. Uno de los ejes principales del PNAV, es impulsar la certificación para empresas de hardware y software sostenibles, implantando el “Sello de Calidad Green Tech”. El objetivo es fomentar el desarrollo de una IA “verde por diseño”, incorporando variables de sostenibilidad medioambiental desde la concepción inicial de los algoritmos.

De esta manera, se busca explotar las sinergias entre la transición verde y digital. La implementación de este sello implica el desarrollo de criterios de medición, selección y toma de decisiones que determinan el impacto ecológico de las infraestructuras empleadas. Expertos en el área destacan la ambición de este objetivo, dado que analizar la sostenibilidad del software es una tarea compleja. No obstante, reconocen el esfuerzo a nivel nacional y europeo por regular el consumo energético de la IA, considerándolo un gran avance.

3.2. Hacia un objetivo sostenible

Casos de eficiencia energética

Apple por ejemplo, utiliza algoritmos de IA para optimizar el consumo energético en sus centros de datos e instalaciones. Ha logrado una reducción de más del 55 % de las emisiones de CO₂ desde 2015 en todas sus fábricas. Y, un 18,5 millón de toneladas de CO₂ evitadas en 2023 a través de su programa Clean Energy para proveedores. Con un 20 % menos de emisiones en el transporte de productos respecto a 2022. Aunque, Apple ha implementado diversas iniciativas sostenibles, Google es el mayor comprador de energía renovable del mundo.

CAPACIDAD ACUMULADA DE LOS CONTRATOS DE ENERGÍA RENOVABLE DE GOOGLE DESDE EL EJERCICIO 2011 HASTA 2020.

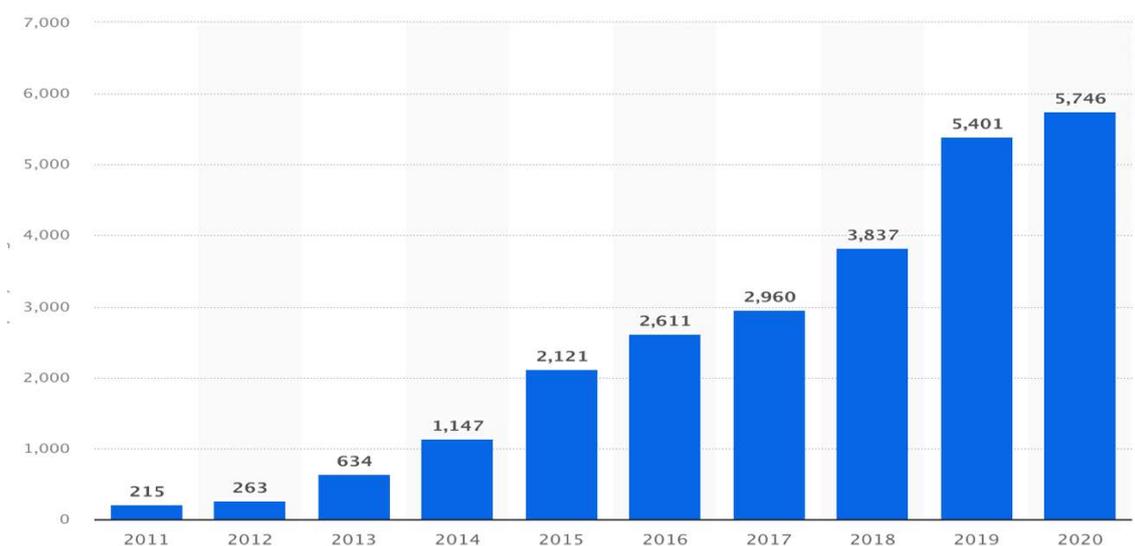


Ilustración 3- Extraída de "In Statista" "Google el mayor comprador de energía limpia". (Fuente: [\[21\]](#))

Google

La sostenibilidad ambiental ha sido siempre un valor central para Google, pero también representa una decisión económica estratégica. Si pensamos que los costos de la energía eólica y solar han disminuido recientemente. Con la ayuda de la IA; la empresa ha decidido emplear sus esfuerzos para implementar en sus centros de datos energía 100% limpia y renovable en todo el mundo. El compromiso se extiende a todos sus proveedores, que mediante fuertes inversiones en proyectos consiguen generar beneficios económicos a toda su cadena y a la sociedad.

Colgate - Palmolive

En la era actual donde la sostenibilidad es un imperativo global, este concepto cobra relevancia. Las empresas líderes se reinventan empleando herramientas vanguardistas para minimizar su huella ecológica. Colgate-Palmolive se destaca como un ejemplo sobresaliente de esta tendencia. Ha incorporado la IA en su estrategia para alcanzar objetivos ambiciosos de cero residuos, bajo impacto ambiental y alta eficiencia en sus operaciones. En el ámbito de fabricación, se ha centrado en la eficiencia energética reduciendo el desperdicio. También, ha mitigado el impacto del transporte reforzando su meta principal. A través de código de conducta y auditorías regulares exige transparencia a sus proveedores. Apoyándose en la IA para controlar los aspectos éticos, ha reducido las emisiones y mejorado la sostenibilidad de toda su cadena de suministro de forma global.

En el diseño de productos se han desarrollado envases reciclables y biodegradables, compartiendo estas tecnologías con competidores para promover prácticas sostenibles en todo el sector. La IA permite a Colgate-Palmolive diseñar materiales con propiedades específicas que reducen el impacto ambiental, usando polímeros biodegradables y membranas de captura de carbono. A través del análisis detallado de datos, la empresa proporciona a sus socios informes exhaustivos sobre el consumo de combustibles y las emisiones de dióxido de carbono en cada etapa del proceso logístico. Palmolive apuesta por la combinación de la IA con otras tecnologías, para obtener múltiples ventajas en comparación con los métodos tradicionales. Al integrar la IA con gemelos digitales sostiene su propósito de optimización energética. Logrando una notable disminución en el consumo de gas, vapor y electricidad, reduciendo así los costos operativos y el impacto ambiental de manera substancial.

Amazon

En esta línea, estudios sobre Amazon evidenciaron cómo los sistemas de IA aliada a otras tecnologías; pueden determinar con exactitud las necesidades de inventario. Ajustando dinámicamente las operaciones logísticas para satisfacer la demanda, confirmando mejoras en la reputación de la marca, confianza del consumidor, acceso a mercados emergentes, promoviendo iniciativas que generan eficiencia a largo plazo. El ámbito de aplicación de la tecnología se extiende a través de una diversidad de operaciones comerciales. Incluyendo, pero no limitándose solo a los puntos citados anteriormente. Por ejemplo, en la logística verde juega roles diferentes, pero igualmente importantes para lograr objetivos sostenibles.

Coca-Cola

De una manera diferenciada en 2009, Coca-Cola organizó un encuentro en Atlanta con sus principales proveedores globales para abordar la importancia de incorporar la sostenibilidad en sus estrategias de crecimiento. Durante la reunión, el CEO subrayó que además de mantener costos bajos, eficiencia y personalización, la sostenibilidad sería esencial para diferenciarse en el mercado. En lugar de imponer directrices, la empresa solicitó aportes estratégicos de los proveedores para garantizar el éxito conjunto a largo plazo. Tras la cumbre, Coca-Cola recibió aproximadamente 200 propuestas sobre embalaje sostenible, energía, logística, agricultura y manejo del agua, desarrollando planes de acción conjuntos con 32 proveedores.

3.3. Principios de Sostenibilidad en la gestión de la cadena de suministro

Los principios de sostenibilidad representan un marco conceptual que guía el desarrollo hacia un futuro equilibrado y resiliente. Dichos principios abarcan dimensiones ambientales, sociales y económicas. Tienen como objetivo fomentar la preservación de los ecosistemas, la equidad entre generaciones y el avance sostenible.

El principio de sostenibilidad ambiental se enfoca en alcanzar una balanza entre el progreso y la conservación del entorno. Destaca la importancia de operar dentro de los límites físicos del planeta, evitando la degradación ambiental y la sobreexplotación de recursos naturales. Asimismo, promueve la utilización de recursos renovables abogando por justicia ambiental. Incentivando la participación pública y la toma de decisiones informadas en asuntos ambientales.

Por otro lado, el principio de integración busca armonizar los aspectos de la sostenibilidad, como los económicos, sociales y ambientales, para lograr un desarrollo equilibrado y sostenible. Resalta la necesidad de considerar de manera holística; los impactos de las acciones humanas en el planeta y en la sociedad, fomentando la coexistencia equitativa de ambos aspectos.

En cuanto al principio del contaminador-pagador; establece que aquellos responsables de generar contaminación o impactos ambientales deben asumir la responsabilidad, los costos asociados con la mitigación y reparación de este. Su propósito radica en internalizar los costos ambientales en las actividades económicas. Promoviendo la responsabilidad ambiental y la prevención de posibles daños.

Por último, el principio precautorio; se fundamenta en la premisa de actuar de manera preventiva ante la incertidumbre científica sobre los impactos de ciertas acciones. Cuyo fin es evitar posibles daños significativos al medio ambiente o a la salud humana. Señala la importancia de la prevención de riesgos; la

adopción de medidas preventivas frente a posibles impactos negativos, incluso en ausencia de evidencia científica concluyente.

“El riesgo (R) de cualquier actividad puede ser definido como el producto entre la magnitud (M) de sus consecuencias y la probabilidad (P) de que ocurra. Matemáticamente puede expresarse como $R(x) = M(x) \cdot P(x)$. Cada vez que la magnitud de un evento es elevada y la probabilidad incierta (por no contar con certeza científica) tendremos un caso donde aplicar el principio precautorio” (S. Dunne, 2018). [\[22\]](#)

Los principios de sostenibilidad que orientan las decisiones hacia un desarrollo equilibrado; respetuoso con el entorno y socialmente equitativo, encuentran un vínculo estrecho con los postulados de la logística verde. La disciplina que ha ganado relevancia en las últimas décadas; pone énfasis en la optimización de los flujos logísticos. Con miras de minimizar el impacto ambiental y promover prácticas sostenibles a lo largo de toda la cadena de suministro.

3.4. Conexión de las teorías de logística verde con los principios

La logística verde fundamentada en teorías como la teoría de recursos y capacidades y la teoría de costos de transacción. Defiende la adopción de estrategias que reduzcan las emisiones de carbono, disminuyan los residuos y fomenten el uso eficiente de estos. Propone estrategias que abarcan desde la selección de modos de transporte más limpios, hasta la implementación de prácticas de embalaje sostenibles. Coincidiendo con los principios de sostenibilidad ambiental y de contaminador-pagador.

Al internalizar los costos ambientales en las actividades logísticas, se incentiva la responsabilidad y la prevención de daños al medio ambiente. En este contexto, la integración de tecnologías en la logística verde; se presenta como una herramienta sostenible indispensable. A través de algoritmos avanzados y análisis de datos en tiempo real; la IA permite optimizar rutas de transporte, predecir la demanda anticipando posibles incidencias en la cadena de suministro. Su capacidad fundamentada en teorías como la teoría de sistemas y la teoría de redes, contribuyen a reducir emisiones, minimizar desperdicios y mejorar la resiliencia de las operaciones logísticas.

Por ende, facilita la toma de decisiones informadas en materia de sostenibilidad, proporcionando diferentes percepciones sobre el desempeño ambiental en las diversas áreas. Enlazándose con el principio de integración; que considera de manera holística los impactos ambientales, sociales y económicos de las actividades. Sin embargo, la implementación de tecnologías de IA en la logística verde no está exenta de desafíos. La complejidad de los algoritmos, la disponibilidad de datos de calidad, la necesidad de desarrollar competencias digitales en el personal logístico, son algunas de las barreras. Desde esta óptica, estudios de la teoría de aceptación tecnológica y la teoría

de difusión de innovaciones, debaten sobre cómo superar estas adversidades a corto plazo.

Por lo tanto, el principio precautorio adquiere relevancia, al exponer la necesidad de actuar de manera preventiva; ante la incertidumbre sobre los impactos de la implementación de tecnologías emergentes en la cadena de suministro. Las dimensiones de la integración de los principios de sostenibilidad se refieren como la logística verde y las tecnologías de IA; son una oportunidad para avanzar hacia a este modelo. Al combinar estrategias de optimización de flujos; reducción de impactos ambientales y toma de decisiones informadas, pueden contribuir a la construcción de sistemas logísticos respetuosos con el entorno. Se observa que esta perspectiva cimentada sobre teorías sólidas y principios éticos; tiene el potencial de generar un impacto positivo en la preservación de los ecosistemas, la equidad intergeneracional y el progreso sostenible.

CAPÍTULO 3

Metodología

3.1. Herramientas de análisis

Las cuestiones de sostenibilidad están moldeando el futuro. A través de un enfoque cualitativo; nosotros analizaremos cómo Starbucks con 31.000 tiendas en todo el mundo y 400.000 socios que atienden a 100 millones de clientes por semana. El gigante ha integrado la IA y tecnologías como blockchain, para mejorar la trazabilidad y la sostenibilidad. Cubriendo todos los aspectos de su cadena de suministro para alcanzar objetivos sostenibles y sustentables.

Caso Starbucks

La implementación de la IA en Starbucks; busca optimizar la experiencia de los clientes y el desempeño operativo. Personalizando la gestión de cada tienda como una entidad autónoma. La estrategia se centra en la creación de conexiones humanas, adaptadas a las particularidades de cada establecimiento. Yendo más allá de la ejecución de algoritmos genéricos. La IA se visualiza como un aliado inteligente; colaborando con el equipo al automatizar tareas como el inventario, la logística y la planificación de pedidos. Reduciendo el desperdicio de tiempo inactivo de los trabajadores y garantizando la disponibilidad de productos populares.

Por ejemplo, la empresa emplea la IA en el menú para proporcionar a los clientes opciones personalizadas según sus propias preferencias, considerando factores como el clima o la hora del día. De manera similar; optimiza la preparación de bebidas, conforme el contexto de cada pedido. De hecho, si una tienda recibe un pedido online de cuatro cafés con leche helados, pero el cliente aún se encuentra a 10 kilómetros de distancia. La IA sugiere a los

baristas que preparen primero otras bebidas. De este modo, se priorizan las bebidas que no se ven afectadas por el tiempo de espera del cliente. Además; se evita que los cafés con leche helados se diluyan o pierdan su temperatura ideal antes de que el cliente llegue a recogerlos. Al analizar datos en tiempo real sobre la ubicación del cliente y el estado de los pedidos. Proporciona recomendaciones inteligentes a los baristas para optimizar la eficiencia y la calidad del servicio, adaptándose a cada situación en particular.

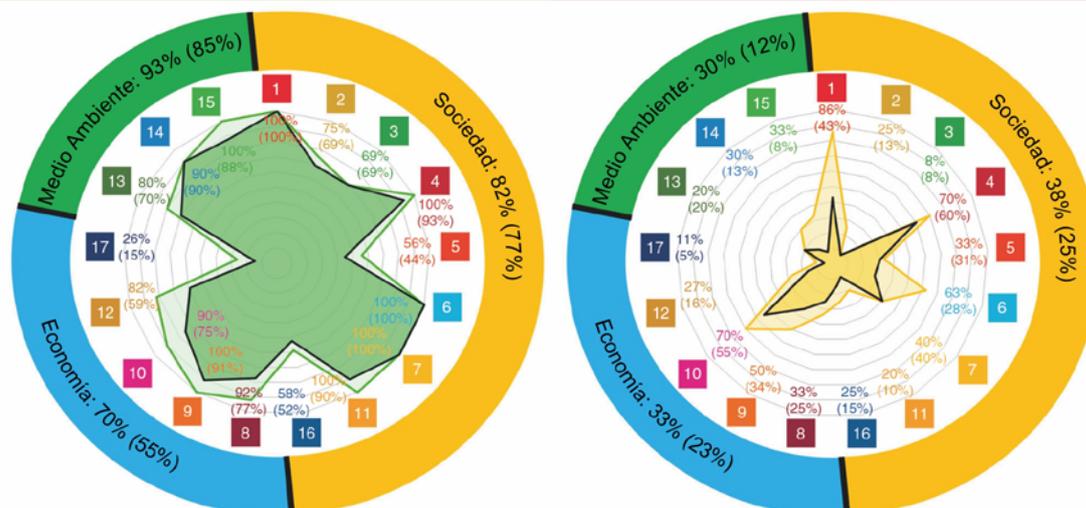
Igualmente, asiste a los gerentes en la predicción de necesidades de personal, la planificación de horarios y el mantenimiento preventivo, contribuyendo a una gestión proactiva de las operaciones. Starbucks ha reafirmado su compromiso con su red de proveedores para el abastecimiento sostenible de café. Mediante la implementación de tecnologías como la IA y el blockchain, fomenta una cultura basada en datos. La iniciativa posibilita a la empresa y consumidores rastrear el origen de su café, asegurando la procedencia de granos libres de productos químicos. El resultado fortalece la confianza del consumidor, refleja el compromiso con prácticas éticas y saludables, alineadas con los principios de sostenibilidad y equidad. Lo que posiciona a Starbucks, como un referente en la integración de tecnología IA en su operativa diaria.

Desde el punto de vista del emprendedor Jonhson la necesidad de reaccionar e innovar delante de las dificultades conlleva a *“Utilizar las mejores partes de la tecnología para potenciar las mejores partes de nuestro ADN”* (J. Warnick, 2020) ^[23]

Impacto real de la sostenibilidad

De acuerdo con un estudio publicado en Nature, la IA puede apoyar significativamente el logro del 79 % de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Convirtiéndose en un recurso indispensable para promover una economía circular; crear ciudades inteligentes y cadenas de suministro que manejen sus recursos de manera óptima.

a Impactos positivos de la IA: 79% (71%) b Impactos negativos de la IA: 35% (23%)



Evidencia documental del potencial de la IA actuando como (a) un facilitador o (b) un inhibidor de cada uno de los ODS. Los números dentro de los cuadrados de colores representan cada uno de los ODS (consulte los datos complementarios 1).

Los porcentajes en la parte superior indican la proporción de todos los objetivos potencialmente afectados por la IA y los del círculo interior de la figura corresponden a proporciones dentro de cada ODS. Los resultados correspondientes a los tres grupos principales, a saber, Sociedad, Economía y Medio Ambiente, también se muestran en el círculo exterior de la figura. Los resultados obtenidos al tener en cuenta el tipo de evidencia se encuentran en el área sombreada interior y los valores entre paréntesis.

Ilustración 4- Extraída del “Resumen del impacto positivo y negativo en el ODS”. (Fuente: [24]).

Tal como revela el análisis, la IA facilita la consecución de los objetivos medioambientales. Actuando como un catalizador de grandes bases de datos interconectadas. Desarrollando acciones medioambientales que deben ser conjuntas y no de manera aislada. En el contexto del ODS 13, mejora la comprensión del cambio climático modelando su impacto, apoya sistemas energéticos de bajas emisiones, optimiza la integración de las energías renovables. A modo de reflexión, la tecnología no solo facilita lograr los objetivos de la Agenda 2030, sino que también, reconfigura la gestión energética dentro de las empresas. Así ilustramos cómo la tecnología puede ser un agente de cambio para lograr los objetivos de sostenibilidad global. Se plasma su capacidad de influir positivamente en las diversas fases de industria haciendo su papel en la acción climática.

Adopción de la inteligencia artificial

A continuación, se detallan los porcentajes de encuestados que utilizan la IA en cada área de la cadena, junto con una breve explicación de su relevancia:

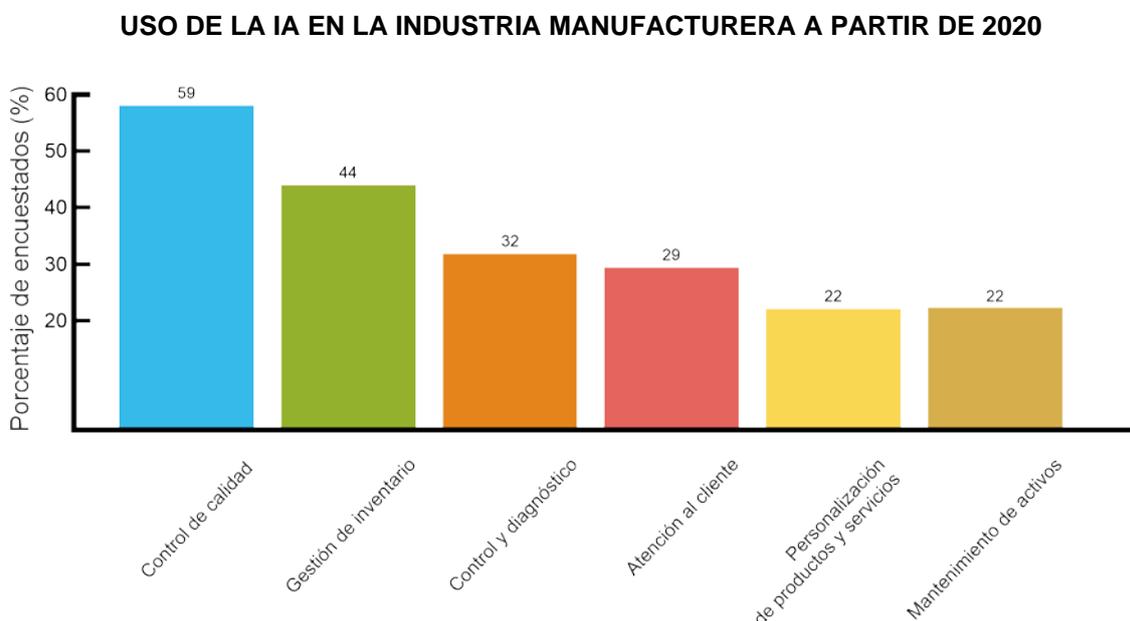


Ilustración 5- Elaboración propia basada en Statista (Fuente: [\[25\]](#)).

De acuerdo con los datos, el 59% de los encuestados utiliza la IA para el control de calidad. La alta adopción justifica la importancia de la IA en la detección y corrección de defectos en los productos. Los sistemas de IA pueden analizar imágenes y datos en tiempo real, identificando fallos con mayor precisión y rapidez que los métodos tradicionales. El resultado son productos de mayor calidad, así como en una reducción significativa de los costos asociados con reprocesos y devoluciones.

El 44% emplea la IA para la gestión de inventario, la tecnología posibilita anticipar la demanda, optimizar los niveles de existencias y detectar ineficiencias en los procesos. Lo anterior conlleva una reducción de costos de almacenamiento. Lo que garantiza que materias primas y productos finales estén disponibles según las necesidades, evitando así acumulaciones excesivas o faltantes.

El 32% coincide que fortalece el control y diagnóstico de procesos direccionados a la monitorización continua de los sistemas de producción. Con esto se logran identificar patrones anómalos y predecir fallos antes de que ocurran. Las circunstancias descritas posibilitan realizar mantenimientos preventivos, evitando interrupciones costosas en la cadena.

El 29% direcciona sus esfuerzos al sector de atención al cliente, gestionando consultas o buscando soluciones. La IA puede dar respuestas rápidas y personalizar la experiencia del cliente aumentando la satisfacción y la lealtad.

Solo un 22% utiliza la IA para la personalización de productos o servicios. Básicamente se extraen datos que sirven para analizar las preferencias y comportamientos de los clientes. El objetivo es aumentar las ventas al ofrecer soluciones que se ajusten mejor a las necesidades individuales.

Con el mismo índice de 22%, los encuestados aplican la IA en el mantenimiento de activos. Aprovechan esta tecnología; para predecir cuándo es probable que una máquina falle basándose en datos históricos y patrones de uso. En términos de beneficios, reduce el tiempo de inactividad, realiza mantenimientos predictivos, disminuye costos de reparación y mejora la vida útil de los equipos.

La encuesta respalda que la IA está siendo ampliamente adoptada en diversas áreas de la industria manufacturera. Pone un enfoque particular en el control de calidad y la gestión de inventario. La adopción en estas áreas está ayudando a las empresas a mejorar la eficiencia, reducir costos y ofrecer productos de mayor calidad. Proyectando una ventaja competitiva distinta en el mercado.

Impacto de la IA en la productividad

Según el informe del Barómetro Global de la IA sobre el empleo (2024) de PwC.^[26] Los sectores de comunicación, servicios profesionales y financieros muestran el mayor grado de exposición a la IA. Esto se debe a la capacidad de esta tecnología para automatizar y optimizar numerosas tareas. Esto ha permitido a las empresas alcanzaren un incremento en la productividad laboral de un 4,8%. En contraste, sectores como la construcción, la industria y el primario muestran un menor grado de integración de la IA. En estos ámbitos, la proporción de ofertas de empleo que demandan habilidades relacionadas con la IA, supera a la de otros sectores de la economía.

De acuerdo con la tabla abajo, podemos valorar el impacto de la IA en cinco grandes mercados laborales (Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, Australia y Singapur). Los datos revelan que en promedio, los empleos que requieren capacidades específicas en IA cuentan con una prima salarial del 25% en comparación con otros puestos. Sin embargo, al analizar cada mercado por separado, podemos observar algunas variaciones. Estados Unidos lidera con la prima salarial más alta, alcanzando un 43% para puestos como marketing con conocimientos de IA.

En el Reino Unido, los empleadores están dispuestos a pagar un 27% más a los abogados con habilidades en estas tecnologías. Por su parte, Canadá, Australia y Singapur también muestran primas salariales importantes, aunque en menor medida. Apuntando que la demanda y valoración de las capacidades en IA varía entre los diferentes mercados laborales, influenciada por factores como el desarrollo de la industria tecnológica, las inversiones en I+D y la disponibilidad de talento especializado en cada país. Todo esto refleja el creciente valor que el mercado laboral está otorgando a los profesionales con estas habilidades. Por un lado, a medida que la adopción de estas tecnologías se expande, se genera una mayor producción. Por otro lado, la escasez

relativa de talento genera una demanda que se traduce en salarios más elevados.

PRIMA SALARIAL POR PAÍS					
OCUPACIÓN POR SECTORES	Estados Unidos	Reino Unido	Canadá	Australia	Singapur
Administrativo	+ 53%	+ 58%	+8%	+ 14%	+ 35%
Abogados	+ 49%	+ 27%	-	-	- 5%
Marketing y ventas	+ 43%	+ 14%	+3%	+ 7%	+3%
Finanzas	+ 33%	+ 32%	-	-	+11%
Programadores	+ 32%	+ 24%	-	+ 7%	+ 34%
Analistas de sistemas	+ 30%	+ 34%	+15%	+ 7%	+ 28%
Contadores	+ 18%	+ 5%	+17%	-	+ 4%
Prima salarial promedio en todos los empleos	+ 25%	+ 14%	+11%	+ 6%	+ 7%

Ilustración 6- Elaboración propia basada en el “Informe PwC” (Fuente: [26]).

Uso de la IA en actividades comerciales de empresas en la Unión europea

El informe publicado por el “Centro Leibniz” para la investigación económica europea, (2019). Ofrece una visión de los procesos de IA más utilizados y sus ámbitos de aplicación en la economía alemana durante este periodo. El machine learning y el procesamiento del lenguaje natural, son los más extendidos y empleados por el 55% de las empresas que implementan IA. Por otro lado, el reconocimiento de imágenes o sonidos es empleado por el 49% de las empresas. En contraste, solo el 30% de las empresas aplican métodos de comprensión del lenguaje o del texto. Este menor uso podría atribuirse a la complejidad y la necesidad de una alta precisión en estos sistemas, los cuales son críticos en áreas como el servicio al cliente y la automatización de procesos documentales. En el sector TIC, estos métodos son empleados solo por una cuarta parte de las empresas, reflejando una tendencia similar de menor adopción comparada con otros procesos de IA más comunes.

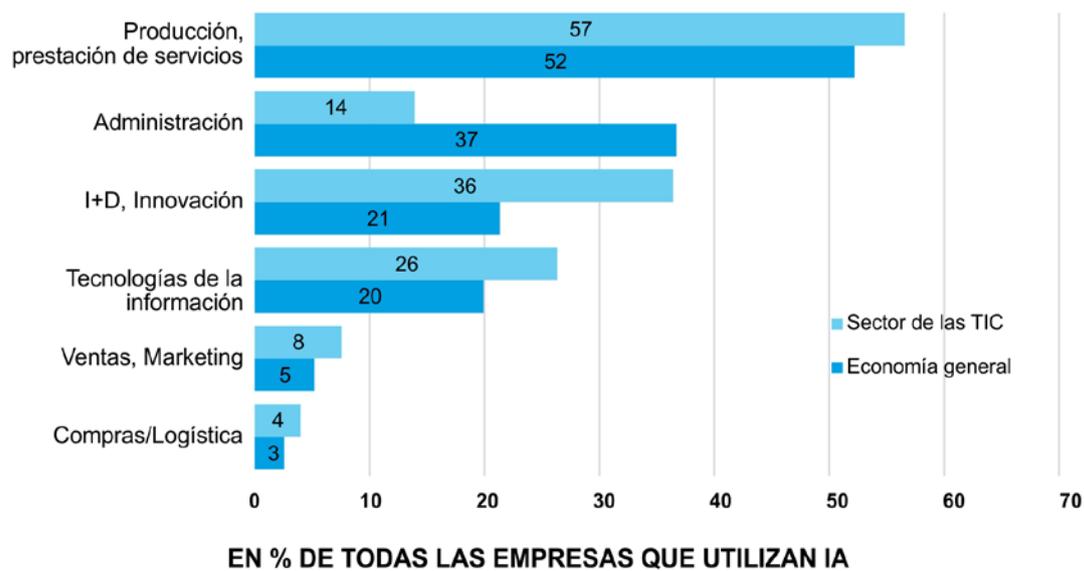


Ilustración 7- Elaboración propia basada en ZEW (Fuente: [27]). Procesos de IA utilizados en empresas de la economía alemana y del sector TIC alemán en 2019 (en %).

La mayoría de las empresas 65% consideran la IA importante para sus operaciones, mejorando la rapidez, precisión, flexibilidad, fiabilidad, rentabilidad y capacidad. Un 12% la considera esencial, ya que sus actividades no podrían realizarse sin ella. Menos de una cuarta parte la ve como menos importante, pudiendo ser reemplazada sin grandes pérdidas. En servicios y comercio mayorista, la IA es esencial para el 20% y 17% de las empresas, respectivamente. Aunque pocos negocios en estos sectores usan IA, muchos se han especializado en modelos basados en esta tecnología. En contraste, las industrias de fabricación de vehículos casi no dependen de modelos de negocio basados en IA.

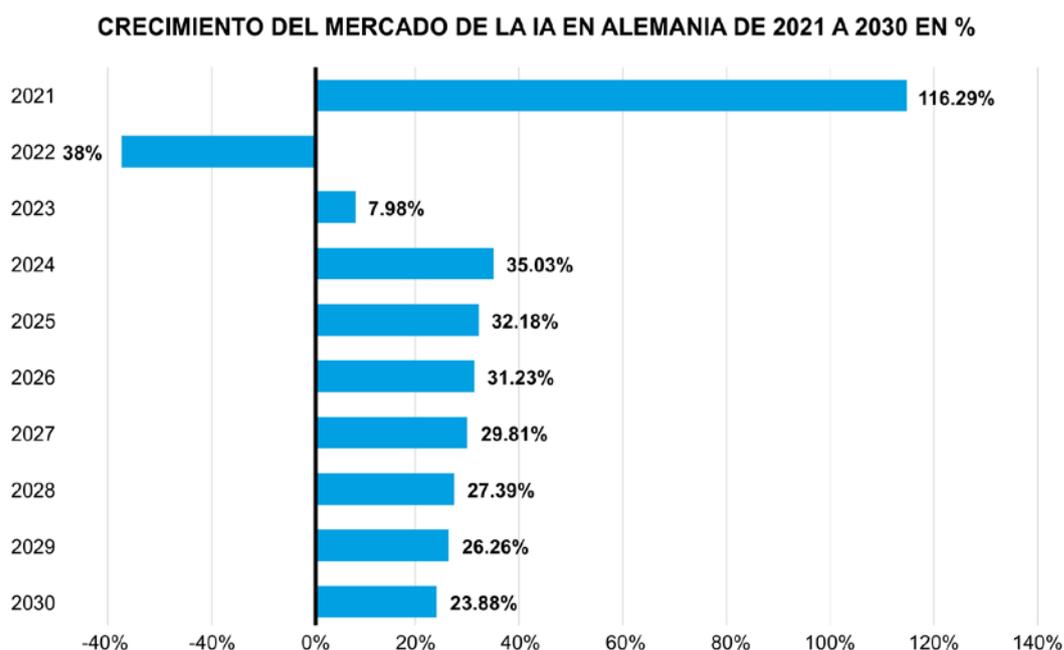


Ilustración 8- Elaboración propia basada en el "In Statista" (Fuente: [28]).

En 2023, la productividad de las empresas alemanas generaron un volumen de negocio de casi 97.000 millones de euros en productos y servicios que incorporan la IA de manera directa. Este dato subraya la creciente influencia de la IA en los diversos sectores de la economía del país.

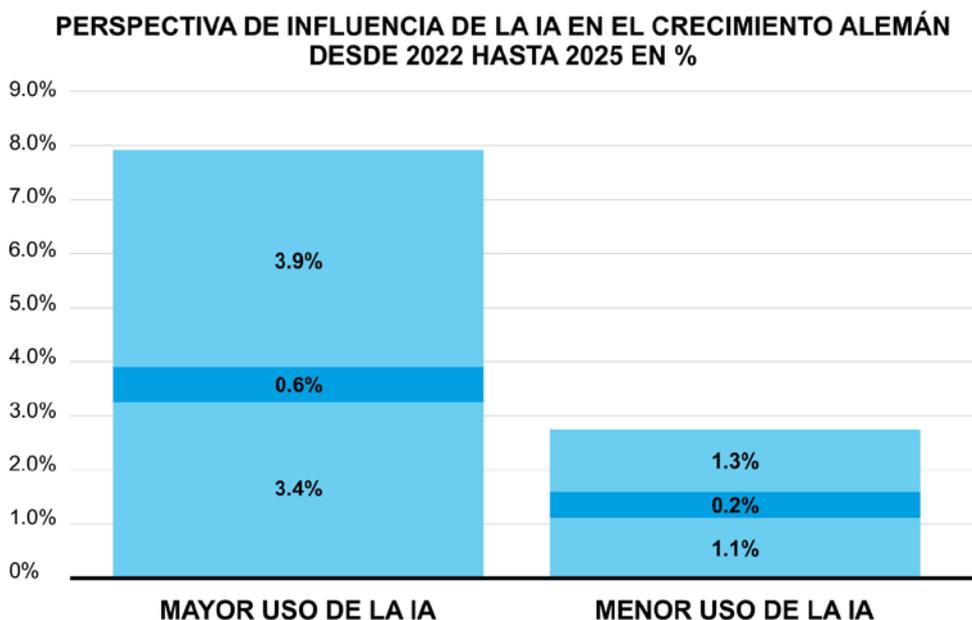


Ilustración 9- Elaboración propia basada en el "In Statista" (Fuente: [29]).

Impacto de la IA en la economía española

Los datos de la IA en la economía española demuestran un crecimiento, que no dista mucho de los países citados líneas arriba. Aunque, está afectando a sectores, ocupaciones y comunidades autónomas de manera diferenciada. En primer lugar, se observa que el uso de la IA se concentra principalmente en la parte financiera, consultoría, servicios informáticos, jurídicos, contables y telecomunicaciones. Estas actividades intensivas han experimentado un aumento substancial alrededor del 13,7% del total de empleos en España. Con un rendimiento en la productividad en torno al 50%, gracias a la IA.

A nivel regional, el estudio muestra que las comunidades autónomas con mayor desarrollo tecnológico y presencia de industrias. Como Madrid, Cataluña, País Vasco y Navarra, son las que presentan una mayor adopción de la IA. Por el contrario, otras regiones con una estructura económica más tradicional, como Extremadura o Castilla de la Mancha, muestran limitaciones. Y, en consecuencia, un impacto más moderado en los niveles de productividad.

OCUPACIÓN CON MAYOR EXPOSICIÓN A LA IA POR CC.AA EN 2023

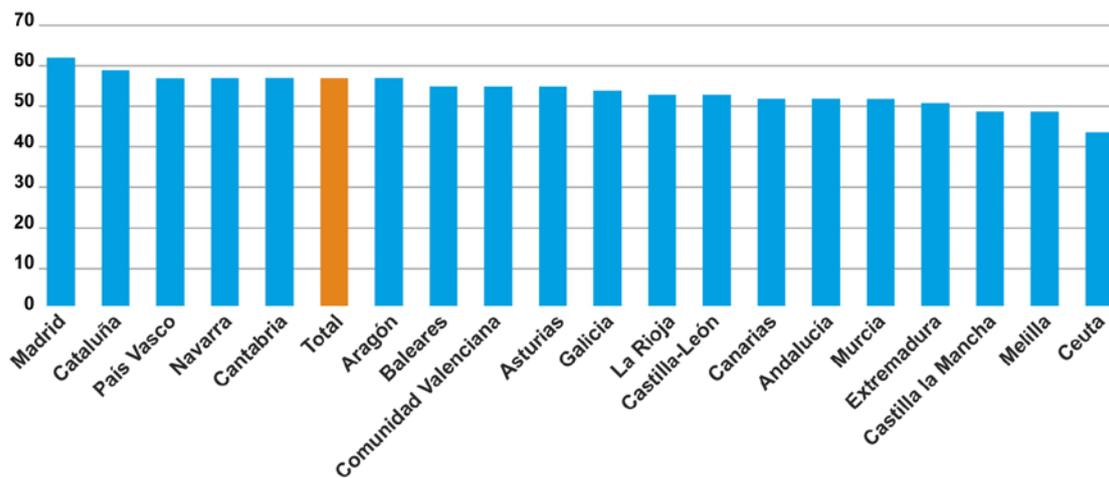


Ilustración 10- Elaboración propia basada en el “Afi – microdatos EPA anuales” (Fuente: [30]).

Vale recordar que estas ocupaciones más expuestas a la IA fueron las que mejor se comportaron durante la pandemia de COVID-19, incrementando su contratación para hacer frente a los retos planteados. De hecho, el volumen de empleos en estas profesiones es un 11,6% superior al nivel prepandémico, mientras que en las menos expuestas el aumento es solo del 2,5%. Es más, el informe destaca que los empleos relacionados con IA cuentan con una prima salarial del 25%, en comparación con otros puestos de trabajo. Indicando la creciente necesidad de perfiles en estas tecnologías emergentes, que aún no logran satisfacer la demanda del mercado laboral. Estos índices indican que la IA se ha convertido en un propulsor de la competitividad, capaz de acelerar el crecimiento de la economía española. Especialmente en aquellos sectores y regiones más avanzados tecnológicamente.

PORCENTAJE DE EMPRESAS QUE USAN ALGÚN SISTEMA DE IA EN ESPAÑA Y LA UE (2021)

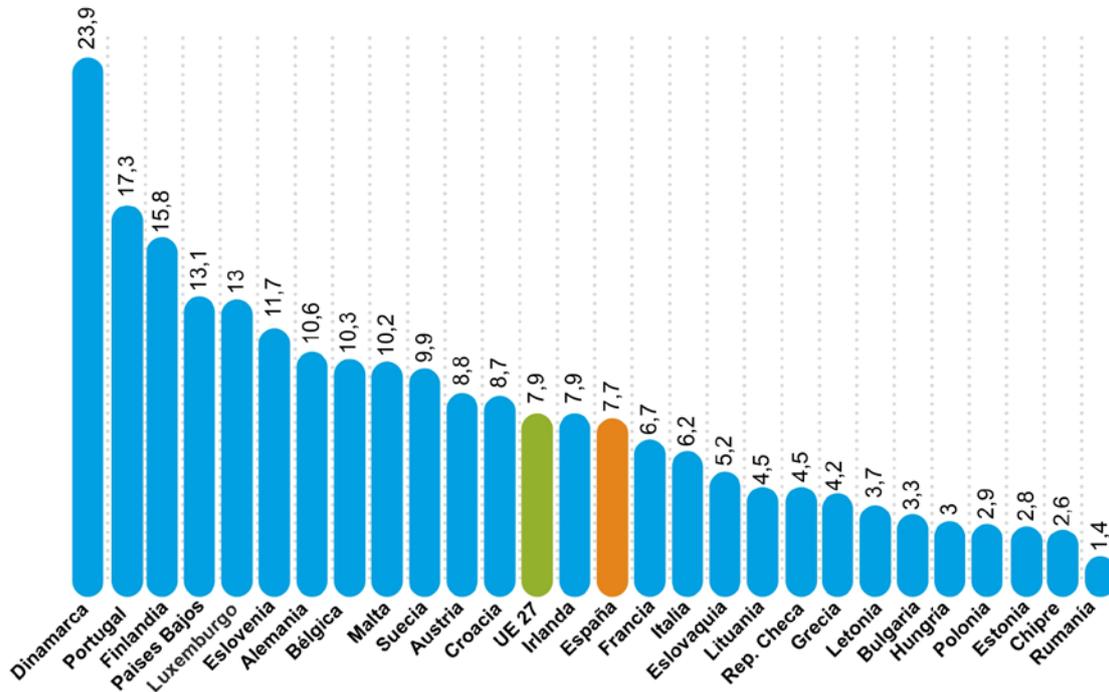


Ilustración 11- Elaboración propia basada en el "Smartlighting" (Fuente: [31]).

El autor (M. Cazzaniga, 2024) [32] sostiene que la adopción de la IA está teniendo un impacto nunca visto en la industria. Argumenta que el acceso a las herramientas entrenadas en tareas específicas, como atención al cliente y métricas de desempeño, aumentó la productividad en un 14% en promedio. Se trata de un efecto nivelador hacia arriba que impacta en la productividad, una característica común de las aplicaciones de IA. Es decir, la IA tiene el potencial de impulsar la productividad de manera más pronunciada entre los trabajadores con un desempeño inicial más bajo, reduciendo así las brechas de rendimiento.

Por una parte, podemos entender que el aumento de los rendimientos del capital impulsado por la IA, también podría incrementar la desigualdad de la riqueza. A medida que la IA eleve la productividad y los beneficios empresariales, los propietarios del capital se verían más favorecidos que los trabajadores. En un plano más optimista, si los aumentos de productividad generados por la IA son lo suficientemente grandes. Los niveles de ingresos podrían aumentar para la mayoría de los trabajadores, nivelando y mitigando así los efectos negativos en la desigualdad.

Al principio, las inversiones en IA están proyectadas para aumentar considerablemente en los próximos años. En 2023 de manera global, se invirtieron 287 mil millones de dólares en empresas de IA. Hay expectativas de que esta cifra crezca, hasta alcanzar los 946 mil millones de dólares en 2030. Las mayores inversiones se destinarán al machine learning y a la IA generativa. España, con un mercado valorado en 4 mil millones de dólares, ocupa actualmente el puesto 12 entre los países con mayor valor en IA. Se estima que el mercado español de IA crecerá hasta los 13 mil millones de dólares en 2030. Hasta ahora, España ha acumulado una inversión de 1,8 mil millones de

dólares en IA. Por esta razón, muchos países están destinando grandes cantidades de dinero al desarrollo de estos sistemas, con Estados Unidos y China liderando esta carrera. A pesar de algunas preocupaciones, se prevé que la IA no eliminará empleos. Sino que creará más puestos de trabajo y mejorará la calidad de estos.

3.2. Economía circular y simbiosis industrial

La economía circular es un modelo económico que busca maximizar el valor de los recursos y minimizar los residuos y las emisiones. Se basa en el concepto de “ciclos cerrados”, donde los materiales y productos se mantienen en uso el mayor tiempo posible. En esta metodología, los productos se diseñan desde el principio para ser duraderos, reparables, reutilizables y reciclables, facilitando su reincorporación al ciclo productivo. Además, promueve el uso eficiente de recursos naturales, agua y energía, reduciendo la extracción de materias primas y minimizando el impacto ambiental. Abordando de manera integral las causas subyacentes de los problemas de sostenibilidad.

En este contexto, una de las aplicaciones más prometedoras de la IA es su capacidad para diseñar materiales y productos circulares. Mediante el análisis de grandes volúmenes de datos sobre propiedades de materiales, procesos de fabricación y ciclos de vida. La IA puede identificar combinaciones y estructuras que reduzcan la huella ambiental. Contemplando aspectos como el diseño de productos que sean más fáciles de desmontar, reparar y reciclar, alargando su vida útil mientras facilita la recuperación de componentes.

La economía circular, fomenta modelos de negocio basados en el servicio y el uso compartido de bienes en lugar de la venta de nuevos productos. Incentiva la colaboración entre empresas para que los residuos de una industria se conviertan en recursos para otra, creando bucles cerrados de materiales. Dando origen a un proceso que se conoce como simbiosis industrial. Al establecer relaciones simbióticas limitamos la extracción de recursos naturales vírgenes, mitigando la cantidad de desechos que terminan en basureros o incinerados. Al depender menos de las materias primas; las empresas se vuelven más resilientes ante la volatilidad de los precios, teniendo más ventajas para enfrentar las crisis u la escasez de recursos. Además, al compartir infraestructura y servicios se optimiza la logística, reduciendo aún más la huella ambiental.

3.2.1. Estrategias y oportunidades

Sin duda, la simbiosis industrial abre puertas a oportunidades comerciales y aporta ahorros; que se transforman en beneficios económicos a las empresas participantes. Al valorizar los residuos y subproductos para otros procesos; se generan nuevas fuentes de ingresos y se reducen los costos asociados a la gestión de este. Asimismo, el intercambio de servicios y conocimientos entre empresas conduce a una mayor transparencia operativa. A la vez que enriquece la competitividad de las empresas fomentando la creación de nuevos modelos de negocio basados en la economía circular. A continuación, veremos cómo funciona esta metodología. [\[33\]](#)

Esta estrategia apoya el desarrollo sostenible al promover la creación de prácticas verdes. Aprovecha los recursos y establece sinergias, que generan oportunidades para el desarrollo de tecnologías y soluciones innovadoras. A su vez, puede impulsar la creación de nuevos empleos relacionados con la economía circular. Por consiguiente, puede mejorar la calidad de vida de las comunidades locales al reducir la contaminación, propiciando el uso más responsable de los recursos naturales.

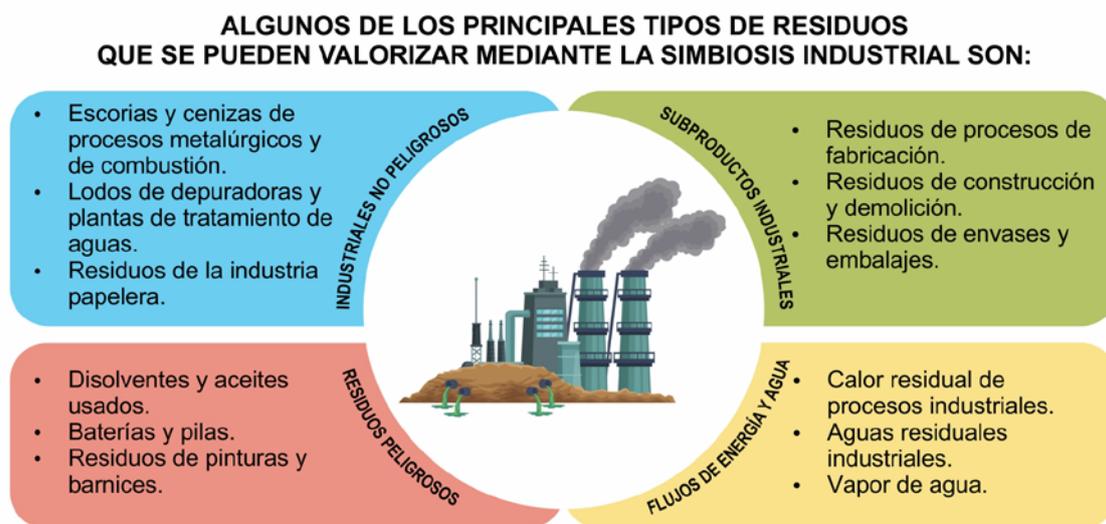


Ilustración 12- Elaboración propia basada en “Proyecto Coralís de la Unión europea” (Fuente: [\[34\]](#)).

Un buen ejemplo es el proyecto “CORALIS” apoyado por la Unión Europea, que se define como una iniciativa global para fomentar la simbiosis industrial. Su objetivo principal es demostrar mediante experiencias reales, cómo implementar soluciones que suscitan beneficios económicos, ambientales y sociales. En lugar de centrarse únicamente en aspectos teóricos, CORALIS aplica la simbiosis industrial en diferentes sectores y contextos, obteniendo resultados tangibles y lecciones replicables. Dinamizando la colaboración intersectorial entre empresas de manufactura, energía, construcción y gestión de residuos para identificar oportunidades de intercambio.

El proyecto ha desarrollado herramientas basadas en IA con una plataforma en línea y guías, para facilitar la adopción de prácticas circulares. De manera que es posible conocer de antemano los potenciales ahorros y riesgos antes de invertir. Además, también proporciona servicios de acompañamiento técnico y facilitación para ayudar a las empresas a desplegar soluciones efectivas y creativas. Avalando todas las estrategias de mitigación ambiental. Podemos considerar que la IA añadida en la simbiosis industrial, ayuda a optimizar todos estos procesos, al identificar oportunidades para promover la circularidad y el uso consciente de estos. [\[35\]](#)

3.3. Aplicación de algoritmos genéticos para rutas de transportes sostenibles.

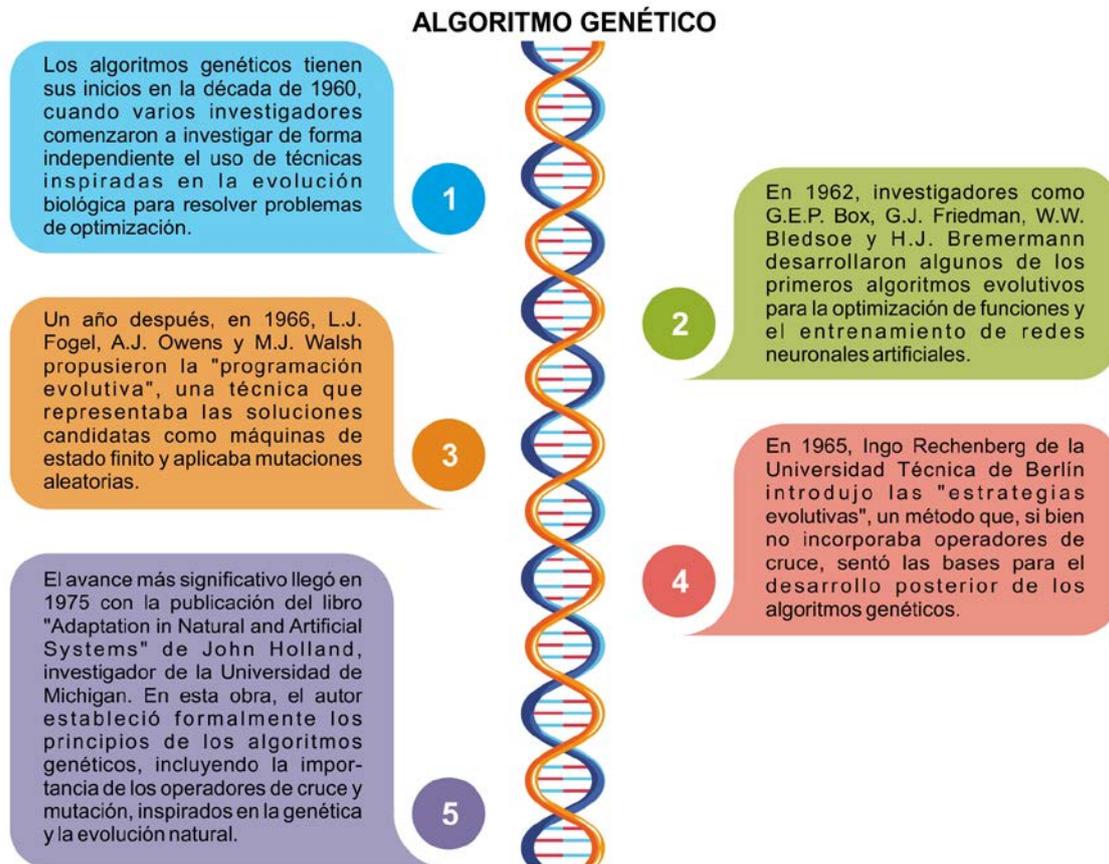


Ilustración 13- Elaboración propia basada en "Algoritmos Genéticos" (Fuente: [36]).

Desde la línea del tiempo hasta los días actuales, los algoritmos genéticos comenzaron a ganar popularidad y se han aplicado en varios campos, como la optimización de funciones, el diseño de sistemas, la programación de horarios, la ingeniería de procesos y en la inteligencia artificial. En las últimas décadas, se realizaron numerosas investigaciones y avances, incluyendo el desarrollo de nuevos operadores genéticos, técnicas de selección, métodos de representación de soluciones y enfoques para mejorar la eficiencia y la convergencia. Actualmente, los algoritmos genéticos están siendo aplicados en la optimización de rutas de transporte, el diseño de productos, planificación de recursos, minería de datos, bioinformática, ingeniería, ciencias de la computación, finanzas y campos científicos. Además, han dado lugar a otras ramas contemporáneas de la computación evolutiva como la programación genética, las estrategias de evolución diferencial y los algoritmos basados en estimación de distribuciones. Lo que demuestra su impacto duradero y su continua evolución como herramienta de optimización y resolución de problemas.

Los algoritmos de optimización; son métodos sistemáticos que buscan encontrar la mejor solución posible a problemas cotidianos. Pero sujeto a ciertas restricciones. Desempeñan un rol medular en el aprendizaje automático.

El aprendizaje automático es una rama de la IA donde las máquinas aprenden y mejoran a través de la experiencia. Los algoritmos de optimización; interactúan con múltiples métodos del aprendizaje automático. Estos métodos incluyen el aprendizaje supervisado, no supervisado y por refuerzo, comentado en los apartados anteriores.

Existen diversos tipos de algoritmos de optimización, cada uno con sus propias características y aplicaciones. A pesar del tema ser amplio, este estudio se centrará en el algoritmo genético para rutas de transporte sostenibles. Los algoritmos genéticos emergen como una herramienta de optimización; son una técnica metaheurística inspirada en los principios de la evolución biológica, como la selección natural y la reproducción genética. En otras palabras, así como en la evolución humana, estos generan poblaciones de soluciones candidatas “rutas” o “cromosomas” que evolucionan mediante operadores como selección, cruce y mutación, guiados por una función de aptitud que evalúa criterios de distancia, tiempo, emisiones y costos. [\[37\]](#)

En primer lugar, es importante considerar la representación de las soluciones “cromosomas”, ya que esta codificación define cómo se interpretarán y manipularán las soluciones dentro del algoritmo. Cada solución candidata “ruta” se codifica como una secuencia de genes que representan las paradas, los vehículos asignados, los horarios, etc. A modo de ejemplo, una ruta que visite las ciudades Alicante, Barcelona, Cádiz y Denia, con un vehículo asignado y horarios específicos, podría codificarse como el cromosoma [A, 12:00, V1, B, 14:30, C, 16:45, D, 18:15, V1].

A continuación, se procede con la generación de la población inicial. Se crea una población inicial de soluciones “rutas”, de forma aleatoria o mediante alguna heurística simple como la del vecino más cercano. Donde se construye rutas; iniciando en un nodo aleatorio y agregando en cada paso el nodo más cercano al último añadido.

La función de aptitud nos ayuda evaluar cada solución candidata, según criterios como distancia total, tiempo de viaje, emisiones de CO₂, número de vehículos utilizados, costos, etc. Por ejemplo, si la distancia total de una ruta es 200 km, las emisiones son 15 kg de CO₂ y el costo es 100, su aptitud podría calcularse como $1/(200 + 15 + 100) = 0.0033$. Las mejores soluciones tendrán un valor de aptitud más alto.

Posteriormente; se realiza la selección de los mejores individuos “rutas” de la población actual para la reproducción, con más probabilidad de seleccionar los de mayor aptitud. Métodos comunes son la ruleta y los torneos.

El siguiente paso es el cruce (crossover); donde se combinan partes de dos soluciones padres para crear dos nuevos descendientes “rutas”. Operadores típicos son el cruce de orden y el cruce parcialmente mapeado. Para ilustrar, si los padres son [A, B, C, D, E] y, un cruce de orden podría generar los descendientes [A, 2, C, 4, E] y [1, B, 3, D, 5].

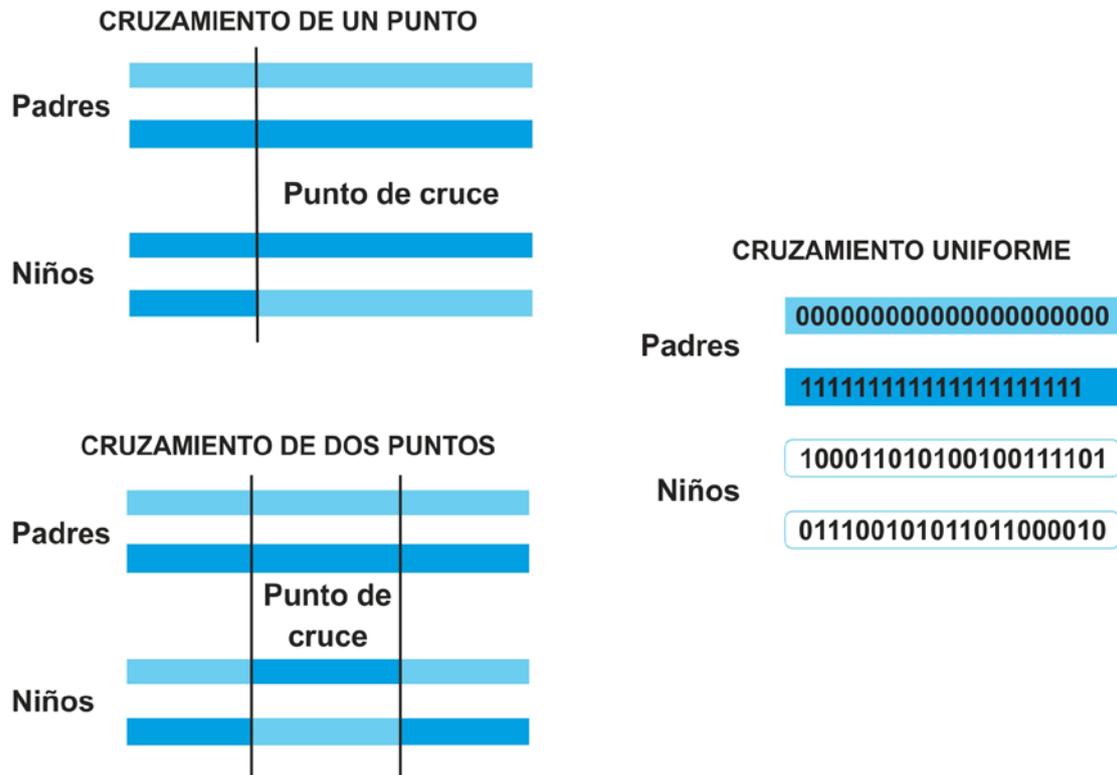


Ilustración 14- Métodos de reproducción elaboración propia basada en “Algoritmos Genéticos” (Fuente: [37]).

La mutación introduce diversidad genética modificando aleatoriamente parte de las nuevas soluciones. Ejemplos de mutación son el intercambio, la inserción y la inversión de genes. En tal sentido, una mutación de intercambio podría cambiar [A, B, C, D] a [A, D, C, B].

Luego; procedemos al reemplazo de las soluciones de peor aptitud en la población por las nuevas soluciones generadas, manteniendo un tamaño constante de la población.

El proceso se repite siguiendo un criterio de parada; como un número máximo de generaciones “se detiene después de cierto número de iteraciones” o la falta de mejora después de cierto número de iteraciones “se para si no hay mejora en la aptitud después de varias generaciones consecutivas, lo que indica convergencia

Finalmente, la solución final representa la ruta óptima o casi óptima según los objetivos de sostenibilidad definidos. Cuanto más complejo sea el problema, conviene utilizar un criterio de parada más flexible como la falta de mejora.

Además de estos pasos, algunas técnicas adicionales que se pueden aplicar incluyen:

- Operadores de cruce y mutación específicos para rutas.

- Búsqueda local para refinar las soluciones.
- Múltiples objetivos como minimizar distancia y emisiones.
- Paralelización para acelerar los cálculos.
- Hibridación con otras metaheurísticas.

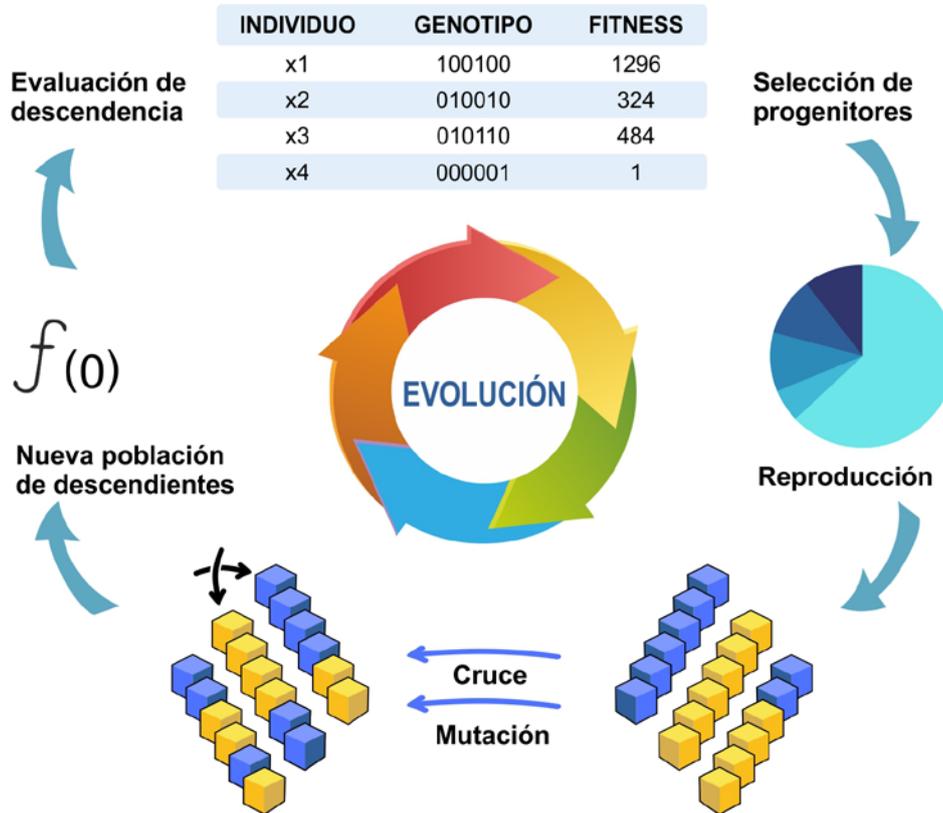


Ilustración 15- Operaciones de cruzamiento para generar nuevos descendientes elaboración propia basada en "Algoritmos Genéticos" (Fuente: [38]).

La codificación adecuada de las soluciones, los operadores genéticos y la función de aptitud son importantes para guiar la búsqueda hacia rutas de transporte ecológicamente viable.

Cuando se utiliza este algoritmo; se debe de considerar si la empresa tiene o no mucho conocimiento o recursos informáticos adecuados. En general, se recomienda comenzar con un tamaño de población moderado, ajustándolo según sea necesario en función del rendimiento observado. Porque un tamaño de población demasiado pequeño; puede conducir a una convergencia prematura. Mientras, que uno demasiado grande puede ralentizar innecesariamente el proceso de optimización.

En los algoritmos genéticos aplicados a la optimización de rutas de transporte sostenibles, el tamaño de la población inicial suele determinarse teniendo en cuenta varios factores:

Por un lado, problemas más complejos con un gran número de paradas, vehículos y restricciones; requieren poblaciones iniciales más grandes para explorar adecuadamente el espacio de búsqueda.

Por otro lado, una población inicial más grande tiende a proporcionar una mayor diversidad genética. Lo que puede ayudar a evitar la convergencia prematura a óptimos locales y mejorar la capacidad de encontrar soluciones óptimas globales.

A su vez, poblaciones más grandes requieren más tiempo y recursos computacionales para evaluar y evolucionar. Por lo tanto, el tamaño de la población debe equilibrarse con las capacidades de cómputo disponibles.

Como hemos dicho líneas arriba; la experiencia previa con problemas similares puede proporcionar una guía sobre el tamaño de población adecuado para lograr un buen rendimiento.

No obstante, el tamaño de la población final no se ajusta directamente. En su lugar, el algoritmo se ejecuta hasta que se cumpla un criterio de parada predefinido. Los criterios de parada comunes incluyen:

El algoritmo se detiene después de un número específico de generaciones (iteraciones) del proceso evolutivo. El número se establece al inicio y depende de la complejidad del problema y de los recursos tecnológicos disponibles.

El algoritmo se detiene; si no hay mejora en la aptitud (fitness) de la mejor solución después de un número determinado de generaciones consecutivas. Lo que indica que se ha alcanzado un óptimo local o global.

El algoritmo se detiene después de un tiempo máximo de ejecución especificado.

El algoritmo interrumpe; cuando se encuentra una solución con un valor de aptitud igual o superior a un umbral predefinido.

El algoritmo frena, cuando la diversidad genética de la población cae por debajo de un umbral, lo que indica que la población ha convergido.

El tamaño final de la población dependerá del criterio de parada utilizado y del progreso del algoritmo. Por ejemplo, si se utiliza un número máximo de generaciones, el tamaño de la población final será el mismo que el tamaño inicial. Pero con individuos "soluciones" más aptos después del proceso evolutivo. Por eso es importante elegir cuidadosamente los criterios de parada y sus valores; para equilibrar la calidad de la solución final y el tiempo de cómputo.

En general, se sugiere ejecutar el algoritmo varias veces con diferentes configuraciones y seleccionar la mejor solución encontrada. Además, se pueden aplicar técnicas adicionales para ajustar el tamaño de la población

durante la ejecución del algoritmo. Por ejemplo; con el escalamiento de la población aumentando o disminuyendo su tamaño. Es deseable en función del progreso o la reinicialización de la población, reemplazar parte de la población con nuevos individuos generados aleatoriamente para mantener la diversidad genética.

CAPÍTULO 4

Los beneficios del algoritmo genético

4.1. Ventajas de los algoritmos genéticos

- Indagan sobre el espacio de búsqueda de manera global, lo que les permite evitar quedar atrapados en óptimos locales.
- Sólo necesitan la función objetivo para guiar la búsqueda, sin requerir información adicional como derivadas o gradientes.
- Pueden manejar fácilmente problemas con múltiples objetivos, restricciones no lineales, variables continuas y discretas.
- La naturaleza poblacional de los algoritmos genéticos los hace adecuados para implementaciones paralelas, lo que puede acelerar la convergencia.
- Son menos susceptibles a quedar atrapados en óptimos locales y pueden manejar discontinuidades y ruido en las funciones objetivo.

Limitaciones

- Pueden exigir un alto costo tecnológico, especialmente para problemas de gran escala o con espacios de búsqueda muy grandes.
- Existe el riesgo de que el algoritmo converja prematuramente hacia un óptimo local si no se mantiene una diversidad genética adecuada.
- La representación adecuada de las soluciones como cromosomas puede ser un desafío, especialmente para problemas complejos.
- Los algoritmos genéticos tienen varios parámetros (tamaño de población, tasas de mutación y cruce) que deben ajustarse adecuadamente, lo que puede ser una tarea compleja.
- Al ser métodos heurísticos, los algoritmos genéticos no garantizan encontrar la solución óptima global, sino buenas soluciones aproximadas.
- Presentan dificultades con problemas que involucran restricciones altamente no lineales o discontinuas.
- A medida que aumenta la complejidad del problema, los algoritmos genéticos pueden enfrentar desafíos de escalabilidad, lo que puede requerir técnicas adicionales como paralelización o hibridación.

Es importante tener en cuenta que a pesar de estas limitaciones. Los algoritmos genéticos siguen siendo una herramienta potente; capaz de enfrentar una amplia gama de problemas complejos y ofrecer soluciones sostenibles. Especialmente, cuando se combinan con otras técnicas o se ajustan adecuadamente a los requisitos específicos del problema. ^[39]

4.2. Estudios de caso y evaluación de resultados

Después de haber detallado los pasos y técnicas involucradas en la aplicación de algoritmos genéticos. Discutiremos el desafío de optimizar rutas de transporte minimizando impactos ambientales y económicos. Evaluando el rendimiento y su efectividad. Los resultados obtenidos nos ayudarán a analizar su desempeño en comparación con otros métodos tradicionales o heurísticas alternativas. Se examinarán métricas clave, como la reducción de distancias recorridas, el ahorro de combustible, la disminución de emisiones de CO₂ y los costos operativos asociados.

UPS ^[40] implementó un sistema avanzado de optimización de rutas llamado ORION (Optimización y Navegación Integradas en Carretera). El sistema utiliza algoritmos avanzados, técnicas de IA y aprendizaje automático para determinar las rutas más eficientes para los conductores de entrega. El objetivo principal de ORION es minimizar la distancia recorrida por los vehículos de entrega, lo que conlleva a una reducción en el consumo de combustible, las emisiones de carbono y los costos operativos. El sistema toma en cuenta diversos factores, como la ubicación de las paradas, las restricciones de tráfico, las ventanas de tiempo de entrega y las características de los vehículos. Inicialmente, ORION proporcionaba a los conductores una ruta estática por la mañana antes de iniciar las entregas. Sin embargo, UPS actualizó el sistema con una función de “optimización dinámica” que permite recalcular y ajustar las rutas en tiempo real a medida que cambian algunas condiciones, como el tráfico, horarios de entrega y los pedidos.

Por medio de la optimización dinámica se ha mejorado la precisión de las estimaciones de tiempo de entrega. Brindando una mayor visibilidad a los clientes sobre el estado de sus envíos. Mientras, ha posibilitado a los conductores administrar sus compromisos diarios de manera más precisa. Desde su implementación inicial, ORION ha permitido a UPS ahorrar en miles de kilómetros recorridos y miles de litros de combustible anualmente. La compañía espera que las últimas actualizaciones aumenten aún más estos ahorros y beneficios ambientales. El sistema de UPS, demuestra cómo los algoritmos avanzados en conjunto con otras tecnologías, cede paso a sistemas de transporte más sostenibles. Sin embargo, otras grandes empresas líderes se han enfrentado a desafíos más complejos en este ámbito.

DHL ^[41] empresa líder en el sector logístico, ha afrontado importantes retos en la optimización de rutas para sus operaciones de entrega. La falta de una planificación eficiente provocaba retrasos, baja productividad y pérdidas crecientes. Para resolver este problema DHL financió a Greenplan. Una nueva empresa que desarrolló un algoritmo genético en colaboración con el Instituto de (Investigación de Matemáticas Discretas de la Universidad de Bonn). El algoritmo ha tenido en cuenta factores relevantes como las características de los vehículos, restricciones de carga útil, emisiones de CO₂ por tipo de vehículo y parámetros para flotas eléctricas, costos, rutas multimodales e intermodales, etc.

Tal proceso generó hasta un 20% de ahorro en costos, al reducir los kilómetros recorridos innecesariamente. La solución de Greenplan ha proporcionado un sistema eficiente para la planificación automatizada de rutas dinámicas de recogida y entrega. La empresa utiliza una arquitectura de software como servicio (SaaS) que permite implementaciones globales y locales, así como actualizaciones rápidas y flexibles. En septiembre de 2023, Greenplan lanzó su solución para a nivel mundial para el transporte por carretera. Suministrando una herramienta práctica y sostenible; en acorde al compromiso de DHL ^[41] de lograr cero emisiones para 2050.

4.3. Impactos éticos, socioeconómicos y de sostenibilidad

La Unión Europea ha dado un paso histórico al convertirse en la primera región del mundo en aprobar una regulación integral sobre la IA. El proyecto de ley fue propuesto por la Comisión en abril de 2021. Siendo un reglamento para establecer un marco normativo y jurídico único, para los sistemas de IA que operen dentro del espacio europeo.

Después de extensas negociaciones entre el Parlamento y el Consejo, se llegó a un acuerdo provisional sobre el texto en diciembre de 2023. El Parlamento Europeo aprobó finalmente el Reglamento el 13 de marzo de 2024. La ley se basa en un enfoque de regulación por niveles de riesgo, prohibiendo usos considerados como “riesgo inaceptable” e imponiendo estrictos requisitos para sistemas de “alto riesgo”. ^[42]

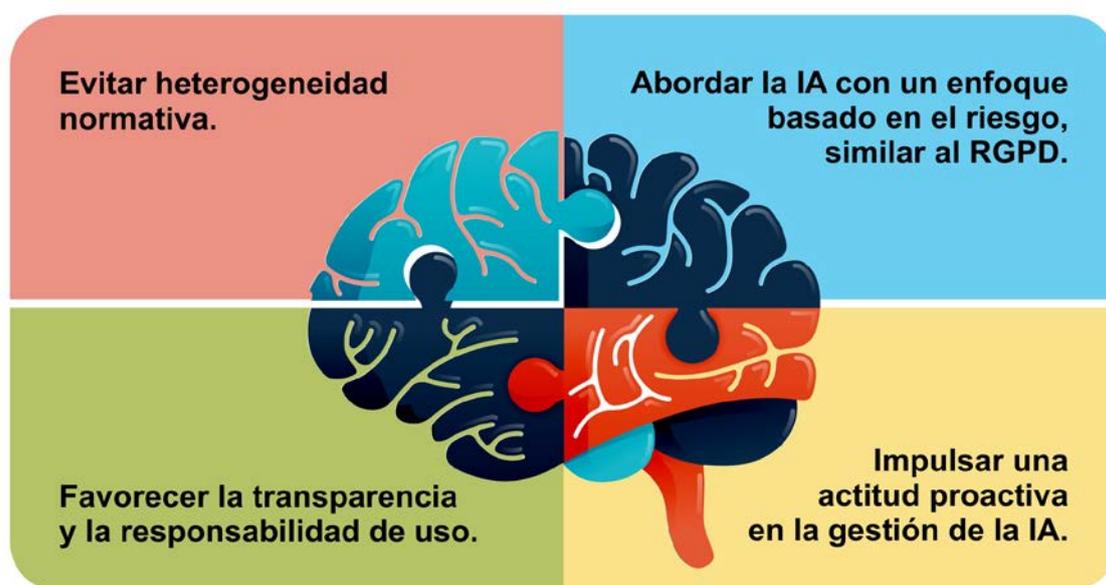


Ilustración 16- Elaboración propia “Ejes de la nueva ley de IA” (Fuente: ^[43]).

Todo ello se fundamenta en propuestas de los ciudadanos en referencia la Conferencia sobre el Futuro de Europa, cuyo objetivo era buscar proteger los derechos fundamentales, promover la innovación digital y garantizar la supervisión humana sobre la IA. Después de su aprobación definitiva, se espera que la Ley de la IA entre en vigor en toda la UE en un plazo de 24 meses. Sin embargo, algunas partes claves entrarán en vigor antes, como la prohibición de sistemas de riesgo inaceptable a los 6 meses y los requisitos de transparencia para modelos generativos de la IA a los 12 meses. Los sistemas de IA de alto riesgo, tendrán un período de gracia de 36 meses para cumplir con todos los requisitos establecidos.

Por lo tanto, la Ley establece salvaguardas para proteger los derechos humanos y la privacidad. El objetivo es fomentar el desarrollo de tecnologías de IA más éticas y centradas en el ser humano. Su implementación será progresiva, con plena vigencia esperada para 2026 en todos los estados miembros.

Procedemos a analizar las principales características de esta regulación

La Ley de IA impone requisitos estrictos para los sistemas de IA considerados de alto riesgo, como los utilizados en áreas críticas como la salud, la educación, empresas y el empleo. Garantizando que estas tecnologías cumplan con normas de seguridad, transparencia y no discriminación, protegiendo los derechos fundamentales de los ciudadanos europeos. En otras palabras, al establecer normas claras y requisitos de seguridad, la regulación puede aumentar la confianza de los consumidores en las empresas y en la IA. Lo que a su vez, puede impulsar la adopción y el desarrollo de nuevas aplicaciones y soluciones. Sin embargo, las empresas u organizaciones que desarrollan o utilizan sistemas de IA de alto riesgo; enfrentarán una carga regulatoria adicional y costos asociados con el incumplimiento de los requisitos establecidos por la Ley. Lo que podría afectar la competitividad de las empresas europeas; en comparación con aquellas de regiones con regulaciones más laxas, como Estados Unidos, China o países en vías de desarrollo. ^[44]

Al establecer un marco regulatorio claro y armonizado, la ley brinda certidumbre jurídica a las empresas que desarrollan o utilizan sistemas de IA en la Unión Europea. Pudiendo ser positivo, al incentivar la inversión y la adopción de estas tecnologías de forma más transparente. No obstante, existe la posibilidad de que los países miembros adopten interpretaciones divergentes en su implementación. Creando una perspectiva diferente, que dificulte su comercialización a nivel europeo o global. Si se logra una implementación eficiente, la idea es que posteriormente pueda ser un modelo para otros países.

“Si bien sus defensores creen que la IA puede eludir los prejuicios humanos en el proceso de contratación, los críticos argumentan que estos sistemas simplemente refuerzan los prejuicios preexistentes” (Artificial Intelligence Act, 2024).^[45]

Con base a lo anterior, su aplicación requerirá la creación de mecanismos de control robustos en cada país miembro. Transformándose en todo un desafío, especialmente para aquellos países con recursos limitados o falta de experiencia en tecnologías emergentes. Por otro lado, aunque esta ley es necesaria y ofrece beneficios. También plantean interrogantes sobre su efecto en el empleo, la privacidad de datos, el impacto social y los sesgos potenciales.

La autora Liliana Edwards (2022), sostiene que la ley debería requerir una evaluación exhaustiva de los posibles impactos en los derechos humanos, más allá de las evaluaciones existentes de protección de datos. Además, se plantea la necesidad de mecanismos de reparación y compensación para las personas afectadas. Sugiriendo la creación de la figura del “Defensor del Pueblo de la IA”, que desempeñe un papel en la resolución de disputas y la protección de derechos. Otros argumentos, cuestionan la capacidad de las autoridades de supervisión del mercado o auditar adecuadamente los sistemas complejos de IA. Señalando la necesidad de desarrollar métodos técnicos y herramientas específicas para la inspección regulatoria.

“Aquellos afectados por los sistemas de IA (a veces considerados usuarios finales, interesados o consumidores) no tienen derechos y casi ningún papel en la ley de IA. Esto es incompatible con un instrumento cuya función es salvaguardar los derechos fundamentales” (L. Edwards, 2022).^[46]

En última instancia, la cuestión fundamental recae en quién se beneficia y quién podría verse perjudicado por la nueva ley. El panorama se complica al analizar la distribución actual de los beneficios entre empresas, trabajadores y la sociedad en general. Desde una perspectiva empresarial, es cierto que al adoptar estas tecnologías, se obtienen ventajas productivas y económicas. Pero, también es cierto que esta situación contrasta con la realidad de los trabajadores, quienes se enfrentan al riesgo de desplazamiento laboral y readaptación constante. Es evidente que aún queda un largo camino por recorrer para lograr un equilibrio adecuado. Esto demanda cooperación y responsabilidad de todas las partes interesadas, para garantizar que los beneficios de estas tecnologías se distribuyan de manera justa y equitativa entre empresas, trabajadores y la sociedad en su conjunto.

CAPÍTULO 5

Desafíos, barreras y estrategias de Implementación

5.1. Desafíos Técnicos y Organizativos

El camino hacia la adopción efectiva de IA en las empresas está oscurecido por impedimentos multidimensionales. Como hemos visto los desafíos no son un proceso lineal. Requieren un apoyo holístico que aborde las complejidades técnicas, organizacionales y culturales inherentes. Uno de los obstáculos consiste en la necesidad de adaptar las infraestructuras existentes a las arquitecturas tecnológicas heredadas. Que a menudo carecen de la capacidad computacional y el rendimiento necesario para respaldar cargas de trabajo intensivas en IA. La transición hacia entornos de nube escalables, el aprovisionamiento de hardware acelerado y la modernización de los sistemas subyacentes, son imperativos para desbloquear el verdadero potencial de esta tecnología.

Además, el manejo de grandes volúmenes de datos plantea otro tipo de desafío. Tiene en cuenta que la IA depende de conjuntos de datos de alta calidad, limpios y etiquetados correctamente para su entrenamiento y optimización. En cambio, las empresas a menudo se enfrentan a datos dispersos, desestructurados y potencialmente sesgados, lo que dificulta la obtención de informaciones confiables. Abordar este desafío implica implementar sólidas prácticas de gobernanza de datos, procesos de enriquecimiento, así como estrategias de almacenamiento y procesamiento escalables.

Otro obstáculo sustancial es la resistencia al cambio dentro de las organizaciones. La IA representa una metamorfosis en los modelos operativos tradicionales, lo que puede generar incertidumbre y escepticismo entre los empleados. Superar esta barrera requiere un liderazgo visionario, comunicación y programas de capacitación exhaustivos. Estos esfuerzos deben centrarse en fomentar una cultura de innovación, desarrollar habilidades roles y responsabilidades existentes. A parte, debemos considerar la alineación de las iniciativas de IA con los objetivos estratégicos de la empresa. Es decir, hay que tener una idea clara; de cómo la IA puede generar valor para los clientes y las partes involucradas. Una falta de alineación puede resultar en inversiones y esfuerzos desaprovechados.

Por un lado, la inversión en IA no debe verse como un gasto más si como una nueva oportunidad de activar el crecimiento. Si bien la implementación inicial puede exigir una inversión considerable, también se debe reconocer el valor agregado que la IA aporta a largo plazo. Una estrategia prudente consiste en adoptar la IA de manera gradual, comenzando con soluciones asequibles y escalando progresivamente por fases. En una primera etapa, la IA puede encargarse de automatizar tareas sencillas y repetitivas, liberando recursos humanos para tareas más complejas y estratégicas. A medida que se

recuperan los costos iniciales, se generan nuevos ingresos, conocimientos y otras líneas de aplicaciones.

Este estudio deja claro que la IA no es una solución única, pero un conjunto de tecnologías adaptables a las necesidades específicas de cada organización. Al evaluar cuidadosamente los procesos críticos y las áreas de mejora potencial, es posible identificar las soluciones de IA más adecuadas y rentables. La evaluación estratégica, combinada con una implementación gradual y una reinversión inteligente. Permite a las organizaciones sacar partido de esta herramienta, sin comprometer su estabilidad financiera. Aunque, deben establecer marcos de trabajo claros para garantizar la responsabilidad de uso.

Por una parte, la aplicación de algoritmos genéticos en la optimización de la cadena de suministro conlleva desafíos en términos de eficiencia, escalabilidad y transparencia. Uno de los principales obstáculos radica en la necesidad de contar con una infraestructura computacional potente y compatible. Capaz de procesar grandes volúmenes de datos y manejar poblaciones extensas en problemas complejos. Lo que en algunos casos puede requerir sistemas de cómputo paralelo o distribuido.

Asimismo, la representación y codificación adecuada de las soluciones candidatas es un punto importante. Ya que una codificación inadecuada, impacta negativamente en su rendimiento dificultando la exploración del espacio de búsqueda. Afectando los propósitos de sostenibilidad. Además, dado el carácter estocástico de los algoritmos, puede existir desconfianza o escepticismo por parte de los tomadores de decisiones y otros interesados. Lo que exige fomentar la confianza y aceptación mediante validación de resultados y demostración de beneficios tangibles.

5.2. Estrategias para superar barreras

La colaboración intersectorial es un elemento que ayuda a remover obstáculos tecnológicos y ambientales. El paradigma se enfrenta a los desafíos aprovechando las sinergias y el intercambio de conocimientos entre diferentes sectores y actores. Materializándose a través de la creación de ecosistemas de innovación, donde empresas, centros de investigación, instituciones académicas y organismos gubernamentales trabajen de manera conjunta. Con lo cual se facilita el flujo de ideas, la transferencia de tecnología y la identificación de soluciones innovadoras para desafíos complejos. Además, se amplía y se comparten recursos, infraestructura y talento. Optimizando las inversiones y acelerando el desarrollo de soluciones sostenibles impulsadas por la IA.

Otra estrategia se refiere al desarrollo de políticas públicas inclusivas que promuevan la adopción responsable de la IA. Las políticas deben abordar aspectos como la equidad, la transparencia, la privacidad y la protección de los derechos fundamentales. Para que se haga realidad, se tiene que involucrar a

diversos grupos de interés, incluyendo comunidades históricamente marginadas garantizando su efectividad y aceptación social.

La inversión en tecnologías emergentes desempeña un papel relevante. Debiendo ir acompañada de un enfoque holístico que considere los aspectos técnicos y también los impactos sociales, éticos y ambientales. Invertir en investigación y desarrollo de soluciones de IA sostenibles, que minimicen el consumo de la huella de carbono en el proceso productivo. Es una acción necesaria para alinear el progreso tecnológico con los objetivos de sostenibilidad.

En este orden, fomentar la transparencia, el compromiso ético en el desarrollo y uso de la IA, es otro pilar pertinente. Implementar mecanismos de auditoría y rendición de cuentas, puede fortalecer la confianza de los usuarios. Asimismo, establecer marcos sólidos basados en principios como la equidad, la no discriminación y el respeto al medio ambiente, es sinónimo de desarrollo responsable. En cuanto a la integración efectiva de soluciones energéticas inteligentes con prácticas ambientales, no siempre es tan simple. Requiere una estrecha colaboración entre expertos en IA, ingenieros energéticos y profesionales ambientales para garantizar soluciones sostenibles y escalables.

Bajo este paraguas, hay que reconocer que las pequeñas y medianas empresas se enfrentan a desafíos adicionales como la falta de recursos financieros, infraestructura y talento especializado. Para superar estas barreras, se pueden implementar programas de apoyo gubernamentales y alianzas público-privadas que brinden acceso a financiamiento, capacitación y asesoramiento técnico en IA. Además, emplear acciones entre grandes empresas y pymes, puede facilitar la transferencia de conocimientos y la creación de ecosistemas más inclusivos.

Las autoridades gubernamentales asumen un rol protagónico, al establecer un marco normativo propicio para estimular y facilitar la transición hacia modelos productivos y de consumo sostenibles. La creación de incentivos económicos y fiscales, resulta indispensable para fomentar la participación empresarial en iniciativas circulares. En tal sentido, se traduce en medidas como reducciones impositivas, créditos fiscales o subsidios para organizaciones que adopten prácticas de reciclaje, reutilización de materiales o integración en parques eco-industriales, constituye un punto neurálgico. Paralelamente, esto significa eliminar barreras burocráticas que obstaculicen la colaboración intersectorial y la adopción de nuevos modelos de negocio. En virtud de ello, se facilita el intercambio de recursos entre actores, economías e iniciativas como la simbiosis industrial.

CAPÍTULO 6

Conclusiones

6.1. Principales hallazgos

El estudio revela que la IA facilita la sincronización entre las operaciones logísticas y los principios de sostenibilidad ambiental, resultando en una cadena de suministro más resiliente. Poniendo de relieve el uso de varias aplicaciones de la IA en la cadena de suministro, aplicadas en la gestión de inventarios, energía, agua, la previsión de la demanda y en la planificación de rutas de transportes. Con la colaboración activa de todos los involucrados, estas aplicaciones mejoran la eficiencia de los insumos y fomentan la sostenibilidad al reducir la huella de carbono. Tecnologías avanzadas como el aprendizaje automático, el aprendizaje profundo, la visión por computadora, el procesamiento del lenguaje natural y los algoritmos genéticos son indispensables para estas optimizaciones.

Las estadísticas de este estudio, ha destacado la creciente importancia de la IA en aumentar la productividad, influir en las primas salariales y variar su adopción según el desarrollo tecnológico y las necesidades específicas de cada país. Los sectores de comunicación, servicios profesionales y financieros tienen la mayor exposición a la IA, aumentando la productividad en un 4,8%. En cambio, la construcción, la industria y el sector primario muestran menor integración de IA. Los empleos con habilidades en IA tienen una prima salarial del 25%, con Estados Unidos liderando con un 43% y el Reino Unido con un 27%. Canadá, Australia y Singapur también presentan primas salariales relevantes. La demanda y valoración de habilidades en IA varía según el mercado laboral y el desarrollo tecnológico de cada país. Sin embargo, la implementación de la IA enfrenta desafíos como la falta de mano de obra especializada y la resistencia al cambio dentro de las organizaciones.

En Alemania, el machine learning y el procesamiento del lenguaje natural son los más utilizados. Mientras que el reconocimiento de imágenes y sonidos es menos común. El 65% de las empresas considera la IA importante, mejorando la rapidez, precisión y rentabilidad. En España, la IA se concentra en sectores financieros, consultoría, servicios informáticos y telecomunicaciones, representando el 13,7% del empleo y mejorando la productividad en un 50%. Madrid, Cataluña, País Vasco y Navarra lideran en adopción de IA. Las inversiones globales en IA fueron proyectadas para aumentar de 287 mil millones de dólares en 2023 a 946 mil millones en 2030. España, actualmente cuenta con un mercado de 4 mil millones, debiendo crecer a 13 mil millones en 2030. Se prevé que la IA creará más empleos y mejorará su calidad.

Aunque este estudio proporcionó datos valiosos sobre el impacto de la IA en la productividad, no conseguimos abarcar todas las diversas maneras en que las empresas implementan esta tecnología. No obstante, todas estas mejoras y

crecimientos; en breve estarán respaldadas por la nueva ley que regula la IA en el espacio europeo. La ley impone sanciones económicas substanciales a quienes infrinjan el reglamento, aplicándose en toda cadena de suministro dentro de la UE como a aquellos fuera de la UE cuyos sistemas de IA se utilicen en el territorio europeo. Esto asegura que la regulación tenga un alcance global, similar al reglamento general de protección de datos.

Recomendaciones prácticas

En el entorno digital es necesario priorizar prácticas sólidas de gobernanza de datos. Así como estrategias que garanticen la calidad y accesibilidad de los datos necesarios para alimentar la IA. No menos importantes es alentar una cultura de innovación dentro de las organizaciones para superar procesos logísticos obsoletos. Pudiendo lograrse mediante un liderazgo visionario y programas interactivos; que desarrollen habilidades y aborden las preocupaciones sobre el impacto en los roles y responsabilidades existentes. Se sugiere realizar un estudio comparativo sobre el impacto de IA en la capacidad innovadora de las empresas. Identificando patrones y tendencias en la adopción de esta tecnología, para la creación de nuevas soluciones.

Para que la colaboración intersectorial gane músculo, se debería crear ecosistemas donde empresas, centros de investigación, instituciones académicas y organismos gubernamentales trabajen de manera conjunta facilitando el flujo de ideas y la transferencia de tecnología. Investigando el uso de simulaciones y modelos basados en IA para prever los impactos de diferentes estrategias sostenibles en la cadena de suministro. Además, se podría investigar los niveles de inversión en desarrollo de soluciones de IA sostenibles, como parte crítica de estas tecnologías. Fomentando la igualdad entre grandes empresas y pymes.

Por último, una investigación sobre el ciclo de vida de los productos podría centrarse en evaluar y mitigar la huella de carbono asociada con su uso. El objetivo principal sería medir las emisiones de carbono en cada etapa del desarrollo y uso de la IA. Desde la producción hasta la distribución y el uso final. Esto incluiría el análisis del consumo de energía durante el entrenamiento y la implementación de modelos de IA, desarrollando algoritmos y técnicas de compresión para reducir el consumo. La investigación también propondría estrategias de mitigación, como el uso de energías renovables y prácticas de reciclaje de hardware. Con un enfoque en la adopción de políticas verdes y programas de certificación. Se espera que los resultados incluyan una reducción de las emisiones y una mayor conciencia sobre prácticas sostenibles en la industria de la IA.

6.2. Reflexión Final

El desarrollo de este trabajo me ha permitido conocer en profundidad cómo la IA puede transformar la cadena de suministro hacia un modelo más resiliente. Podemos considerar que la IA es una herramienta capaz de enfrentar los retos contemporáneos. Desbloqueando potenciales ocultos, reinventando procesos industriales y liderando la transición hacia un futuro más innovador y ecológico.

Todo ello, ha elevado la calidad de los bienes y servicios, optimizando los canales de distribución y ajustando los puntos vulnerables a las necesidades del consumidor. Los beneficios se traducen en productividad y mayores ganancias empresariales. En el contexto actual, global y competitivo, la implementación de la IA en la gestión de la cadena de suministro es una estrategia para el desarrollo saludable de cualquier empresa. Por lo tanto, es imperativo que no solo se adopten IA, más en conjunto implementen prácticas de economía circular, simbiosis o logística verde y cumplan con la ley.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Manrique Nugent, MAL, Teves Quispe, J., Taco Llave, AM, & Flores Morales, JA (2019). Gestión de cadena de suministro: una mirada desde la perspectiva teórica. [Revista Venezolana de Gerencia], vol. 24, núm. 88, págs. 1136-1146. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/290/29062051009/html/>
- [2] Russell, S. J. [Stuart J.] & Norvig, P. [Peter]. (2010). *Artificial Intelligence A Modern Approach*. Disponible en: <https://dl.ebooksworld.ir/books/Artificial.Intelligence.A.Modern.Approach.4th.Edition.Peter.Norvig.%20Stuart.Russell.Pearson.9780134610993.EBooksWorld.ir.pdf>
- [3] Oppy, G. y Dowe, D. (2011). The Turing Test. En: Zalta, E.N. (ed.) *The Stanford Encyclopedia of Philosophy. Metaphysics Research Lab, Stanford University*. Disponible en: <https://plato.stanford.edu/entries/turing-test/>
- [4] BBVA. (2024). El futuro de la IA hacia inteligencias artificiales realmente inteligentes. *BBVAOpenMind*. Disponible en: <https://www.bbvaopenmind.com/articulos/el-futuro-de-la-ia-hacia-inteligencias-artificiales-realmente-inteligentes/>
- [5] Russell, S. J. [Stuart J.] & Norvig, P. [Peter]. (2004). Capítulo 25. En Russell, S. J. & Norvig, P., *Inteligencia Artificial Un Enfoque Moderno* (pp. 1023-1078). *Pearson Educación*. Disponible en: <http://jdelagarza.fime.uanl.mx/IA/Libros/inteligencia-artificial-un-enfoque-moderno-stuart-j-russell.pdf>
- [6] Cepsa. (2024). *Algoritmos verdes una inteligencia artificial más sostenible*. Disponible en: <https://www.cepsa.com/es/planet-energy/innovacion-sostenible/algoritmos-verdes-una-inteligencia-artificial-sostenible>
- [7] Wiley Online Library. (2023). Ciencia de datos, análisis predictivo y big data, una revolución que transformará el diseño y la gestión de la cadena de suministro. *Journal of Biogeography*. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jbl.12010>
- [8] Mohsen, B. [Baha]. (2023). Impact of Artificial Intelligence on Supply Chain Management Performance. *Journal of Service Science and Management*, 16(1), 44-58. Disponible en: <https://doi.org/10.4236/jssm.2023.161004>
- [9] Georgetown Journal of International Affairs. (2024, 5 de febrero). The Role of AI in Developing Resilient Supply Chains. *Georgetown University Journal of International Affairs*. Disponible en: <https://gjia.georgetown.edu/2024/02/05/the-role-of-ai-in-developing-resilient-supply-chains/>

- [10] Khan, S.A.R. [Shahbaz Ali Rana], Yu, Z. [Zhang], Golpîra, H. [Hadi], & Sharif, A. [Arshian]. (2024). Artificial Intelligence Approach to Predict Supply Chain Performance: Implications for Sustainability. *Sustainability*, 16(6), 2373. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/6/2373>
- [11] Cárdenas Cárdenas, J. C. [Jaime Cárdenas Cárdenas]. (2019). *El Machine Learning* [Trabajo final de máster]. *Universidad Libre*. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/17289/EL%20MACHIN E%20LEARNING.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- [12] Díaz-Ramírez, J. (2021). Aprendizaje Automático y Aprendizaje Profundo. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 29(2). Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052021000200201
- [13] A. F. Giraldo Forero y A. F. Orozco Duque. (2023). Evolución del procesamiento natural del lenguaje. *Tecnológicas*, 26(56). Disponible en: e2687. <https://revistas.itm.edu.co/index.php/tecnologicas/article/view/2687>
- [14] Rodríguez, R.D., Peña, M.A., Casco, S.M. (2018). Aplicación de Redes Neuronales Artificiales para la predicción de la demanda de energía eléctrica. *Fpune Scientific*, 2(1), 172-188. Disponible en: <http://servicios.fpune.edu.py:83/fpunescientific/index.php/fpunescientific/article/view/38>
- [15] Sharma, N., Sharma, R., Jindal, N. (2021). Machine Learning and Deep Learning Applications-A Vision. *Global Transitions Proceedings*, 2(1), 24-28. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gltp.2021.01.004>
- [16] Qazi, S., Khawaja, B.A., Farooq, Q.U. (2022). Agricultura inteligente de próxima generación equipada con IoT y habilitada por IA una revisión crítica, desafíos actuales y tendencias futuras. *IEEE Access*, 10, 21219-21235. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3152544>
- [17] Norvento. (2023). Emisiones en España. *Norvento*. Disponible en: <https://www.norvento.com/blog/emisiones-en-espana/>
- [18] Cotec. (2017). *La digitalización podría aumentar el PIB entre un 1,8% y un 2,3% hasta 2025, según un informe de Mckinsey y Cotec*. Disponible en: <https://cotec.es/noticia/la-digitalizacion-podria-aumentar-el-pib-entre-un-18-y-un-23-hasta-2025-segun-un-informe-de-mckinsey-y-cotec/>
- [19] Oficina de Pacto Mundial de la ONU. (2010). *Estabilidad y Progreso Duraderos* [Informe]. Disponible en: https://d306pr3pise04h.cloudfront.net/docs/issues_doc%2Fsupply_chain%2FSupplyChainRep_ES.pdf

- [20] FI Group España. (2024). *Aprobado el Plan Nacional de Algoritmos Verdes*. Disponible en: <https://es.fi-group.com/aprobado-el-plan-nacional-de-algoritmos-verdes/>
- [21] Google. (March 8, 2022). Cumulative capacity of Google's renewable energy contracts from financial year 2011 to 2020 (in megawatts) [Graph]. In *Statista*. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/788556/capacity-of-google-s-renewable-energy-contracts/>
- [22] Dunne, S. (2018). Los 7 principios de la sostenibilidad. *Nuestro Futuro Común*. Disponible en: <https://nuestrofuturocomun.com/los-7-principios-de-la-sostenibilidad/>
- [23] Warnick, J. (2020, 10 enero). IA para la humanidad: cómo Starbucks planea utilizar la tecnología para nutrir el espíritu humano. *Starbucks Stories*. Disponible en: <https://stories.starbucks.com/stories/2020/how-starbucks-plans-to-use-technology-to-nurture-the-human-spirit/>
- [24] Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I., Balaam, M., Dignum, V., Domish, S., Felländer, A., Langhorne, S.D., Tegmark, M. y Fuso Nerini, F. (2020). La función de la inteligencia artificial en el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41467-019-14108-y>
- [25] Statista. (2020). Casos de uso de IA en la Industria manufacturera en todo el mundo a partir de 2020, *Statista*. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/1197949/ai-manufacturing-industry-use-case-worldwide/>
- [26] Martínez Polo, A. (2024). *Los sectores más expuestos a la IA casi quintuplican su productividad y los empleos tienen una prima salarial del 25%* [informe de prensa]. PwC. Disponible en: <https://www.pwc.es/es/sala-prensa/notas-prensa/2024/sectores-expuesto-ia-quintuplican-productividad.html>
- [27] Rammer, C., Bertschek, I., Schuck, B., Demary, V., & Goecke, H. (2020). Einsatz von Künstlicher Intelligenz in der Deutschen Wirtschaft: Stand der KI-Nutzung im Jahr 2019 (ZEW-Gutachten und Forschungsberichte) [informe de investigación]. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*. Disponible en: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/222374/1/1702943917.pdf>
- [28] Statista. (2024). Market growth of artificial intelligence (AI) in Germany from 2021 to 2030 [Graph]. In *Statista*. Disponible en: <https://www.statista.com/forecasts/1462145/ai-market-growth-germany>
- [29] McKinsey & Company (2023). Influence of generative artificial intelligence (AI) on productivity growth in Germany from 2022 to 2040 (in CAGR) [Graph]. In *Statista*. Disponible en:

<https://www.statista.com/statistics/1411594/productivity-impact-gen-ai-automation-germany/>

[30] Afi. (2024). *Impacto de la IA en la economía española: Ocupaciones, sectores y CC.AA.* [informe económico]. Disponible en:

<https://www.afi.es/2024/05/20/inteligencia-artificial-economia-sectores-ocupaciones-comunidades-autonomas/>

[31] Smartlighting. (2023). ¿Utilizan las empresas españolas la inteligencia artificial y el big data? *Nuevo ONTSI sobre el grado de aceptación de estas tecnologías* [informe tecnológico]. Disponible en:

<https://smart-lighting.es/utilizan-empresas-espanolas-inteligencia-artificial-big-data/>

[32] Mauro Cazzaniga & Ms. Florence Jaumotte & Longji Li & Mr. Giovanni Melina & Augustus J Panton & Carlo Pizzinelli & Emma J Rockall & Ms. Marina Mendes Tavares, (2024). *Gen-AI: Artificial Intelligence and the Future of Work. IMF Staff Discussion Notes 2024/001, International Monetary Fund.*

Disponible en:

<https://ideas.repec.org/p/imf/imfstdn/2024-001.html>

[33] CEOE. (2024). *El sector cementero apuesta por la simbiosis industrial en la economía circular.* Disponible en:

<https://www.ceoe.es/es/ceoe-news/sostenibilidad/el-sector-cementero-apuesta-por-la-simbiosis-industrial-en-la-economia>

[34] CORALIS. (2023). *Industrial Symbiosis in Energy Intensive Industries* [Informe de proyecto H2020]. *Unión Europea.* Disponible en:

<https://www.coralis-h2020.eu/>

[35] CORDIS. (2024, 23 mayo). *Cómo conseguir que funcione la simbiosis industrial* [Artículo]. *Comisión Europea.* Disponible en:

<https://cordis.europa.eu/article/id/443712-let-me-show-you-how-to-make-industrial-symbiosis-work/es>

[36] Batista, M., Moreno-Pérez, J. y Moreno-Vega, J. (2009). *Algoritmos Genéticos.* Una visión práctica. *Números*, ISSN 0212-3096, 71. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/38292778_Algoritmos_Geneticos_Una_vision_practica

[37] Arranz de la Peña, J. [Jorge] & Parra Truyol, A. [Antonio]. (2007). *Algoritmos genéticos.* *Universidad Carlos III.* Disponible en:

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/35889597/Algoritmos_Geneticos_app-libre.pdf

[38] Guerra, C. [Cayetano]. (2017, 9 noviembre). *Presentación de Algoritmos Genéticos* [entrada de blog]. Disponible en:

<https://cayetanoquerra.github.io/ia/ce/PresentacionGA.pdf>

- [39] Martínez Álvarez, F.A. [Fredy Alejandro]. (2008). *Optimización de diseño de rutas de vehículos usando algoritmos genéticos* [Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de La Salle]. Ciencia Unisalle. Disponible en: <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1080&context=ep>
- [40] UPS. (2024). *UPS mejorará ORION con optimización continua de las rutas de entrega*. Disponible en: <https://about.ups.com/es/es/newsroom/press-releases/innovation-driven/ups-to-enhance-orion-with-continuous-delivery-route-optimization.html>
- [41] DHL Logistics of Things. (2024, 31 marzo). *The key to green logistics could be this superfast route optimization algorithm*. Disponible en: <https://lot.dhl.com/the-key-to-green-logistics-could-be-this-superfast-route-optimization-algorithm/>
- [42] Comisión Europea. (2021). Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen normas armonizadas en materia de inteligencia artificial (Ley de Inteligencia Artificial) y se modifican determinados actos legislativos de la Unión. *COM (2021) 206 final*. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A52021PC0206>
- [43] Laux, J., Wachter, S. y Mittelstadt, B. (2023). Trustworthy artificial intelligence and the European Union AI act: On the conflation of trustworthiness and acceptability of risk. *Regulation & Governance*, 18(1), 3-32. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/rego.12512>
- [44] PwC. (2024). *El Reglamento de IA, cada vez más cerca: acuerdo preliminar del Consejo y el Parlamento Europeo*. Disponible en: <https://periscopiofiscalylegal.pwc.es/el-reglamento-de-ia-cada-vez-mas-cerca-acuerdo-preliminar-del-consejo-y-el-parlamento-europeo/>
- [45] Pew Research Center. (2023, 20 abril). *Most Americans say racial bias is a problem in the workplace. Can AI help?* Disponible en: <https://www.pewresearch.org/short-reads/2023/04/20/most-americans-say-racial-bias-is-a-problem-in-the-workplace-can-ai-help/>
- [46] Ada Lovelace Institute. (2022). *Regulating AI in Europe* [Informe de expertos]. Disponible en: <https://www.adalovelaceinstitute.org/report/regulating-ai-in-europe/>