



ICAI, Universidad Pontificia de Comillas

# **HACIA UNA IA SOSTENIBLE, PRINCIPALES PUNTOS DE IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.**

Autor: López López – Neira, Jesús

Clave: 201910180

Director: Fernández Fernández, José-Luis

# HACIA UNA IA SOSTENIBLE, PRINCIPALES PUNTOS DE IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.

**Autor:** López López - Neira, Jesús.

**Director:** Fernández Fernández, José Luis.

**Entidad Colaboradora:** ICAI – (Universidad Pontificia Comillas).

## RESUMEN DEL PROYECTO

El sector tecnológico ha permitido a muchas industrias reducir su huella ecológica. Sin embargo, a medida que el resto de las industrias se han vuelto más sostenibles, este sector ha aumentado su impacto medioambiental sin recibir el mismo escrutinio. En este estudio se revisa el impacto medioambiental del proceso productivo de la inteligencia artificial que está en su mayoría concentrado por los centros de datos. Finalmente, se desarrollan una serie de amenazas y oportunidades a las que se enfrenta el sector para llegar a ser más sostenible, prestando especial atención a la protección de las comunidades y los ecosistemas.

**Palabras clave:** *Sostenibilidad, Inteligencia Artificial, Impacto Medioambiental, Centros de Datos, Tecnología*

# MOVING TOWARDS SUSTAINABLE AI, KEY ENVIRONMENTAL IMPACT AREAS.

**Author:** López López - Neira, Jesús.

**Director:** Fernández Fernández, José Luis.

**Entity:** ICAI – (Universidad Pontificia Comillas).

## ABSTRACT

The technology sector has enabled other industries to reduce their ecological footprint. However, as the rest of the industries have become more sustainable, this sector has increased its environmental impact without receiving the same scrutiny. This study reviews the environmental impact of the artificial intelligence production process, which is mostly concentrated in data centers. Finally, it develops a series of threats and opportunities that the sector faces in order to become more sustainable, paying special attention to the protection of communities and ecosystems.

**Keywords:** *Sustainability, Artificial Intelligence, Environmental Impact, Data Centers, Green AI*

## Índice

Introducción.....	5
Objetivos.....	5
Metodología.....	5
Estado de la Cuestión .....	7
Definición de Conceptos .....	9
¿Qué es la IA? .....	9
¿Cómo funciona un sistema de IA?.....	9
Partes de un sistema de IA desde la perspectiva medioambiental.....	11
Desarrollo del Impacto Medioambiental de la IA .....	12
Eficiencia de los Algoritmos y Modelos de IA .....	12
Consumo de Recursos en los Centros de Datos .....	14
Consumo Energético .....	15
Consumo de Agua .....	16
Basura electrónica y reciclaje .....	18
Guía para una IA sostenible .....	20
Amenazas del Sector .....	20
Oportunidades del Sector .....	22
Discusión y Limitaciones .....	25
Conclusión.....	26
Bibliografía.....	27

# Introducción

La reciente aparición de nuevos modelos de Inteligencia Artificial (IA) ha generado, en los últimos años, un intenso debate sobre los usos y restricciones que deben aplicarse sobre ella. Sin embargo, la incipiente implementación y el continuo desarrollo de estos modelos complica el estudio cuantitativo de su impacto, entendiendo impacto en un sentido amplio; económico, social, medioambiental.

Las soluciones informáticas, entre ellas las basadas en IA, tienen un alto potencial para reducir el impacto medioambiental de otras industrias. Sin embargo, el carácter abstracto y técnico de las soluciones de IA hacen pasar desapercibido su propio impacto. Mientras otras industrias se vuelven más sostenibles gracias a los avances informáticos, la propia industria informática consume más espacio, más energía y genera mayor impacto sobre el medioambiente.

## Objetivos

Este estudio pretende hacer palpable el impacto medioambiental de la IA, en especial, abriendo las puertas a profesionales especializados en otras disciplinas y aquellos que, en general, no estén familiarizados con el funcionamiento de la IA. Por tanto, el objetivo es ofrecer una visión de cómo se ejecutan estos servicios tecnológicos y cuál es su interacción con el medio. Explicar su proceso de funcionamiento y recalcar cuáles son los puntos más sensibles desde una perspectiva de sostenibilidad.

Por tanto, no es objetivo de este estudio realizar una explicación detallada de las consideraciones técnicas, ni estudios empíricos sobre el impacto de las distintas áreas. En cambio, se pretende desde una perspectiva humanista entender las problemáticas que estas herramientas pueden generar sobre el ser humano y los ecosistemas dónde vive.

## Metodología

Para el desarrollo de este estudio, hemos comenzado acotando el concepto de IA para prevenir las diferencias entre la teoría y su aplicación práctica. Seguidamente, hemos estructurado las partes que conforman un sistema de IA. Para cada una de las partes se ha realizado una revisión de la literatura existente en relación con su impacto medioambiental.

Con este acercamiento granular hemos podido separar el desarrollo de las distintas etapas de las herramientas de IA, facilitando la comprensión sobre su impacto medioambiental. Después se han desarrollado los puntos más sensibles de cara a tener una IA sostenible que aporte valor al ser humano. Por último, en el estudio se ofrece una discusión y una conclusión sobre el trabajo presentado.

# Estado de la Cuestión

Durante los últimos años hemos vivido un auge del desarrollo de la IA que sea popularizado recientemente por proyectos como ChatGPT y otros modelos de IA generativa. Los nuevos avances en los modelos han provocado una carrera entre las grandes empresas tecnológicas que han dedicado enormes cantidades de financiación a la IA. Estas tecnologías han influido al alza en los mercados de valores por su potencial beneficio, todo ello, fomentando nuevas inversiones que acelerarán el crecimiento de la industria.

No cabe duda de que el avance tecnológico actual está en crecimiento, motivado por las empresas tecnológicas y los mercados financieros, sin embargo, la literatura académica y la regulación de las instituciones no se ha quedado atrás. Gran parte de la corriente académica y la legislación defiende la premisa de una tecnología al servicio del ser humano y aboga por defender valores fundamentales de las sociedades en las que vivimos (Fernández Fernández, 2021; Reglamento de Inteligencia Artificial, 2024).

Entre estos valores, solemos encontrar el respeto de los derechos de humanos, la justicia y la privacidad, así como, la exigencia de medidas como la transparencia, la responsabilidad o la defensa de la competencia. La idea general subyace en que la tecnología debe estar supeditada al bienestar del ser humano.

En las palabras de (Habermas, 1984, p. 58), “Pues la cuestión no es que agotemos las posibilidades de un potencial disponible o de un potencial aun a desarrollar, sino queelijamos aquello que podemos querer para llevar una existencia en paz y con sentido.” En última instancia se entiende que la optimización técnica no implica mejores sistemas sociales. Y, aunque la optimización técnica es una herramienta para mejorar dichos sistemas, los principios que los rigen no deberían estar únicamente sometidos a la productividad ni a la propia tecnología.

La sostenibilidad y los derechos humanos están estrechamente relacionados, puesto que, prácticas insostenibles como la degradación del medio ambiente y la explotación abusiva de recursos naturales son prácticas que desfavorecen y encarecen las iniciativas enfocadas a su cumplimiento. Este hecho se puede ver reflejado en los objetivos de desarrollo sostenible declarados por la ONU, dónde es palpable el protagonismo que se cede a la protección y el mantenimiento de los ecosistemas como base para el cumplimiento de los derechos fundamentales.

Las principales amenazas a nivel medioambiental, como el cambio climático, desde hace tiempo son un foco de atención a nivel global. Motivadas por pactos como el Acuerdo de París dónde se establecen medidas transversales para mitigar el aumento de los gases de efecto invernadero y se promueve la financiación y las actividades para la obtención de tecnologías limpias.

Por otro lado, de acuerdo con el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, los estados tienen la obligación de garantizar que las actividades económicas, incluyendo la innovación y el desarrollo tecnológico, sean compatibles con la realización de los derechos humanos (ONU, 1966). Por lo tanto, es fundamental que la industria de la Inteligencia Artificial adopte prácticas sostenibles y éticas que minimicen su huella ecológica y promuevan el bienestar humano.

En aras de reducir el impacto medioambiental y de cumplir con los acuerdos y pactos internacionales, otras industrias se han apoyado en el sector tecnológico. Con la ayuda de las soluciones informáticas como la automatización, el desarrollo de algoritmos o la recolección de datos, muchas industrias han reducido considerablemente su huella ecológica. Sin embargo, el sector tecnológico que permite esta transformación ha estado durante muchos años alejado del escrutinio que reciben el resto de las industrias.

La falta de transparencia y la abstracción que proporcionan estos servicios propicia que la industria informática acapare un mayor porcentaje del consumo energético global, generando un incremento en su impacto medioambiental sin llamar la atención. Durante años la poca concienciación y la falta de regulación ha provocado que los servicios informáticos no hayan premiado de la misma medida que otras industrias la eficiencia energética y el impacto medioambiental (Manner, 2023; Kern, 2015).

El progreso y la regulación hacia un sector tecnológico sostenible es un punto de principal interés en el cumplimiento de los derechos fundamentales por los que abogan los convenios internacionales y los valores de la Unión Europea. En particular las nuevas tendencias como las herramientas basadas en IA y, el aumento de la demanda que viene asociado a ellas, han impulsado llamadas a su regulación, así como, a una mayor transparencia del impacto medioambiental de la infraestructura en la que se basan para su proceso productivo.



# Definición de Conceptos

## ¿Qué es la IA?

El término de la IA es especialmente amplio por sus diferentes usos en la literatura. Este incluye desde las aplicaciones informáticas hasta las teorías de la filosofía, psicología o la ciencia ficción. En el ámbito de la informática, el concepto de IA fue promovido por Alan Turing que puso a juicio la ‘inteligencia’ de las máquinas sugiriendo problemas como la prueba de Turing. En general, el campo de la IA en informática está inspirado en la psicología y la neurociencia de dónde los investigadores se apoyaban para buscar ideas y crear nuevos algoritmos como es el caso de las redes neuronales.

Esta convergencia de disciplinas puede difuminar la realidad que hay detrás de un sistema de IA y confundir a aquellos que carezcan de conocimientos técnicos. Todos estos campos dan significado y enriquecen nuestro concepto de la IA, pero, en este trabajo, acotaremos el ámbito de estudio al impacto que pueden tener estas herramientas actualmente y en el futuro cercano. Para poder optar por una IA sostenible primero debemos entender su interacción con el medio, es decir, cómo funcionan.

Dentro del campo de la IA existen una gran variedad de aplicaciones con distinta complejidad. Por ello, y sin distanciarnos de nuestro objetivo, nos centraremos en las aplicaciones más costosas en el consumo de recursos, es decir, aquellas con un mayor impacto medioambiental. Estas aplicaciones dentro del ámbito del análisis de datos se conocen como ‘Machine Learning’ y ‘Deep Learning’. Por ejemplo, los nuevos y populares modelos de IA que han tenido una gran repercusión en los medios como ChatGPT (Microsoft), Gemini (Google) o Llama (Meta) son aplicaciones dentro del campo de estudio del ‘Deep Learning’.

Para poder entender el impacto medioambiental de la IA es importante ser consciente de los recursos que utilizan estas aplicaciones. A continuación, desglosaremos los pasos que sigue un modelo de IA de estas características, no desde un marco teórico, sino práctico, para comprender qué partes del proceso son sensibles y críticas en el estudio de la sostenibilidad. El primer paso para entender el proceso de las soluciones de IA es establecer las partes que lo conforman.

## ¿Cómo funciona un sistema de IA?

El proceso de creación de un sistema de IA puede ser descrito en varios pasos. El proceso comienza con la definición del problema que se quiere resolver. Por ejemplo, en el campo de la medicina existen sistemas de prevención que tratan de predecir problemas cardíacos basándose en datos actuales del paciente. Una vez claro el objetivo, se procede a la recolección de datos necesarios para el modelo, en el caso anterior podríamos tomar datos como la influencia de la tensión, la temperatura o las horas de sueño del paciente.

A partir de este momento comienza el entrenamiento del modelo, donde el objetivo es intentar encontrar las relaciones entre los datos que nos ayuden a predecir si el paciente experimentará o no problemas cardíacos. Lo normal en esta fase es probar varias soluciones, entrenar modelos utilizando diferentes datos y técnicas matemáticas para poder compararlos, tomando al final, el que mejor resultado o precisión tenga en la tarea que hemos definido. En la relación a nuestro ejemplo podríamos imaginar, de forma arbitraria, que la mejor solución de IA usa los datos de la tensión del paciente y las horas de sueño.

Como sabemos el entrenamiento de un modelo de IA implica realizar operaciones entre los datos, operaciones que se realizan en ordenadores por unidades de procesamiento, es decir, microprocesadores. Una vez se termina de entrenar un modelo, el remanente es una lista de operaciones matemáticas que permiten obtener con mayor o menor precisión el resultado, en nuestro ejemplo, predecir si el paciente tendrá problemas cardíacos. Tras el entrenamiento esa lista de operaciones matemáticas se conoce como un modelo de IA y puede usarse con los datos de cualquier otro paciente para tratar de predecir el nuevo resultado.

Desde la perspectiva de la sostenibilidad el punto más importante ocurre cuando se entrena o se ejecuta el modelo de IA. Esto implica el cálculo de operaciones matemáticas y, por tanto, el uso de un ordenador que necesita energía para su funcionamiento. De hecho, para la ejecución y el entrenamiento de muchos modelos es necesario realizar cálculos intensivos que requieren grandes cantidades de energía y recursos computacionales. Esto se logra a gran escala mediante el uso de centros de datos donde se pueden encontrar hileras de ordenadores especializados para este tipo de operaciones matemáticas.

En general, esta es la infraestructura que permite implementar todos los servicios conocidos como la nube. La nube, dicho de otro modo, es un centro de datos. Esta

infraestructura permite reducir el coste y el impacto energético de los procesos informáticos basándose en economías de escala. Con esta información fundamental sobre el proceso de funcionamiento de un sistema de IA podemos dividir las partes desde la perspectiva medioambiental.

## **Partes de un sistema de IA desde la perspectiva medioambiental**

En primer lugar, encontramos los propios modelos de IA. El primer paso para poder ejecutar una aplicación de IA es diseñarla, lo que implica escribir un código que sea capaz de resolver el problema en cuestión. Los modelos de IA son confeccionados por los analistas de datos, matemáticos o programadores. Estos profesionales desarrollan el algoritmo y programan código necesario para que pueda ser ejecutado en un ordenador. Según como se desarrollen estos modelos el impacto medioambiental puede reducirse.

En segundo lugar, tenemos los centros de datos que centralizan los recursos y permiten ejecutar grandes cantidades de operaciones. Los modelos, dependiendo del número de operaciones, también pueden ejecutarse en nuestros propios equipos, aunque, la nube es un servicio cada vez más utilizado por las empresas por su fácil escalabilidad y su reducción de costes. Además, por su capacidad de computación las operaciones más costosas a nivel energético se realizan en estos lugares.

En tercer lugar, vamos a considerar los propios materiales que forman los equipos informáticos. Estos equipos necesitan metales que son especialmente sensibles para el medioambiente por el impacto que pueden tener en los ecosistemas y tienen un proceso de reciclaje complejo. A continuación, desarrollaremos cada uno de estos puntos para entender con mayor profundidad su impacto medioambiental.

# Desarrollo del Impacto Medioambiental de la IA

## Eficiencia de los Algoritmos y Modelos de IA

En el ámbito del análisis de datos, tanto a nivel académico como profesional, la tendencia es conseguir modelos con mayor precisión y mejor resultado para la tarea a resolver. Este indicador ayuda a conseguir el objetivo del proyecto, pero, en la práctica suele acaparar demasiada importancia. La energía, en cambio, es una métrica que raramente es considerada a nivel profesional. Esto en parte se debe a la falta de concienciación de los programadores y la dificultad que conlleva su cálculo.

El consumo total de energía que necesita un ordenador o un centro de datos es fácil de averiguar basándonos en el uso de la batería o en la factura de la electricidad. Sin embargo, el problema aparece cuando queremos discernir qué parte del consumo total está destinada al modelo de IA en cada caso. Como regla general y por intuición, podemos medir el tiempo que tarda un sistema de IA en llegar a un resultado, cuanto mayor tiempo este en uso el ordenador, mayor energía necesitará. Esta medida es un buen indicador cuando probamos distintas posibilidades en la misma máquina, aunque, no siempre es fiable (García Martín, 2017).

Las empresas usan el indicador del tiempo para mejorar la experiencia de usuario de sus soluciones, sin embargo, es poco común que exista una concienciación sobre el uso energético del código que se produce. Para realizar código sostenible, podemos empezar por elegir las opciones que se ejecuten más rápido, normalmente transformándose en menos operaciones y menor uso energético.

Los proyectos informáticos están siempre en constante desarrollo, desde las aplicaciones de los móviles hasta los modelos de IA más punteros, el objetivo es sacar al mercado un producto funcional para probarlo y recibir información de los clientes. De esta forma, el equipo puede ordenar las prioridades de los clientes según vayan surgiendo. Esto es, de forma muy simplificada, es el objetivo de la metodología ágil.

Esta forma de trabajo que es la más común en la industria tecnológica permite pivotar y cambiar fácilmente el estado actual del producto. Sin embargo, cuánto más antiguo es el proyecto y el código, más actualizaciones dependen de este. Los costes y la

complejidad de hacer cambios incrementan (Sneed, 2020). Así es el caso de la industria aeronáutica y bancaria que mantienen código con más de medio siglo de antigüedad debido al coste y la sensibilidad que caracterizan a algunos de sus sistemas.

A pesar del coste y el impacto que puede suponer, la cantidad de energía que consumen estos algoritmos no se tienen en cuenta en el proceso de desarrollo e investigación. Esto provoca una falta de responsabilidad y capacidad en la toma de decisiones, puesto que, en una situación dónde tengamos dos modelos muy parecidos queremos optar por aquel que consuma menos energía y, por tanto, reducir el impacto medioambiental.

Es vital transmitir a las empresas y a los profesionales que es posible influir en la sostenibilidad del código, así como, educar y ofrecer los recursos necesarios a los programadores para su cumplimiento (García-Martín, 2019). Consecuentemente, si se toman las métricas necesarias, será posible elegir las decisiones técnicas que fomenten proyectos más sostenibles.

El primer problema que encontramos estriba en medir la energía de los modelos, por la complejidad de tomar medidas exactas, sin embargo, ya existen varias herramientas que pueden servir para estimar su impacto. Lo importante es aplicar métricas que ofrezcan información sobre qué modelos son preferibles frente a otros por su impacto medioambiental y acostumbrar a los equipos para que las implementen. Además, una vez elegidos los mejores modelos, existen técnicas que podrían utilizarse para ‘reducir’ el modelo, mermando el tiempo y la energía que producen, a veces, a cambio de un poco de precisión en el resultado.

El esfuerzo dedicado a conseguir un modelo de IA más eficiente debería estar relacionado con la cantidad de veces que se va a utilizar. Por tanto, deberíamos poner especial foco en la eficiencia cuando se trate de operaciones comunes. Modelos de grandes empresas o servicios que vayan a estar en constante funcionamiento. Como puede ser el caso de navegadores de internet, redes sociales o funcionalidades del sistema operativo de los ordenadores y los móviles. Cuando se necesita un modelo para un uso específico y acotado, como es el caso de muchas empresas, la mejor solución tanto a nivel de coste como por sostenibilidad puede ser obtener un modelo ya entrenado o un servicio de un tercero. En estos casos, es esencial la transparencia de las métricas del modelo

original o del tercero para fomentar que la industria y la legislación establezcan la competencia y la responsabilidad sobre el impacto medioambiental.

## **Consumo de Recursos en los Centros de Datos**

Los centros de datos son una parte fundamental de la industria tecnológica. En estas soluciones se basan la mayoría de los servicios en la nube. Gracias a la economía de escala con este modelo de funcionamiento es posible ofrecer una opción más eficiente y escalable a las empresas que mantener sus propias infraestructuras.

En los últimos años la demanda de productos y servicios tecnológicos está en aumento. Esta tendencia implica no solo un incremento en el gasto energético de los centros de datos sino la construcción de nueva infraestructura. Por tanto, los recursos necesarios y el impacto medioambiental que supone este sector son cada vez más relevantes en la industria y en la sociedad.

Además, hay una tendencia de las empresas globales a crear servicios distribuidos, es decir, a utilizar equipos informáticos en centros de datos de diversas localizaciones. Los servicios distribuidos permiten ofrecer soluciones a los usuarios con mayor velocidad y granularidad. Consecuentemente, la localización de los centros de datos tiende a distribuirse por zonas, fomentando la construcción de nuevas infraestructuras.

Desde una perspectiva general el impacto de los centros de datos es considerablemente menor que el funcionamiento de los equipos en las oficinas y empresas. Sin embargo, la construcción y el funcionamiento de estas bases tecnológicas concentra su impacto en la localidad dónde extrae los recursos. Por tanto, estos lugares son los más sensibles desde un punto de vista medioambiental dada la competencia y la accesibilidad de los recursos en la zona.

El acceso a soluciones en la nube, es decir, a ordenadores en los centros de datos, se encuentra repartido principalmente por algunas de las principales compañías del sector tecnológico. Empresas como Google, Amazon y Microsoft alcanzan un 65% de cuota de mercado (Synergy Research Group, 2024). Los centros de datos promueven la eficiencia del sector, pero a su vez, generan un problema de transparencia para la mayoría de las empresas al depender de terceros, dificultando el conocimiento y la responsabilidad de las empresas contratantes sobre el consumo de recursos asociados a su actividad económica (Mytton, 2020).

En cuanto a la construcción se recomienda un diseño modular que permita la escalabilidad de los centros de datos. Además, el uso de materiales reciclados y la exigencia de estándares de construcción sostenible pueden reducir considerablemente el impacto medioambiental de estas infraestructuras. El acceso de las energías renovables y a climas fríos para los sistemas de refrigeración también pueden ser puntos clave para construir centros de datos sostenibles. De forma complementaria, los estados y las empresas, especialmente en las economías en desarrollo, deben adaptarse a los riesgos del cambio climático como las inundaciones que pueden dañar los equipos o las sequías puedan exacerbar la competencia por el agua (Rosie McDonald, 2023).

## **Consumo Energético**

Se estima que el consumo energético de los centros de datos pueda estar entre 600 y 1000 TWH, en comparación con los 460TWH de 2022, según el informe de la IEA. Existe una gran incertidumbre en las predicciones debido a la futura demanda de los servicios en la nube y, sobre todo, a las mejoras de eficiencia que pueda tener este sector que sigue en crecimiento. Por tanto, el impacto que puedan tener los avances tecnológicos será clave para decidir hacia que lado se establece el consumo energético.

Esto implicará para EE. UU. y la EU, aproximadamente, entre un 6% y un 5% de la electricidad total. Parte del aumento se espera por el crecimiento de la demanda que provocaran la IA y criptomonedas. Además, algunos países y comunidades, por las ventajas que ofrece su localización van a aumentar considerablemente la construcción de centros de datos como es el caso de Irlanda, Dinamarca o el estado de Virginia en Estados Unidos (IEA, 2024).

La energía que consumen los centros de datos se puede separar en dos grandes bloques. Por un lado, su principal actividad económica que consiste en ofrecer recursos computacionales para realizar operaciones o almacenar datos. Y, en segundo lugar, los costes operacionales que están concentrados en los sistemas de refrigeración y suponen el 40% del consumo energético. Se estima que con la optimización de estos sistemas a en los próximos años pueda reducir entre un 10% y un 30% el impacto de los sistemas de refrigeración (Zhu, 2023; IEA, 2024).

En cuanto al tipo de energía, el sector de los centros de datos está liderado por las grandes tecnológicas Amazon, Microsoft y Google que tienen proyectos ambiciosos en

el uso de energía renovable. Google y Microsoft son neutros en emisiones de carbono desde 2007 y 2012. Aunque, todas ellas pretenden tener cero emisiones netas; Google y Microsoft en 2030, Amazon en 2040 (Google, 2024; Microsoft, 2024; Amazon, 2024).

La mayoría de los centros de datos se encuentra bajo capacidad porque reservan una gran cantidad de recursos para posibles aumentos en la demanda de los clientes. Sin embargo, esta estrategia de negocio es poco sostenible y provoca que muchos recursos casi nunca se usen. En cambio, se podrían aplicar otras estrategias más sostenibles como una basada en un uso más uniforme de los recursos o la realización de convenios con otros centros de datos cercanos frente a posibles aumentos de la demanda.

## **Consumo de Agua**

Los equipos informáticos de los centros de datos pueden estar sujetos a altas temperaturas durante su funcionamiento y deben de ser tratados para no sobrecalentarse. Si se produce el sobrecalentamiento de los equipos pueden romperse o reducir considerablemente su capacidad de computación.

Para evitar el sobrecalentamiento en los centros de datos se usan sistemas de refrigeración que permiten enfriar los equipos. Estos sistemas suelen usar agua durante el proceso. Por ejemplo, en algunos sistemas se conduce el agua fría por tuberías pegadas a los equipos para reducir la temperatura aprovechando su alta transmisión de calor. En el caso de la refrigeración por aire frío, se usa el aire como recurso para enfriar los equipos informáticos, aunque, el aire es previamente enfriado usando agua.

Estos sistemas y otros nuevos que, están en proceso de desarrollo, tienen distintos niveles de eficiencia energética y consumo de agua. Por tanto, es importante estandarizar métricas que ayuden a abstraer los avances de estos procesos y poder aplicar las mejores metodologías para la sostenibilidad de la industria. Por ejemplo, algunos centros de datos han usado el aire ambiente, aprovechando climas fríos reduciendo el consumo de agua y energía.

El agua que se consume dentro de los centros de datos se debe por lo general a los sistemas de refrigeración y se conoce como consumo directo. Sin embargo, existe un consumo de agua indirecto que se produce fuera de los propios data centers, pero debido a las fuentes de energía que usan.



Las fuentes de energía consumen agua que es evaporada para crear movimiento en una turbina. Esto es común para las fuentes de energía no renovable, mientras que no es necesario en el caso de la energía eólica o solar. Sin embargo, tanto las energías renovables como las no renovables también usan una gran cantidad de agua durante su proceso de construcción.

Los sectores que más agua consumen en Estados Unidos son el sector de la energía y el de la agricultura. Después, sigue el uso del agua potable por parte de la ciudadanía (Mytton, 2021). Aunque el consumo de agua provocado por estas grandes instalaciones de equipos informáticos no sea tan pronunciado como por otras fuentes, debemos tener en cuenta que, por su naturaleza, estas instalaciones provocan un gran impacto en la localización en la que se encuentran. Las zonas de sequía o con falta de aguas son especialmente sensibles a este aumento de demanda, pudiendo provocar la competencia por el acceso al agua necesaria para la agricultura y el consumo de agua potable para la ciudadanía.

Las extracciones de grandes cantidades de agua centradas en determinadas localidades también pueden producir impactos sobre el ecosistema y la biodiversidad. Además, es necesario tratar el agua usada en los centros de datos, puesto que, los materiales metálicos derivados de su uso pueden contaminar el medio ambiente (George, 2023).

El uso de métricas sobre el consumo de agua es esencial para la trazabilidad del impacto medioambiental de los centros de datos. Así mismo, es vital comparar la cantidad de agua requerida para su funcionamiento con la disponibilidad de la localidad dónde se extrae. Por otro lado, centrándose en la reducción de la energía o en la obtención de fuentes renovables es posible alinear el impacto de la huella de carbono con el consumo de agua. En especial, cuando se trata del uso de agua potable que es un recurso de primera necesidad para las comunidades. Por ello, en algunos casos se está promoviendo el uso de agua no potable o residual para reducir el impacto que estos centros puedan tener en los ecosistemas.

Actualmente hay líneas de investigación abiertas que pueden ayudar a reducir el impacto medioambiental de los sistemas de refrigeración. Por ejemplo, el uso de otros líquidos refrigerantes para no usar agua, o construir centros de datos en localidades con aire frío, esta última tiene una limitación geográfica evidente. Las métricas esenciales

para medir el consumo de agua son aquellas que indican el consumo directo e indirecto. Por un lado, el consumo directo es de vital importancia para las comunidades y los ecosistemas en los que se realiza la extracción de agua. Para el indirecto, el análisis suele complicarse, aunque, es importante trazar el impacto consumo energético intentando fomentar el uso de energías renovables.

Las métricas que se han estandarizado en los centros de datos son el *WUE* y el *WUE<sub>source</sub>* o la eficiencia en el consumo de agua por sus siglas en inglés. La principal diferencia es que la primera solo toma en cuenta el consumo directo, es decir, la factura del agua de la infraestructura y la segunda contiene tanto el consumo directo como el indirecto, añadiendo el impacto de la energía (Mytton, 2021).

## **Basura electrónica y reciclaje**

La basura electrónica es aquella que se produce al desechar cualquier tipo de producto electrónico, como es el caso de los equipos informáticos de los centros de datos y se caracteriza por contener una gran cantidad de metales y plásticos en sus productos. Un proceso inseguro de reciclaje puede provocar daños sustanciales en el medioambiente, contaminando el agua, el suelo y el aire. Los metales pesados que están presentes en la basura electrónica pueden generar graves problemas de salud en los seres humanos y los ecosistemas. Afectando a animales, plantas y al ciclo general de la agricultura y la ganadería (Robinson, 2009).

Además, el proceso de reciclaje de la basura electrónica es altamente costoso. La venta de estos productos a países sin regulación estricta suele ser común, dónde se utilizan métodos insalubres contaminando a las personas y los ecosistemas. En el convenio de Basilea se estableció la obligación de informar y obtener el consentimiento de los países dónde se transportan estos materiales para su reciclaje. Además, existe la prohibición de exportar estos desechos a países que no puedan manejarlos de forma segura (ONU, 2015).

No existe una regulación específica que defina las responsabilidades y el procedimiento sobre la basura electrónica en los centros de datos. Aunque, según la directiva WEEE de la Unión Europea se establecen normas de reciclaje y medidas contra las exportaciones ilegales de basura electrónica. En términos generales, existe también a nivel internacional el principio general DNSH (Do No Significant Harm) dónde se

presenta la obligación de evitar grandes impactos sobre el ecosistema. Por lo general no existe una trazabilidad más allá de las certificaciones y los informes de las organizaciones.

La mayoría de los centros de datos no tienen un protocolo definido para la gestión de la basura electrónica, además, el diseño de los productos informáticos no suele estar optimizado para su reciclaje. Sin embargo, durante muchos años la industria de los centros de datos ha visto una rápida tendencia de rotación en la mayoría de los equipos entre 3 y 5 años (Rosie McDonald, 2023). Actualmente, la tendencia se ha reducido al igual que los avances en la tecnología, pero debería ser una prioridad de la industria mejorar el diseño y las estrategias de reciclaje de estos sistemas.

Por último, existe un mal menor derivado del reciclaje de la basura electrónica y es la gran energía que requiere. Por tanto, debería existir no solo la obligación de reciclaje por los centros de datos, si no la adopción del consumo energético de estos procesos en su impacto total.

# Guía para una IA sostenible

En este apartado trataremos de clarificar y resumir los puntos más sensibles desde una perspectiva medioambiental que consideramos que serán clave para el avance de una IA sostenible y en línea con el cumplimiento de los derechos humanos. Para ello, propondremos una serie de oportunidades y amenazas a las que se enfrenta la industria de cara a ser sostenible. Por último, presentaremos las responsabilidades que deberían tener los sujetos que participan en el sector.

Como se ha presentado previamente en este estudio, la industria de la IA y, en especial, las infraestructuras de los centros de datos tienen fuertes dependencias en el uso de recursos naturales e industrias específicas. Los recursos naturales son, en muchas ocasiones, escasos. Por tanto, para optar por una IA sostenible, la industria y los estados deberán fomentar la colaboración entre los distintos participantes y aprovechar las sinergias del proceso productivo. Por otro lado, también será necesario hacer estudios periódicos de la capacidad de recursos fundamentales en las localidades dónde se encuentre concentrada la explotación, para prevenir la competencia de las partes y proteger a las comunidades.

Ahora desglosaremos los puntos más sensibles desde una perspectiva de sostenibilidad. Ofreciendo posibles amenazas y oportunidades a las que se enfrenta el sector, los estados y la regulación.

## Amenazas del Sector

Una de las principales amenazas a las que se enfrenta el sector es la eficiencia energética de los modelos IA y el software. Como hemos visto en este estudio, a nivel profesional los programadores no están habituados a trabajar con métricas energéticas o a plantear la sostenibilidad del código en la toma de decisiones. Este impacto es vital para las soluciones que se ejecuten constantemente como los modelos y los chatbots en contacto con los usuarios. Además, el uso de lenguajes de programación más eficientes debería ser valorado para las partes más intensivas a nivel energético teniendo en cuenta que puede reducir considerablemente el consumo energético. El uso de lenguajes de programación como JAVA o C++ pueden llegar a reducir hasta 35 veces el consumo energético de un programa escrito en Python (Manner, 2023). Python es el lenguaje más utilizado hoy en día y es muy común en el ámbito del análisis de datos.

La falta de transparencia por parte de los centros de datos es otra de las grandes amenazas en la industria. Es necesario que los centros de datos presenten informes de consumo, así como, las compañías tecnológicas que controlan gran parte de los servicios en la nube. Además, frente a la creciente tendencia del mercado de conocer su huella medioambiental, para los servicios que contratan soluciones de IA o en la nube es imperativo poder trasladar el consumo que provoca su actividad en los centros de datos. Por otro lado, es necesario concienciar a la población del impacto provocado por servicios en la nube que suele quedar enmascarado por su definición abstracta y la falta de entendimiento sobre su funcionamiento.

La mayoría de los centros de datos están infra explotados y reservan una gran cantidad de recursos por posibles aumentos en la demanda. Esta estrategia de negocios es poco eficiente a nivel de sostenibilidad, puesto que, la mayoría de los recursos tecnológicos se utilizan muy poco o nunca se utilizan manteniendo siempre los recursos por encima del peor caso en la predicción de la demanda para ofrecer accesibilidad constante, que es uno de los estándares de la industria. Es importante buscar soluciones más óptimas para esta estrategia avariciosa típica del sector, como la oportunidad que proponemos en el siguiente apartado.

El impacto medioambiental de los residuos electrónicos es probablemente la amenaza que avanza más desapercibida y presenta varias problemáticas. En primer lugar, el impacto de un fallo en el reciclaje puede ser fatal para el medio ambiente por la gran cantidad de metales y plásticos que contienen estos residuos. Además, la basura electrónica suele exportarse a otros países que realizan su reciclaje, escondiendo el impacto de los países que la generan. Consecuentemente, es vital exigir buenos estándares de reciclaje y conseguir la aprobación de los países antes de proceder a las exportaciones como indica el convenio de Basilea. Por encima de todo, debe ser una prioridad prevenir posibles catástrofes y proteger a las comunidades que se puedan ver afectadas por estos procesos.

El sector tecnológico ha estado sujeto a grandes avances mejoras de los equipos informáticos generando una rápida rotación en los centros de datos. Aún así, el diseño de los equipos informáticos no está orientado a su reciclaje (Rosie McDonald, 2023). Por tanto, el sector debe aprovechar la gran financiación y crecimiento que está viviendo para invertir en equipos informáticos más duraderos. Además, debe trabajar con las empresas

que diseñen estos suministros para fomentar una economía circular que simplifique su impacto medioambiental y su coste de reciclaje.

En última instancia, otra amenaza que nace del tratamiento de los residuos electrónicos es la huella de carbono que produce su reciclaje. Este incremento de consumo energético debería ser incluido en las métricas ofrecidas por los centros de datos para facilitar su transparencia y su progreso.

El consumo del agua como recurso operacional es una de las grandes problemáticas a las que se enfrenta la industria para ser sostenible y responsable con las comunidades donde operan estas infraestructuras. Cuando se elige la localización de un centro de datos debe tenerse en cuenta la necesidad de agua de la comunidad, puesto que, esta infraestructura reducirá la capacidad total del agua. En algunas zonas podría generar competencia con la agricultura e incluso con el consumo de agua de las comunidades o infraestructuras críticas como hospitales. Es crítico proteger el interés de estas comunidades que no tienen los recursos económicos de las grandes empresas en casos de sequía y falta de agua. Como regla general debería estudiarse esta problemática antes de la construcción de los centros de datos para favorecer el interés de todas las partes y promover los beneficios que pueda traer la industria tecnológica.

Por último, es importante valorar el impacto que puede tener el cambio climático. El aumento de condiciones meteorológicas adversas puede generar situaciones críticas. Entre ellas, situaciones de sequía fomentando el problema del consumo del agua o, también, inundaciones o incendios que puedan provocar daños en los equipos y contaminaciones en los ecosistemas.

## **Oportunidades del Sector**

El sector de la IA se basa en los centros de datos para obtener recursos computacionales. Estas infraestructuras están basadas en la economía de escala como modelo de negocio permitiendo una reducción de los costes económicos y energéticos, así como, la posibilidad de dar rentabilidad a equipos más sostenibles y eficientes, aunque provoquen un aumento en el presupuesto inicial. Además, los centros de datos están concentrados por las grandes empresas que tienen estrategias ambiciosas en el uso de energías renovables.

Las energías renovables pueden reducir la huella de carbono de la IA, así como, impacto indirecto en el consumo de agua. Esto se debe a que las fuentes de energía no renovable usan agua en su proceso productivo. Consecuentemente, la adopción de energías renovables puede tener un impacto directo en reducir el consumo del agua, alineando las metas de sostenibilidad. La aparición de nuevos centros de datos, financiados por empresas con fuertes compromisos en el uso de energía renovables, puede repercutir positivamente en la financiación de estas fuentes de energía en otros sectores. El principal, problema para mantener un uso constante de energías renovables es la dependencia en procesos meteorológicos como el viento y la luz solar.

Otra gran oportunidad de este sector en crecimiento son los avances que puedan conseguirse mediante el desarrollo y la investigación de nuevos sistemas. Especialmente, en apartados dónde ya se han visto grandes ejemplos en la mejora de la eficiencia. Por ejemplo, en los sistemas de refrigeración, que son un elemento esencial de los centros de datos, se están desarrollando una gran variedad de mejoras que podrían reducir considerablemente el consumo energético de estos sistemas (IEA, 2024). Del mismo modo, avances en la gestión eficiente de los recursos computacionales también puede ofrecer grandes reducciones en el impacto del sector. En conclusión, es importante invertir en la innovación de los centros de datos, en especial aquellos que se han quedado atrasados, evitando la construcción innecesaria de nueva infraestructura.

La industria de la IA debe aprovechar las sinergias que emanan de su actividad operacional. Por ejemplo, los centros de datos producen calor como residuo y no tienen dentro de su proceso productivo una forma de dar uso a esta energía residual. Mediante colaboraciones con otras industrias se podría aprovechar la energía resultante de su actividad. Por otro lado, pueden establecerse colaboraciones con otros sectores para reducir el impacto de los recursos naturales utilizados. Un ejemplo, podría ser la colaboración con desalinizadoras o potabilizadoras para reducir el uso de agua potable y el impacto de las extracciones en los ecosistemas (Mytton, 2021).

Por último, el sector puede apoyarse en la colaboración entre centros de datos para aprovechar la capacidad de estos equipos que suele estar poco aprovechada para asegurar la accesibilidad y la escalabilidad de los clientes. Esto es una práctica inteligente, a nivel de producto, pero, es poco sostenible. Con la colaboración entre varios centros de datos podrían aprovecharse más recursos dependiendo de la infraestructura de otras empresas y reduciendo drásticamente la probabilidad de un aumento de la demanda que sobrepase

la capacidad de todos los centros de datos a la vez, al fin y al cabo, reduciendo lo que se quiere evitar, usando más recursos y siendo más eficiente.



# Discusión y Limitaciones

En este estudio no se ha profundizado en las certificaciones y la auditoría del de la IA y los centros de datos. Futuros estudios pueden centrarse en este aspecto para medir la transparencia de la industria y el avance en los requisitos de sostenibilidad.

Los centros de datos son el principal foco del impacto medioambiental de la IA, sin embargo, la explotación de estas infraestructuras es compartidas por diversas industrias. Este estudio podría ampliarse o utilizarse como base de investigaciones sobre el sector de las criptomonedas, el streaming o los videojuegos que son computacionalmente intensivos.

Por último, proponemos como área de futuros estudios y complementaria a este trabajo, el estudio de la colaboración entre estados y las empresas dedicadas a la construcción y mantenimiento de centros de datos. Pudiendo ahondar en una guía acciones y responsabilidades sobre los principales impactos medioambientales que ofrecemos en este trabajo.

# Conclusión

El sector tecnológico ha permitido a muchas industrias reducir su huella ecológica. Sin embargo, a medida que el resto de las industrias se han vuelto más sostenibles, este sector ha aumentado su impacto medioambiental sin recibir el mismo escrutinio. Esta tendencia no ha favorecido las mejores prácticas en un sector que podría ser más verdes. Por tanto, con el auge de la inteligencia artificial es esencial rediseñar y establecer unas prácticas que permitan una industria tecnológica sostenible.

En este proyecto se ha estudiado la literatura del impacto medioambiental que generan las soluciones de inteligencia artificial y se han propuesto una serie de amenazas y oportunidades a las que se enfrenta la industria para reducir su huella ecológica. Entre las amenazas que afectan al sector encontramos:

- La falta de metodología para el desarrollo de software eficiente.
- La escasez de transparencia y medidas del impacto de los centros de datos.
- La infra explotación de los equipos informáticos en los centros de datos.
- La ausencia de implementación de un reciclaje y un diseño sostenible de los equipos electrónicos.
- El consumo y la extracción de agua centralizado en localidades específicas.
- La competencia por el agua en zonas de sequía.
- El impacto agravante e inesperado de condiciones meteorológicas adversas derivadas del cambio climático.

Por otro lado, el sector tiene grandes oportunidades derivadas del crecimiento y la gran inversión, así como, los posibles avances tecnológicos. Además, sacando partido a una buena organización previa y a la colaboración con otros sectores podrá mejorar considerablemente su impacto medioambiental. Entre las principales oportunidades encontramos:

- Reducción del consumo energético gracias a la economía de escala.
- Compromiso del sector con las fuentes de energía renovable.
- Alineación de metas, reducir el gasto energético implica disminuir el consumo de agua.
- Uso de agua potable y otros líquidos refrigerantes
- Desarrollo e innovación, por ejemplo, mejoras en la eficiencia de los sistemas de refrigeración.
- Aprovechamiento del calor residual de las instalaciones.
- Colaboración entre los centros de datos para una explotación más eficiente de las infraestructuras.

# Bibliografía

- Amazon. (15 de junio de 2024). *Driving Climate Solutions*. Obtenido de Amazon Sustainability: <https://sustainability.aboutamazon.com/climate-solutions>
- Fernández Fernández, J. L. (2021). *Hacia el Humanismo Digital desde un denominador común para la Ciber Ética y la Ética de la Inteligencia Artificial*.
- García Martín, E. (2017). Energy efficiency in machine learning: A position paper. En *30th Annual Workshop of the Swedish Artificial Intelligence Society SAIS, Karlskrona* (Vol. 137, págs. 68--72). Linköping University Electronic Press.
- García-Martín, E. a. (2019). Estimation of energy consumption in machine learning. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 134, 75--88.
- George, A. S. (2023). The environmental impact of ai: A case study of water consumption by chat gpt. *Partners Universal International Innovation Journal*, 97--104.
- Google. (15 de junio de 2024). *Net-zero carbon*. Obtenido de Google Sustainability: <https://sustainability.google/operating-sustainably/net-zero-carbon/>
- Habermas, J. a. (1984). *Ciencia y técnica como "ideología"*. tecnos Madrid.
- IEA. (24 de Enero de 2024). *Electricity 2024 Analysis and forecast to 2026*. Obtenido de Internacional Energy Agency: <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>
- Kern, E. a. (2015). Impacts of software and its engineering on the carbon footprint of ICT. *Environmental Impact Assessment Review*, 52, 53--61.
- Manner, J. (2023). Black software—the energy unsustainability of software systems in the 21st century. *Oxford Open Energy*, 2.
- Microsoft. (15 de junio de 2024). *Microsoft will be carbon negative by 2030*. Obtenido de Microsoft: <https://blogs.microsoft.com/blog/2020/01/16/microsoft-will-be-carbon-negative-by-2030/>
- Mytton, D. (2020). Hiding greenhouse gas emissions in the cloud. *Nature Climate Change*, 10, 701--701.
- Mytton, D. (2021). Data centre water consumption. *npj Clean Water*, 11.

- ONU. (1966). *Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales*. Organización de las Naciones Unidas. Obtenido de <https://www.ohchr.org/es/instruments-mechanisms/instruments/international-covenant-economic-social-and-cultural-rights>
- ONU. (2015). *Directrices técnicas sobre los movimientos transfronterizos de desechos*. Organización de las Naciones Unidas. Obtenido de <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/biblioteca-de-archivos-left/documentos-ministerio-de-salud/tramites/transporte-de-materiales-peligrosos/movimientos-transfronterizos-y-nacionalizacion-de-equipo-electronico-usado/4840-directrices-tecnicas-sobr>
- Reglamento de Inteligencia Artificial, 2024. (s.f.). *Reglamento (UE) 2024/XXX del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de marzo de 2024, por el que se establece un marco normativo de la Unión para la inteligencia artificial*. Diario Oficial de la Unión Europea. Obtenido de [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0138\\_ES.pdf](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0138_ES.pdf)
- Robinson, B. H. (2009). E-waste: an assessment of global production and environmental impacts. *Science of the total environment*, 408, 183--191.
- Rosie McDonald, B. S. (2023). *Green Data Centers : Towards a Sustainable Digital Transformation - A Practitioner's Guide*. World Bank Group. Obtenido de <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099112923171023760/p17859700914e40f60869705b924ae2b4e1>
- Sneed, H. M. (2020). Cost-driven software migration: An experience report. *Journal of Software: Evolution and Process*, 32, e2236.
- Synergy Research Group. (30 de abril de 2024). *Huge Cloud Market Sees a Strong Bounce in Growth Rate for the Second Consecutive Quarter*. Obtenido de Synergy Research Group: <https://www.srgresearch.com/articles/huge-cloud-market-sees-a-strong-bounce-in-growth-rate-for-the-second-consecutive-quarter>
- Zhu, H. a. (2023). Future data center energy-conservation and emission-reduction technologies in the context of smart and low-carbon city construction. *Sustainable Cities and Society*, 89, 104322.

## **Declaración de Uso de Herramientas de Inteligencia Artificial Generativa en Trabajos Fin de Grado**

**ADVERTENCIA:** Desde la Universidad consideramos que ChatGPT u otras herramientas similares son herramientas muy útiles en la vida académica, aunque su uso queda siempre bajo la responsabilidad del alumno, puesto que las respuestas que proporciona pueden no ser veraces. En este sentido, NO está permitido su uso en la elaboración del Trabajo fin de Grado para generar código porque estas herramientas no son fiables en esa tarea. Aunque el código funcione, no hay garantías de que metodológicamente sea correcto, y es altamente probable que no lo sea.

Por la presente, yo, Jesús López López - Neira, estudiante de Business Analytics de la Universidad Pontificia Comillas al presentar mi Trabajo Fin de Grado titulado “Hacia una IA Sostenible, Principales Puntos de Impacto Medioambiental”, declaro que he utilizado la herramienta de Inteligencia Artificial Generativa ChatGPT u otras similares de IAG de código sólo en el contexto de las actividades descritas a continuación:

1. **Brainstorming de ideas de investigación:** Utilizado para idear y esbozar posibles áreas de investigación.
2. **Referencias:** Usado conjuntamente con otras herramientas, como Science, para identificar referencias preliminares que luego he contrastado y validado.
3. **Corrector de estilo literario y de lenguaje:** En este proyecto se ha usado para encontrar posibles faltas de ortografía.

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

Fecha: 19/06/2024

Firma: Jesús López López - Neira