

INFORME INTELIGENCIA ARTIFICIAL, Y CAMBIO CLIMÁTICO

Oportunidades y Desafíos



Informe IA y Cambio Climático

Oportunidades y Desafíos

Coordinadores del reporte
Mariano Villares
Sofía Moratorio
Micaela Abrigo
Micaela Tomasoni

Buenos Aires, Argentina
Diciembre, 2024

*Material realizado por la Fundación Sustentabilidad
Sin Fronteras con el apoyo de Globant.
Contacto: www.sustentabilidadsf.com.ar*

Reconocimientos, contribuciones y autores

El equipo de la Fundación Sustentabilidad Sin Fronteras agradece a todas las y los autores que participaron de la edición de este informe: Damián Markov, Malena Lozada Montanari, Matias Olmos, Micaela Abrigo y a todo el equipo de Globant.

Mención especial a la colaboración del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

La información de la presente publicación puede reproducirse libremente en parte o en su totalidad, siempre que sea reconocida su fuente y citada debidamente.

Villares, M; Moratorio, S; Abrigo, M; Tomasoni, M. (2024) Informe IA y Cambio Climático: Oportunidades y Desafíos. Fundación Sustentabilidad Sin Fronteras y Globant.

Índice

00 Introducción	5
01 IA como herramienta para la mitigación del cambio climático	8
El papel de la IA en el sector energético	9
IA en transporte y logística: eficiencia y sostenibilidad	11
Agricultura de precisión y optimización de recursos	12
IA en la industria y la economía circular	12
02 A: Resiliencia y Adaptación	16
La Inteligencia Artificial como herramienta para mejorar la obtención y pronóstico de datos climáticos	16
El uso de la inteligencia artificial en el modelado de escenarios climáticos	23
Cambio Climático, Salud y la Inteligencia Artificial	29
03 Consumo energético de la IA: desafíos y soluciones	37
04 Futuro de la IA y Cambio Climático	42
05 Conclusiones	45



00

Introducción



Nos encontramos en una era de transformaciones sin precedentes, donde la tecnología avanza a pasos agigantados, redefiniendo los límites de lo posible y desafiando nuestra comprensión del mundo que nos rodea. En el epicentro de esta revolución tecnológica se encuentra la Inteligencia Artificial (IA), una fuerza disruptiva con el potencial de transformar radicalmente la sociedad, la economía y el ambiente. La IA, con su capacidad para procesar enormes cantidades de datos, identificar patrones complejos y generar soluciones innovadoras, está permeando cada vez más aspectos de nuestras vidas, desde la forma en que nos comunicamos hasta la manera en que abordamos los desafíos globales más apremiantes.

Uno de estos desafíos, y quizás el más crítico de nuestro tiempo, es el cambio climático. El calentamiento global, la pérdida de biodiversidad, los fenómenos meteorológicos extremos y el aumento del nivel del mar son solo algunas de las manifestaciones de esta crisis ambiental que amenaza la estabilidad del planeta y el bienestar de las generaciones presentes y futuras. Ante esta realidad ineludible, la comunidad internacional ha reconocido la necesidad de actuar con urgencia y determinación, impulsando la transición hacia una economía baja en carbono y resiliente al clima.

A pesar de los compromisos adquiridos en el marco del Acuerdo de París, la trayectoria actual de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) no es compatible con el objetivo de limitar el aumento de la temperatura media global muy por debajo de 2 °C, respecto a los niveles preindustriales. De acuerdo con las proyecciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), las políticas climáticas implementadas hasta la fecha resultan insuficientes. Esta divergencia entre los objetivos y las tendencias actuales subraya la necesidad imperante de acelerar la transición hacia una economía baja en carbono mediante la implementación de medidas de mitigación ambiciosas y transformadoras.

En este contexto, la IA emerge como una herramienta poderosa para acelerar la acción climática, promover la regeneración y facilitar la transición hacia un futuro sostenible. Su capacidad para analizar datos climáticos, modelar escenarios futuros, optimizar procesos industriales y desarrollar soluciones innovadoras



la convierte en un aliado estratégico para promover la acción climática. La IA está abriendo un abanico de posibilidades para mitigar las emisiones de GEI, adaptarnos a los impactos del cambio climático y construir un futuro más sostenible.

A su vez, nos brinda la posibilidad de tener una mirada más sistémica e integral, frente a un desafío como el cambio climático que requiere un enfoque desde diversos aspectos sociales, económicos, políticos y ambientales. La falta de coordinación de todos estos enfoques, contando con una mirada encapsulada para intentar resolverlos, es parte de las dificultades que debemos afrontar y sobre las cuales la IA tiene mucho para aportar.

En menos de una década de desarrollo, contamos con múltiples herramientas de IA que contribuyen al cuidado del ambiente y la acción climática, como la web Amazon Mining Watch¹ que utiliza el aprendizaje automático (machine learning) para mapear las cicatrices de las actividades mineras de oro en los países amazónicos. Mediante el análisis de imágenes satelitales históricas, esta herramienta rastrea el rápido crecimiento de la minería a cielo abierto en el mayor bosque tropical del mundo. Por su parte, el Dr. Andreas Käab y su equipo en la Universidad de Oslo, en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), utilizan la IA para medir los cambios en los icebergs 10.000 veces más rápido de lo que podría hacerlo un ser humano. Es decir, la IA, entre otras cosas, permite a los investigadores analizar datos a una velocidad sin precedentes y obtener información valiosa para la toma de decisiones.

En Argentina, también contamos con ejemplos de empresas que vinculan IA y cuidado del ambiente, como

¹ <https://amazonminingwatch.org/en>

el caso de Satellites on Fire² que combina tecnología satelital, cámaras terrestres e inteligencia artificial para detectar tempranamente incendios forestales, con el objetivo de reducir las pérdidas de biodiversidad del mundo. Desde una mirada productiva, también existen muchas empresas argentinas que lideran la agenda a nivel mundial, como el caso Kilimo³ y Dimaxion⁴, las cuales promueven una agricultura más sostenible y eficiente a través de la tecnología, ayudando a los agricultores a tomar decisiones informadas sobre el uso del agua en sus campos.

Por primera vez en las COP29 de Cambio Climático, realizada en Azerbaiyán, hubo un día oficial destinado a la digitalización y su rol transversal en la acción climática. No obstante, en un evento de tal magnitud se esperaba una mayor referencia a las diferentes tecnologías. Las menciones estuvieron casi exclusivamente asociadas a la gestión de datos para los créditos de carbono y se realizaron en unos pocos eventos paralelos, sin ser parte del corazón de la negociación de las delegaciones oficiales. La COP 29 perdió la oportunidad de integrar la tecnología como eje central de la acción climática. Por su parte, Brasil, anfitrión de la COP30, tiene la posibilidad de liderar este cambio y aprovechar el potencial de la tecnología para un futuro sostenible.

Sin embargo, es crucial reconocer que la IA no es una panacea, y su desarrollo e implementación deben ser guiados por principios éticos y de sostenibilidad. El consumo energético asociado a su funcionamiento, el riesgo de sesgos algorítmicos⁵ y la necesidad de una gobernanza responsable son aspectos que requieren una atención cuidadosa para garantizar que la IA se utilice de manera efectiva y equitativa en la lucha contra el cambio climático. El entrenamiento de modelos de IA requiere una gran cantidad de energía, y el uso masivo de la IA podría aumentar significativamente la demanda energética global. En 2023, entre Google y Microsoft emitieron a la atmósfera 29,7 millones de toneladas de dióxido de carbono, lo que equivale un aumento para Google en la generación de emisiones de GEI de casi un 50%, en los últimos cinco años. El impacto en la generación de emisiones y el consumo de energía y agua, nos enfrenta a un gran desafío, tal vez similar en dimensiones a la revolución industrial.

Es crucial aprender de las lecciones del pasado, abordar esta problemática desde el comienzo, y desarrollar estrategias para minimizar el impacto ambiental de la IA. La eficiencia energética en el diseño y la operación de sistemas de IA, el uso de fuentes de energía renovables y la optimización de los algoritmos son medidas clave para garantizar que la IA se utilice de manera sostenible. Carece de razonabilidad intentar oponerse al avance de la IA, como lo sería hace 30 años oponerse al desarrollo de internet, es por eso que debemos trabajar para poner a la IA al servicio de la acción climática.

En este informe, a través del aporte de expertos de Sustentabilidad sin Fronteras, Globant, y otras organizaciones buscaremos explicar cómo la IA puede impulsar la mitigación, la resiliencia y la adaptación al cambio climático, al tiempo que analizaremos los desafíos y las soluciones para un desarrollo y uso responsable de esta tecnología. Finalmente, reflexionaremos sobre el futuro de la IA y el cambio climático, con la convicción de que la mejor forma de predecir el futuro es inventarlo.

2 <https://www.satellitesonfire.com/>

3 <https://kilimo.com/>

4 <https://dymaxionlabs.com/es/espanol/>

5 Si los datos utilizados para entrenar el algoritmo reflejan prejuicios existentes en la sociedad, el algoritmo puede aprender y perpetuar esos sesgos.

01

IA como herramienta para la mitigación



Globant

La IA permite a sistemas y máquinas realizar tareas que tradicionalmente requieren inteligencia humana, como aprender de datos, resolver problemas, comprender el lenguaje y tomar decisiones basadas en patrones y percepciones. Existen dos tipos principales de IA: la **IA estrecha** (o débil), diseñada para tareas específicas como el reconocimiento facial y los asistentes virtuales; y la **IA general**, que busca replicar la inteligencia humana en su totalidad, permitiendo a las máquinas aprender y aplicar conocimientos en diversos contextos.

Las técnicas más utilizadas incluyen el **aprendizaje automático**, donde los sistemas mejoran su rendimiento a partir del análisis de datos; **el aprendizaje profundo**, que emplea redes neuronales inspiradas en el cerebro humano; **el procesamiento de lenguaje natural (NLP)**, que facilita la comprensión y generación del lenguaje humano; y la **visión artificial**, que permite analizar datos visuales con alta precisión.

Las inversiones en IA, particularmente en tecnologías generativas, han aumentado a **25.200 millones de dólares**. Según un informe de **McKinsey de 2023**, *The State of AI in 2023: Generative AI's breakout year*, más de la mitad de las organizaciones (**55%**) están utilizando IA actualmente, un aumento significativo respecto al **20%** registrado en **2017**.

La IA se aplica en sectores tan diversos como la salud, donde automatiza diagnósticos médicos, sugiere opciones de tratamiento y realiza intervenciones quirúrgicas precisas; y las finanzas, donde procesa grandes volúmenes de información, predice tendencias de mercado y optimiza operaciones en tiempo real. Además, desempeña un rol clave en la ciberseguridad, al detectar y responder proactivamente a amenazas en línea. Sin embargo, su mayor potencial reside en la lucha contra el cambio climático. Al optimizar procesos, reducir el uso de recursos y habilitar análisis predictivos avanzados, la IA se presenta como una herramienta

crucial para la mitigación en sectores estratégicos como la energía, el transporte, la agricultura, la industria y la gestión de residuos. Un informe de 2023 de Google y Boston Consulting Group indicó que la IA tiene el potencial de ayudar a mitigar entre un **5%** y **10%** de las emisiones globales de GEI para **2030** y fortalecer significativamente las iniciativas relacionadas con la adaptación y resiliencia climática.

El papel de la IA en el sector energético

El sector energético es uno de los principales responsables de las emisiones globales de GEI, por lo que la transformación hacia operaciones más sostenibles es urgente. La IA juega un papel fundamental en la optimización de redes eléctricas, la integración de energías renovables, el almacenamiento eficiente de energía y la detección de emisiones fugitivas.

Las **redes eléctricas inteligentes** o smart grids son uno de los avances más destacados. Estas redes utilizan algoritmos de IA para analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real, equilibrando la oferta y demanda energética. Esto permite integrar fuentes renovables como la solar y la eólica, cuya producción suele ser intermitente, y minimizar la dependencia de combustibles fósiles. Empresas como Splight¹ optimizan la gestión de redes eléctricas mediante IA, reduciendo la intervención manual y aumentando la resiliencia del sistema.

El **almacenamiento de energía** también se beneficia de la IA, que identifica los mejores escenarios para utilizar baterías y otras tecnologías de almacenamiento, maximizando la generación y el consumo eficiente. Herramientas de IA consideran condiciones

¹ <https://www.splight.com/>

meteorológicas, demanda proyectada y precios del mercado eléctrico, logrando minimizar costos y reducir emisiones. EnergetIQ² utiliza IA para calcular la combinación óptima de generación, almacenamiento y consumo energético. Basándose en datos en tiempo real sobre clima, precios y necesidades del cliente, el sistema minimiza costos y reduce emisiones, demostrando cómo la IA puede fomentar la transición hacia un modelo energético sostenible.

En la **detección de emisiones fugitivas**, sensores avanzados y drones equipados con dispositivos IoT³ monitorizan operaciones extractivas y de transporte de recursos fósiles. Estas herramientas detectan fugas de gases contaminantes como el metano, facilitando su pronta mitigación. En colaboración con la empresa **UALI**⁴, grandes petroleras han implementado drones con IA para crear modelos 3D de instalaciones, optimizar procesos y cumplir con regulaciones ambientales.

Por último, la **predicción de la demanda energética** es esencial para planificar la producción y distribución de manera eficiente. La IA analiza patrones climáticos y de consumo, anticipando picos de demanda y permitiendo la integración efectiva de fuentes renovables. Esto minimiza la necesidad de plantas de respaldo que utilizan combustibles fósiles, contribuyendo a la reducción directa de emisiones.

² <https://www.energetiq.com/>

³ El término IoT, o Internet de las cosas, se refiere a la red colectiva de dispositivos conectados y a la tecnología que facilita la comunicación entre los dispositivos y la nube, así como entre los propios dispositivos

⁴ <https://uali.co>



IA en transporte y logística: eficiencia y sostenibilidad

El transporte es otro sector con un alto impacto ambiental debido a su dependencia de combustibles fósiles. La IA puede mejorar significativamente su eficiencia operativa mediante la **optimización de rutas**, el mantenimiento predictivo y la gestión de flotas, lo que permite reducir emisiones y costos.

En la **optimización de rutas**, los algoritmos de IA analizan datos en tiempo real sobre tráfico, clima y condiciones de las carreteras, identificando las opciones más eficientes. Grandes cadenas de distribución han reducido más de 42.000 toneladas de CO₂ gracias a estos ajustes dinámicos. Un ejemplo destacado es Walmart, que logró reducir 94 millones de libras de emisiones de CO₂ utilizando algoritmos de IA que ajusta dinámicamente las rutas de sus camiones. A nivel urbano, sistemas basados en IA mejoran la puntualidad de autobuses y reducen la congestión, maximizando el uso eficiente de los recursos existentes.

El **mantenimiento predictivo** permite monitorear el estado de vehículos y equipos, identificando fallas potenciales antes de que ocurran. Plataformas utilizadas por grandes empresas de logística analizan datos de flotas y ajustan operaciones en tiempo real, ahorrando millones de litros de combustible anualmente. Empresas de automatización industrial han aplicado sensores inteligentes en trenes para prever el desgaste de componentes y mejorar la eficiencia del transporte ferroviario

UPS⁵ emplea su plataforma **ORION** para analizar datos de sus flotas y ajustar operaciones en tiempo real. Este sistema, además de optimizar rutas, prevé necesidades de mantenimiento, lo que ha permitido a la empresa ahorrar hasta 10 millones de galones de combustible anuales. Por su parte, **Siemens** utiliza sensores inteligentes en trenes para predecir el desgaste de componentes clave, mejorando la seguridad y la eficiencia del transporte ferroviario.

En cuanto a la **gestión de flotas**, la IA facilita el monitoreo en tiempo real, optimizando cargas y programación. **Amazon**, por ejemplo, utiliza algoritmos avanzados para ajustar rutas y coordinar entregas, reduciendo costos y minimizando la cantidad de vehículos necesarios para completar operaciones.

⁵ <https://about.ups.com/>

Agricultura de precisión y optimización de recursos

La agricultura, sector clave para la seguridad alimentaria, enfrenta desafíos como la degradación de suelos, el uso excesivo de fertilizantes y la escasez de agua. La **IA impulsa la agricultura de precisión**, permitiendo el monitoreo dinámico de cultivos, la optimización del riego y la aplicación eficiente de insumos.



Sensores avanzados, combinados con algoritmos de IA, registran en tiempo real parámetros ambientales y del suelo. Esto permite ajustar dinámicamente el uso de fertilizantes y recursos hídricos, minimizando desperdicios y optimizando el rendimiento agrícola. Empresas como **Kilimo** han demostrado cómo la IA puede contribuir significativamente a reducir el consumo de agua y fertilizantes, favoreciendo la conservación del suelo y la biodiversidad.

Además, los sistemas autónomos basados en IA han revolucionado las tareas agrícolas. Robots equipados con IA pueden realizar actividades como siembra, fertilización y cosecha con una precisión excepcional. Esto no solo maximiza el rendimiento al intervenir en el momento óptimo, sino que también reduce la necesidad de intervención humana y, por ende, los costos operativos.

La **planificación del uso de tierras** es otra aplicación clave. Algoritmos de IA analizan grandes volúmenes de datos geoespaciales y climáticos para identificar patrones en el terreno, lo que permite a los agricultores tomar decisiones informadas sobre qué cultivos sembrar y cómo gestionar la tierra de manera sostenible. Esta capacidad no solo mejora la productividad agrícola, sino que también preserva los recursos naturales, ayudando a mitigar los efectos del cambio climático.

IA en la industria y la economía circular

En la industria, la IA ha transformado los procesos productivos, mejorando la eficiencia energética, automatizando tareas y optimizando la gestión de materiales. Los sistemas de **automatización industrial** permiten ajustar dinámicamente operaciones en tiempo real, reduciendo tiempos, costos y consumo

de energía. Robots inteligentes realizan tareas repetitivas o peligrosas con gran precisión, aumentando la seguridad de los trabajadores y minimizando errores. Empresas de automatización industrial han implementado estas soluciones en sectores como la fabricación automotriz y electrónica, logrando aumentos en la productividad y la reducción de desperdicios.

La **eficiencia energética** es otro desafío clave que la IA ayuda a resolver. Sistemas de gestión energética monitorean en tiempo real el consumo de energía en fábricas y predicen demandas futuras. Esto permite realizar ajustes inmediatos en procesos clave, reduciendo el consumo energético total y minimizando el impacto ambiental. Empresas como Schneider Electric ya lo vienen implementando. Además, la IA optimiza infraestructuras como los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) para asegurar un uso más eficiente de los recursos.

La IA también juega un rol crucial en la **gestión de materiales** y en la transición hacia una economía circular. Los algoritmos avanzados identifican oportunidades de reutilización de materiales, mejorando la reciclabilidad y reduciendo la necesidad de recursos vírgenes. Estos sistemas pueden predecir necesidades de producción y ajustar el suministro de insumos en tiempo real, reduciendo el desperdicio de recursos y mejorando la eficiencia en la cadena de suministro.

En el ámbito de la **gestión de residuos**, la IA permite innovaciones como la **clasificación automática de materiales reciclables**. La visión artificial y el aprendizaje automático facilitan la identificación y separación de materiales como plásticos, metales, vidrio y papel con alta precisión. Empresas en la industria del reciclaje, como AMP Robotics⁶, aplican IA en plantas de reciclaje, aumentando las tasas de reciclaje y reduciendo la cantidad de residuos enviados a vertederos.

⁶ <https://ampsortation.com/>



Además, la IA impulsa la **economía circular** al analizar el ciclo de vida de los productos y detectar componentes valiosos que pueden ser reutilizados tras su vida útil convencional. Estos avances permiten la creación de nuevas cadenas de valor, donde los residuos de un proceso se convierten en recursos para otro, facilitando una producción más sostenible y eficiente.

Conclusiones

La IA se presenta como una herramienta fundamental en la mitigación al cambio climático. Sus aplicaciones abarcan sectores críticos como la energía, el transporte, la agricultura, la industria y la gestión de residuos, donde optimiza procesos, reduce el consumo de recursos y habilita soluciones innovadoras para problemas complejos.

En el sector energético, la IA facilita la integración de energías renovables y optimiza redes eléctricas, mientras que en el transporte mejora la eficiencia operativa mediante la optimización de rutas y mantenimiento predictivo. La agricultura de precisión, impulsada por IA, reduce el uso de fertilizantes y agua, favoreciendo la conservación de recursos naturales y mejorando la productividad. En la industria, la automatización, la eficiencia energética y la economía circular son áreas clave donde la IA demuestra su potencial para reducir el impacto ambiental y mejorar la competitividad.

La implementación de la IA no sólo transforma los modelos de negocio, sino que redefine la manera en que interactuamos con los recursos naturales y los procesos productivos. Al analizar grandes volúmenes de datos, anticipar escenarios y automatizar procesos, la IA ofrece soluciones escalables y replicables que facilitan la transición hacia un modelo económico más sostenible y responsable.

Bibliografía

- AMP Robotics. (2024). AI and automation for recycling solutions. Recuperado de <https://www.amrobotics.com>
- Boston Consulting Group. (2023, noviembre 20). How AI can speed climate action. <https://www.bcg.com/publications/2023/how-ai-can-speedup-climate-action>
- IBM. (2022). Global AI Adoption Index 2022. Recuperado de <https://www.ibm.com>
- Kilimo. (2024). Optimización del uso del agua en agricultura. Recuperado de <https://kilimoagtech.com>
- Schneider Electric. (2023). Intelligent energy management systems. Recuperado de <https://www.se.com>
- Splight. (2023). AI solutions for smart grids. Recuperado de <https://www.splight.com>
- UPS. (2023). ORION platform: Optimizing logistics with AI. Recuperado de <https://www.ups.com>
- UALI. (2023). Drones and AI for emissions monitoring. Recuperado de <https://www.uali.com>

- McKinsey & Company. (2023). The State of AI in 2023: Generative AI's Breakout Year. Recuperado de <https://www.mckinsey.com/insights/the-state-of-ai-2023>

Sobre los autores

Esta sección fue redactada por el Sustainable Business Studio de Globant, un equipo dedicado a promover la transformación sostenible en las empresas por medio de la innovación tecnológica. A través de soluciones innovadoras en ESG, como la consolidación de datos, estrategias de gobernanza, gemelos digitales y cálculos de huellas de carbono, el Studio ayuda a las organizaciones a reducir su impacto ambiental, mejorar la eficiencia y avanzar en los objetivos de sostenibilidad alineados con la Agenda 2030.

Globant desarrolla productos digitales innovadores que conectan negocios y consumidores, transformando organizaciones a través de tecnología, creatividad e inteligencia artificial. Con presencia en 34 países y más de 29,900 empleados, colabora con líderes globales como Google y Santander. Reconocida por su liderazgo en IA y experiencia del cliente, es miembro de iniciativas como The Green Software Foundation y el Cybersecurity Tech Accord.

02

IA: Resiliencia y Adaptación



La Inteligencia Artificial como herramienta para mejorar la obtención y pronóstico de datos climáticos

Malena Lozada Montanari & Micaela Abrigo

Limitantes en la obtención de datos climáticos

La obtención de información climática ha dependido históricamente de estaciones meteorológicas, aunque este enfoque enfrenta desafíos y limitaciones. A nivel global, los registros climáticos organizados, se consolidaron a mediados del siglo XIX. Esto fue posible gracias al establecimiento de estaciones meteorológicas y la introducción de nuevas tecnologías para observaciones más precisas. Estos datos se obtienen de manera estandarizada y deben cumplir con los requerimientos de la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Sin embargo, su adquisición no siempre es sencilla y presentan diversas limitaciones, como la cobertura espacial limitada, costos elevados y variabilidad en la calidad de los datos.

La distribución y las mediciones de las estaciones meteorológicas plantean desafíos en cuanto a la precisión y cobertura de los datos climáticos. Las estaciones suelen ubicarse en aeropuertos o en grandes centros urbanos, lo que reduce su representatividad geográfica en áreas más remotas. Y generalmente registran sólo un conjunto limitado de variables meteorológicas, como temperatura, precipitación, dirección e intensidad del viento y presión atmosférica, lo que obliga a estimar indirectamente otras variables importantes para el análisis climático.

El alto costo de mantenimiento y expansión de las estaciones meteorológicas limita la calidad y alcance de los registros climáticos. Mantener el registro rutinario de datos a menudo resulta en la aparición de datos faltantes o de calidad reducida, lo que dificulta la realización de proyecciones climáticas debido a la falta de robustez métrica necesaria para su inclusión en modelos predictivos. Además, el establecimiento y mantenimiento de nuevas estaciones, junto con la tecnología requerida, implica una inversión significativa. Esto restringe su distribución, especialmente en regiones vulnerables como países en desarrollo, áreas rurales o zonas remotas, generando brechas espaciales en la cobertura climática. Estas limitaciones afectan el monitoreo y análisis de fenómenos globales, como el cambio climático, comprometiendo la capacidad de tomar decisiones informadas y efectivas.

Revolucionando la Ciencia Climática: El Poder de los Sensores Remotos y la Inteligencia Artificial

Los sensores remotos, aparecen como una alternativa frente a la escasez de datos de zonas remotas, y ofrecen importantes ventajas para el modelado de datos a nivel global. Los sensores remotos permiten recopilar información sobre objetos a distancia. En meteorología, se utilizan principalmente radares y satélites para obtener datos de las condiciones atmosféricas y de la superficie terrestre. Su principal ventaja radica en que capturan información de áreas remotas, sin cobertura de estaciones meteorológicas, ofreciendo observaciones globales y consistentes. Y generalmente, los datos satelitales son de libre acceso. No obstante, una de sus limitaciones es que el procesamiento de estos datos puede ser complejo, debido a la variedad de formatos y la necesidad de herramientas especializadas para visualizarlos y analizarlos. Además, es fundamental validar estos datos a nivel local para asegurar la precisión de los productos generados por los sensores.

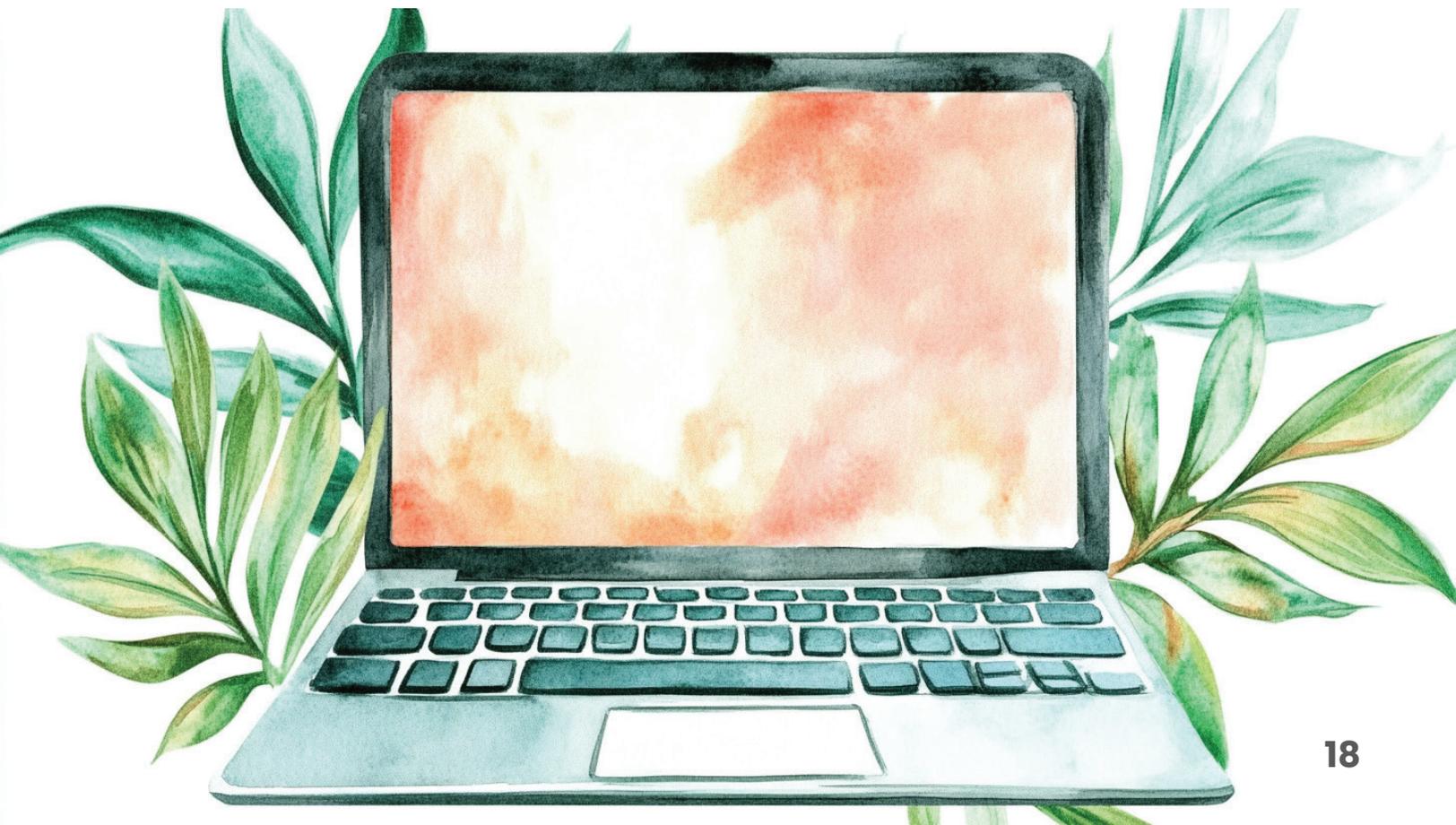
Gracias a distintas estrategias y utilización de IA es posible optimizar el procesamiento y análisis de estos datos. La IA puede facilitar la integración de información de múltiples fuentes, mejorar la interpretación de las imágenes y permitir la detección de patrones y tendencias que serían difíciles de identificar mediante métodos tradicionales. Además, el uso de algoritmos avanzados puede ayudar a automatizar la validación de datos, reduciendo así el tiempo y esfuerzo necesarios para garantizar la calidad y precisión de las observaciones.

El rápido avance de la IA junto a la obtención de datos con sensores remotos, ha tenido un impacto significativo en la ciencia climática, ayudando a mitigar las limitaciones inherentes a los métodos tradicionales de obtención y análisis de datos. El uso de capacidades analíticas y de procesamiento avanzadas de la IA permite mejorar la comprensión del sistema climático actual. Y su aplicación es extensa, abarcando una amplia gama de áreas y estudios relacionados con la gestión de datos climáticos (Materia et al., 2024; Salcedo-Sanz et al., 2024).

El Rol Crucial de la Inteligencia Artificial en la Predicción de Eventos Extremos

Los eventos climáticos extremos, como inundaciones, sequías y olas de calor, representan una amenaza para la humanidad. Estos fenómenos naturales no solo afectan la calidad de vida, sino que también amenazan la seguridad alimentaria y la estabilidad socioeconómica. En este contexto, la IA emerge como una herramienta poderosa para mejorar la predicción y comprensión de estos eventos climáticos. A través del uso de técnicas avanzadas de aprendizaje automático, se están desarrollando modelos que permiten anticipar inundaciones y sequías, optimizar pronósticos de olas de calor, y mejorar la visibilidad en condiciones adversas. Además, la IA facilita la estimación de variables críticas, como la humedad del suelo, que a menudo no se miden de manera directa y es difícil obtener estimaciones precisas. A medida que el cambio climático intensifica la frecuencia e intensidad de estos fenómenos, la integración de la IA en la gestión de datos climáticos se vuelve esencial para mitigar sus impactos y promover una respuesta proactiva frente a las amenazas climáticas.

Las inundaciones se encuentran entre los desastres naturales más destructivos causando grandes daños a la salud humana, la infraestructura, la producción agropecuaria y el sistema socioeconómico. Por ello, la prevención de estos eventos de precipitación extrema es crucial para la evaluación de riesgos y la gestión de peligros. En respuesta a la necesidad de mejorar la predictibilidad de las inundaciones, se han implementado diversos métodos de IA. Por ejemplo, Moon et al. (2019) proponen un sistema de alerta



temprana para lluvias extremas en Corea del Sur, utilizando diferentes técnicas de aprendizaje automático. Asimismo, Barnes et al. (2023) demuestran que las redes neuronales convolucionales pueden mejorar el pronóstico de lluvias mensuales en el Reino Unido al interpretar patrones de presión y temperatura.

Las sequías están relacionadas con condiciones meteorológicas como déficit de precipitación, altas temperaturas y elevada evapotranspiración, además de la variabilidad interanual del sistema climático, como el fenómeno del Niño. Por lo tanto, generar predicciones precisas de sequía con suficiente antelación es un desafío crítico, especialmente debido a que la frecuencia e intensidad de las sequías tenderá a aumentar en un futuro más cálido (Chiang et al., 2021). En este contexto, Zhang et al. (2019) utilizan la técnica de Machine Learning conocida como Extreme Gradient Boosting para desarrollar un modelo no lineal que predice el índice SPEI (Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración) en China con una anticipación de seis meses.

Las olas de calor se han vuelto más frecuentes, persistentes e intensas en las últimas décadas (Seneviratne et al., 2021). Este evento extremo conlleva múltiples consecuencias negativas para la salud, los ecosistemas, la agricultura y la economía, siendo una de las amenazas naturales que más muertes causa. Por ello, es fundamental comprender mejor sus causas y posibles impactos en el sistema climático. Una forma de lograr esto es mejorando la predictibilidad de los pronósticos estacionales, donde la IA juega un papel crucial. Weirich-Benet et al. (2023) demuestran que, mediante la técnica de bosques aleatorios, es posible mejorar el pronóstico de anomalías de temperatura de verano y olas de calor en Europa. De manera similar, Lopez-Gomez et al. (2023) utilizan redes neuronales artificiales para optimizar el pronóstico de eventos de temperaturas extremas por más de dos semanas, basado en los datos del Centro Europeo.

La IA no solo es útil para pronosticar eventos climáticos, sino que también ayuda a estimar variables meteorológicas que no son medidas de forma directa. La humedad del suelo, que representa la cantidad de agua en los poros del suelo, es vital para el desarrollo de cultivos y tiene un impacto significativo en el clima circundante. Sin embargo, obtener datos continuos de humedad del suelo es complicado, ya que generalmente se derivan de información satelital o de modelos climáticos basados en otras variables meteorológicas. Sungmin y Orth (2021) desarrollaron un conjunto de datos global a largo plazo mediante entrenamiento de aprendizaje automático con más de 1.000 mediciones in situ. Por otro lado, Mehdizadeh et al. (2017) emplearon distintos tipos de redes neuronales artificiales para estimar la humedad del suelo a nivel mensual, sin utilizar datos meteorológicos directos.

¿Qué ocurre en Argentina?

En Argentina, se están integrando técnicas de IA para mejorar el análisis de datos climáticos. Recientemente, se han explorado diversas aplicaciones de redes neuronales para abordar la incertidumbre en los pronósticos generados por el Servicio Meteorológico Nacional, lo que ha permitido avances significativos en

la precisión de estos modelos (Sacco, 2023). Además, se han evaluado redes neuronales convolucionales como herramientas efectivas para la reducción de escala de las temperaturas extremas diarias en el sur de Sudamérica, mostrando un buen desempeño en la simulación de estas variables (Balmaceda Huarte, 2023). También se han realizado progresos en la corrección del sesgo de la información producida por el satélite GOES-16, utilizando redes neuronales convolucionales profundas para mejorar la estimación de la precipitación (Gonzalez et al. 2024).

Perspectivas a futuro

El uso combinado de sensores remotos, IA y modelos avanzados de predicción climática continuará transformando el análisis y la gestión de los datos climáticos. Se espera que la integración de estas tecnologías permita no solo mejorar la precisión y resolución espacial de los datos climáticos, sino también anticipar con mayor efectividad eventos extremos como sequías, inundaciones y olas de calor. En regiones como Argentina, donde la infraestructura de estaciones meteorológicas puede ser limitada, estas herramientas serán clave para ampliar la cobertura de datos y optimizar la planificación y respuesta ante los impactos del cambio climático.

A medida que el calentamiento global siga exacerbando los eventos climáticos extremos, será crucial el desarrollo de enfoques más robustos de IA que permitan generar pronósticos de largo plazo y tomar decisiones informadas en sectores críticos como la agricultura, la gestión del agua y la seguridad alimentaria. Además, se prevé que el acceso a bases de datos globales más extensas, junto con el uso de algoritmos de aprendizaje profundo, permitirá a los investigadores y tomadores de decisiones abordar con mayor precisión las incertidumbres inherentes a los escenarios climáticos futuros.

Bibliografía

- Balmaceda Huarte, R., 2023: Aplicación de técnicas de reducción de escala estadística para la generación de proyecciones climáticas regionales de temperaturas extremas en Argentina. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Barnes AP. y otros, 2023: Forecasting seasonal to sub-seasonal rainfall in Great Britain using convolutional-neural networks. *Theoret Appl Climatol* 151(1-2):421-432.
- Boers N. y otros, 2019: Complex networks reveal global pattern of extreme-rainfall teleconnections. *Nature* 566(7744):373-377.
- Chiang, F. y otros, 2021: Evidence of anthropogenic impacts on global drought frequency, duration, and intensity. *Nature Communications*, 12, 2754. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22314-w>.
- Colston, JM. y otros, 2018: Evaluating meteorological data from weather stations, and from satellites and global models for a multi-site epidemiological study, *Environmental Research*, Volume 165, Pages 91-109,

ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.02.027>.

- Guía de instrumentos y métodos de observación. Volumen I – Medición de variables meteorológicas. OMM-Nº8 (<https://library.wmo.int/idurl/4/68714>).
- González, S. y otros, 2024: Corrección de sesgos en estimaciones de precipitación basadas en datos satelitales en infrarrojo. *Memorias De Las JAIIO*, 10(3), 31-36. <https://ojs.sadio.org.ar/index.php/JAIIO/article/view/958>.
- He, D. y otros, 2024: Improvement in the Forecasting of Low Visibility over Guizhou, China, Based on a Multi-Variable Deep Learning Model *Atmosphere* 15, no. 7: 752. <https://doi.org/10.3390/atmos15070752>.
- Lopez-Gomez y otros, 2023: Global extreme heat forecasting using neural weather models. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 2(1), e220035. <https://doi.org/10.1175/AIES-D-22-0035.1>.
- Liu, Y. y otros, 2021: Assessment and Comparison of Six Machine Learning Models in Estimating Evapotranspiration over Croplands Using Remote Sensing and Meteorological Factors *Remote Sensing* 13, no. 19: 3838. <https://doi.org/10.3390/rs13193838>.
- Materia, S, y otros, 2024: Artificial intelligence for climate prediction of extremes: State of the art, challenges, and future perspectives. *WIREs Climate Change*, e914. <https://doi.org/10.1002/wcc.914>.
- Mehdizadeh, S, y otros, 2017: Evaluating the performance of artificial intelligence methods for estimation of monthly mean soil temperature without using meteorological data. *Environ Earth Sci* 76, 325. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6607-8>.
- Moon S-H. y otros, 2019: Application of machine learning to an early warning system for very short-term heavy rainfall. *J Hydrol* 568:1042-1054.
- O, S. y Orth, R., 2021: Global soil moisture data derived through machine learning trained with in-situ measurements. *Sci. Data* 8, 170.
- Sacco, M. A, 2023: Cuantificación de la incertidumbre en los pronósticos usando redes neuronales : aplicación en asimilación de datos . Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Salcedo-Sanz, S. y otros, 2024: Analysis, characterization, prediction, and attribution of extreme atmospheric events with machine learning and deep learning techniques: a review. *Theor Appl Climatol* 155, 1-44. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04571-5>.
- Seneviratne, S. I. y otros, 2021: Weather and climate extreme events in a changing climate. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, et al. (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 1513-1766). Cambridge University Press.
- Weirich-Benet, E. y otros, 2023: Subseasonal prediction of central European summer heatwaves with linear and random Forest machine learning models. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 2(2), e220038.
- Xiao S. y otros, 2022: Bias correction framework for satellite precipitation products using a rain/no rain discriminative model, *Science of The Total Environment*, Volume 818, 151679, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151679>.
- Zhang, R. y otros, 2019: Meteorological drought forecasting based on a statistical model with machine learning techniques in Shaanxi province. China. *Science of the Total Environment*, 665, 338-346. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.43>.

Sobre las autoras

Micaela Abrigo es Coordinadora de Adaptación en Sustentabilidad sin Fronteras. Licenciada en Ciencias Ambientales, estudió en la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. Se especializa en el análisis territorial a través de la información satelital. Actualmente realiza su doctorado desarrollando modelos de estimación de variables biofísicas a través de información satelital e IA. Trabaja en proyectos de investigación-extensión de ganadería destinados a productores rurales en Uruguay. Y cuenta con un amplio conocimiento del territorio rural, y de los desafíos a los que se enfrentan los productores frente a escenarios de cambio climático.

Malena Lozada Montanari integra el equipo de adaptación en Sustentabilidad sin Fronteras. Licenciada en Ciencias de la Atmósfera, de la Universidad de Buenos Aires. Actualmente se encuentra en su último año de Doctorado en la misma área con especial énfasis en el estudio de las proyecciones de cambio climático para las ciudades de Argentina. Y se desempeña como docente de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA). Cuenta con una amplia experiencia en las bases físicas del cambio climático, pero también cómo democratizar esta información para llegar a la sociedad civil y que no quede solo en la academia, a través de la realización de diversos talleres y charlas. Participó en la COP 25 y la COP 28 como observadora por parte de organizaciones ecuménicas. También tiene variada experiencia en diversos medios de comunicación tradicionales y de streaming.





El uso de la inteligencia artificial en el modelado de escenarios climáticos

Matías Olmo

En las últimas décadas, el cambio climático se ha convertido en uno de los desafíos más urgentes a nivel global. Fenómenos extremos como sequías prolongadas, olas de calor y lluvias intensas representan grandes retos para el desarrollo socio-económico y el diseño de estrategias de adaptación. Asimismo, continúan siendo el centro de atención en la comunidad científica para una mejor comprensión y predicción del comportamiento del clima (IPCC 2021). En este contexto, la IA ha emergido como una herramienta poderosa que está siendo cada vez más utilizada en el modelado del tiempo y del clima, con el objetivo de mejorar la precisión, rapidez y detalle de las predicciones sobre los posibles cambios en el clima global y regional (Eyring et al. 2024).

El desafío del modelado climático

Una herramienta fundamental en el estudio del clima son los **modelos climáticos**. Estos se basan en principios físicos y matemáticos, que describen las interacciones entre la atmósfera, los océanos y la superficie terrestre. Permiten entender fenómenos en diferentes escalas temporales y generar escenarios históricos y futuros (Taylor et al. 2012; Eyring et al. 2016). Sin embargo, estos modelos requieren una alta

capacidad computacional y se encuentran condicionados por la complejidad del sistema climático, así como por el conocimiento aún limitado sobre ciertos aspectos del clima y la incertidumbre inherente a las **proyecciones a largo plazo** (Lafferty et al. 2023).

A pesar de los avances en el desarrollo de modelos basados en el entendimiento físico, las simulaciones climáticas todavía presentan limitaciones en términos de resolución espacial y temporal (Olmo et al. 2022). Esto es particularmente importante para la representación de **fenómenos extremos**, como las lluvias intensas, que tienen escalas espaciales y temporales frecuentemente pequeñas (entre kilómetros y horas). Los modelos climáticos tradicionales no pueden predecir estos fenómenos explícitamente (Ambrizzi et al. 2018), por lo que a menudo se implementan técnicas de reducción de escala (downscaling), ya sean dinámicas (basadas en modelos numéricos que resuelven ecuaciones físicas) o estadísticas (a partir de relaciones empíricas), para mejorar el entendimiento regional y local del clima (Gutiérrez et al. 2019; Giorgi 2019).

Aplicaciones de la IA en el modelado climático

En el campo del clima, se han empleado técnicas de *machine learning*¹ para identificar modos de variabilidad climática, mejorar la detección de patrones y optimizar los modelos de simulación climática. Estudios recientes muestran que la IA puede realizar predicciones de tendencias climáticas a largo plazo con gran precisión, ayudando a mejorar la planificación y mitigación de **riesgos asociados con eventos extremos** como tormentas o sequías (Chen et al. 2010). Las contribuciones de la IA incluyen:

- 1. Procesamiento de grandes volúmenes de datos:** la IA permite analizar datos masivos, combinando información heterogénea como datos meteorológicos (obtenidos de diversas fuentes como sensores satelitales y estaciones meteorológicas), socioeconómicos y de uso del suelo. Así, supera las limitaciones de los modelos estadísticos tradicionales, que a menudo se ven restringidos por la cantidad de datos que pueden procesar. Esto permite generar predicciones más robustas y detalladas (Chen et al. 2010).
- 2. Mejora en la predicción de eventos extremos:** Mientras que los modelos climáticos tradicionales se basan en ecuaciones físicas y parametrizaciones que pueden no capturar completamente la complejidad del sistema climático, la IA puede reconocer patrones poco frecuentes en grandes conjuntos de datos. Esto ayuda a identificar la ocurrencia de fenómenos locales y extremos (Olmo et al. 2021). Los modelos de aprendizaje profundo, como las redes neuronales convolucionales, pueden analizar información de múltiples variables climáticas sobre un dominio espacial de escala continental (Baño-Medina et al 2012; Balmaceda-Huarte et al. 2024).
- 3. Reducción de la incertidumbre:** Uno de los mayores desafíos en el modelado climático es la incertidumbre en las proyecciones, especialmente hacia fin de siglo (Rampal et al. 2024). Los algoritmos de IA pueden contribuir en la corrección de sesgos en los datos de entrada o errores en los resultados de los modelos. Además, pueden mejorar la parametrización de ciertos procesos climáticos que, de otro modo, serían

¹ El machine learning (aprendizaje automático) es una rama de la inteligencia artificial que permite a las computadoras aprender y mejorar automáticamente a partir de datos, sin necesidad de ser programadas explícitamente. Utiliza algoritmos para identificar patrones, hacer predicciones o tomar decisiones basadas en esos datos.

difíciles de capturar con precisión a través de métodos convencionales (Eyring et al. 2024).

- 4. Incremento de la resolución de los datos climáticos:** Técnicas avanzadas de downscaling estadístico utilizan IA, como las redes neuronales o los random forest, que complejizan modelos estadísticos más convencionales agregando no-linealidad al problema (Balmaceda-Huarte et al. 2024; Baño-Medina et al. 2020).
- 5. Optimización de recursos computacionales:** La IA permite ejecutar simulaciones y análisis mucho más rápidamente y con menos recursos que los métodos clásicos. Permite optimizar recursos al sustituir modelos físicos complejos por aproximaciones más eficientes que no sacrifican precisión. A su vez, es posible aproximar las salidas de modelos climáticos complejos sin necesidad de ejecutar simulaciones completas. Así, el uso de emuladores climáticos es una línea de investigación incipiente que permite abordar esto, aprendiendo relaciones entre variables climáticas simuladas por los modelos (Rampal et al. 2024).

Limitaciones y desafíos

Aunque la IA ha demostrado ser una herramienta prometedora para mejorar el modelado climático, también enfrenta ciertas limitaciones:

- 1. Dependencia al volumen y la calidad de los datos:** Para que los modelos de IA sean efectivos, necesitan ser entrenados con datos precisos y de alta calidad, cubriendo un período temporal lo más largo posible para aprender de un conjunto de datos más extenso. Sin embargo, en muchas áreas del mundo, especialmente en regiones en desarrollo o remotas, la recopilación de datos climáticos de calidad es limitada. Un ejemplo es la escasez de observaciones sobre la cordillera de los Andes (Condom et al. 2020), un área de gran deficiencia en muchos modelos climáticos (Ambrizzi et al. 2018). Esto también puede limitar la capacidad de predicción de los modelos de IA. Además, los datos pueden estar sesgados, incompletos o desactualizados, lo que introduce errores en los modelos. Por lo que existe una sensibilidad importante al conjunto de datos con el que los métodos de IA son entrenados y validados (Molina et al. 2023).
- 2. Falta de transparencia y explicabilidad:** Los algoritmos de IA, especialmente los modelos de aprendizaje profundo, a menudo son considerados “cajas negras”, lo que significa que, aunque pueden generar predicciones precisas, no siempre es claro cómo llegan a esos resultados, lo que puede dificultar su explicación y validación científica. Esto puede representar un obstáculo para el entendimiento climático, ya que al tratarse de un sistema físico, la interpretabilidad de los resultados y los mecanismos subyacentes es de gran importancia (Baño-Medina et al. 2024).
- 3. Dificultad para extrapolar a largo plazo:** Si bien los modelos de IA son hábiles para identificar patrones en datos históricos, pueden tener dificultades para predecir situaciones inéditas que no se basan en patrones previos. Esto es particularmente importante en el contexto del cambio climático, donde los escenarios futuros podrían diferir significativamente del pasado debido a factores como el aumento de

las emisiones de gases de efecto invernadero y los cambios en el uso del suelo. Asimismo, estas técnicas suelen considerar estacionariedad en las relaciones aprendidas, es decir, que no varían con el tiempo, lo que también implica una limitación metodológica (Maraun et al. 2020).

4. **Integración con modelos físicos tradicionales:** La IA no puede reemplazar por completo a los modelos físicos; más bien, ambos deben complementarse para obtener resultados más completos y fiables. Sin embargo, combinar estos enfoques no siempre es sencillo. Mientras que los modelos físicos están fundamentados en la teoría científica, los modelos de IA, al ser puramente empíricos, pueden generar resultados que no siempre se alinean con nuestra comprensión del sistema climático. Integrar los resultados de ambos modelos para producir predicciones coherentes y útiles sigue siendo un desafío abierto en la ciencia climática (Rampal et al. 2024; Cavazos et al. 2024).
5. **Intercomparación con técnicas estadísticas clásicas:** a pesar de los potenciales beneficios de la IA en el modelado climático, su valor agregado respecto a las técnicas clásicas (que suelen permitir una mayor interpretabilidad y estudio de causalidad) es altamente dependiente del aspecto evaluado, como la intensidad y frecuencia en condiciones normales o extremas (Olmo et al. 2022).

Estas limitaciones destacan que el uso de IA en estudios climáticos debe ser complementado con enfoques tradicionales y sometido a validación rigurosa para maximizar su efectividad.

Conclusión y síntesis

El uso de la IA en el modelado de escenarios climáticos representa un avance significativo en la capacidad para entender y predecir el comportamiento del clima, con potencial para mejorar la predicción de fenómenos extremos y optimizar el uso de recursos. A medida que el cambio climático sigue afectando al planeta, la integración de la IA en la ciencia climática se convierte en una herramienta vital para la planificación, mitigación de sus impactos y acelerar el camino hacia la sostenibilidad. La bibliografía sugiere que la IA **complementa y potencia** los modelos climáticos clásicos. Sin embargo, su éxito futuro dependerá de la combinación con enfoques tradicionales y de la mejora en la validación e interpretación de sus resultados.

Bibliografía

- Ambrizzi, T., Reboita, M. S., Porfirio da Rocha, R., & Llopart, M. (2018). The state-of-the-art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436(1), 98–120. <https://doi.org/10.1111/nyas.13932>
- Balmaceda-Huarte R, Olmo M, Bettolli ML (2024): Regional climate projections of daily extreme temperatures in Argentina applying statistical downscaling to CMIP5 and CMIP6 models. *Climate Dynamics* 62 (6), DOI 10.1007/s00382-024-07147-9

- Balmaceda-Huarte, R., J. Baño-Medina, M. E. Olmo, and M. L. Bettolli, 2024: On the use of convolutional neural networks for downscaling daily temperatures over southern South America in a climate change scenario. *Climate Dyn.*, 62, 383–397, <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06912-6>.
- Baño-Medina, J., 2020: Understanding deep learning decisions in statistical downscaling models. *CI2020: Proc. 10th Int. Conf. on Climate Informatics*, Online, Association for Computing Machinery, 79–85, <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3429309.3429321>.
- Baño-Medina, J., M. Iturbide, J. Fernández, and J. M. Gutiérrez, 2024. Transferability and Explainability of Deep Learning Emulators for Regional Climate Model Projections: Perspectives for Future Applications. *Artif. Intell. Earth Syst.*, 3, e230099, <https://doi.org/10.1175/AIES-D-23-0099.1>
- Baño-Medina, J., Manzananas, R., & Gutiérrez, J. M. (2021). On the suitability of deep convolutional neural networks for continental-wide downscaling of climate change projections. *Climate Dynamics*, 57(11), 2941–2951.
- Cavazos T, Bettolli ML, Campbell D, et al. (2024) Challenges for climate change adaptation in Latin America and the Caribbean region. *Front. Clim.* 6:1392033. doi: 10.3389/fclim.2024.1392033
- Chen, L., Chen, Z., Zhang, Y., Liu, Y., Osman, A. I., Farghali, M., ... & Yap, P. S. (2023). Artificial intelligence-based solutions for climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(5), 2525–2557.
- Condom T, Martínez R, Pabón JD, Costa F, Pineda L, Nieto JJ, Villacis M (2020) Climatological and hydrological observations for the South American Andes: in situ stations, satellite, and reanalysis data sets. *Front Earth Sci* 8:92. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00092>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958.
- Eyring, V., Collins, W. D., Gentine, P., Barnes, E. A., Barreiro, M., Beucler, T., ... & Zanna, L. (2024). Pushing the frontiers in climate modelling and analysis with machine learning. *Nature Climate Change*, 14(9), 916–928.
- Giorgi F (2019) Thirty years of regional climate modeling: where are we and where are we going next? *J Geophys Res Atmos* 124(11):5696–5723. <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>
- Gutiérrez, J. M., Maraun, D., Widmann, M., Huth, R., Hertig, E., Benestad, R., ... & Pagé, C. (2019). An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment. *International journal of climatology*, 39(9), 3750–3785.
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. In V., Masson-Delmotte, P., Zhai, A., Pirani, S. L., Connors, C., Péan, (Eds.), Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change Masson-Delmotte. Cambridge University Press. In press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- Lafferty, D. C., & Srivier, R. L. (2023). Downscaling and bias-correction contribute considerable uncertainty to local climate projections in CMIP6. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1), 158.
- Maraun D, Widmann M (2018) *Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Molina, M. J., and Coauthors, 2023: A Review of Recent and Emerging Machine Learning Applications for Climate Variability and Weather Phenomena. *Artif. Intell. Earth Syst.*, 2, 220086, <https://doi.org/10.1175/>

AIES-D-22-0086.1.

- Olmo ME, Balmaceda-Huarte R, Bettolli M (2022) Multi-model ensemble of statistically downscaled GCMs over southeastern South America: historical evaluation and future projections of daily precipitation with focus on extremes. *Clim Dyn* 59:3051– 3068. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06236-x>
- Olmo ME, Bettolli ML (2021). Extreme daily precipitation in southern South America: statistical characterization and circulation types using observational datasets and regional climate models. *Clim Dyn*. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05748-2>
- Olmo, M. E., Weber, T., Teichmann, C., & Bettolli, M. L. (2022). Compound events in South America using the CORDEX-CORE ensemble: Current climate conditions and future projections in a global warming scenario. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2022JD037708. <https://doi.org/10.1029/2022JD037708>
- Rampal, N., Hobeichi, S., Gibson, P. B., Baño-Medina, J., Abramowitz, G., Beucler, T., ... & Gutiérrez, J. M. (2024). Enhancing Regional Climate Downscaling through Advances in Machine Learning. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 3(2), 230066.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment 908 Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485–498. Retrieved from 10.1175/BAMS-D-11-00094.1

Sobre el autor

Matías Olmo es climatólogo, especializado en cambios futuros de eventos extremos y la circulación atmosférica. Realizó sus estudios de licenciatura y doctorado en Ciencias de la Atmósfera en la Universidad de Buenos Aires. Ha realizado estadias de investigación en Francia y Alemania para colaborar con otras comunidades científicas en el estudio del clima de Sudamérica. Actualmente se emplea como investigador en el Barcelona Supercomputing Center de España, donde desarrolla técnicas estadísticas y de aprendizaje automático para la reducción de incertidumbre en las simulaciones climáticas.

matias.olmo@bsc.es

Cambio Climático, Salud y la Inteligencia Artificial

Dr. Damián Markov

El cambio climático no solo afecta a los ecosistemas naturales, sino que también tiene consecuencias devastadoras para la salud humana. Los impactos del cambio climático son diversos, e incluyen aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos climáticos extremos, cambios en la ecología de vectores transmisores de enfermedades y pone en riesgo la seguridad alimentaria e hídrica.

Los efectos sobre la salud afectan negativamente a las poblaciones expuestas. Se estima que la contaminación del aire mata prematuramente a más de 8 millones de personas al año (UNICEF, 2021). Y que las olas de calor provocan una pérdida del 1,34% del PBI de Latinoamérica producto de la reducción de la capacidad laboral a causa de enfermedades relacionadas al calor (Hartinger et al., 2024). Más de 500 millones de personas en América se encuentran expuestas al dengue (WHO - Environmental Health, 2024). Los eventos climáticos extremos no solamente destruyen infraestructura, hogares y medios de vida, sino que también tienen consecuencias directas sobre la población, ya que provocan muertes, lesiones y problemas de salud mental. Se prevé que las comunidades vulnerables verán disminuido su acceso a alimentos de calidad y a fuentes de agua segura, obligándolos a migrar forzosamente.

Los sistemas de salud también se encuentran expuestos a embates climáticos, peligrando el acceso a la atención, la cadena de suministros de medicamentos, vacunas e insumos médicos y la infraestructura que permite que estos establecimientos operen normalmente. Se estima que el costo de los daños directos para la salud (excluyendo los impactos en los sectores determinantes para la salud, como la agricultura, el agua y el saneamiento) será de entre USD \$2000 y \$4000 millones al año a 2030.

Cerca de 3.600 millones de personas -la mitad de la población mundial- viven en "contextos altamente vulnerables" al cambio climático (Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), 2023). Ya sea por sus condiciones físicas, su rol en la sociedad u otras condiciones particulares, serán desproporcionadamente



más vulnerables los ancianos, niños y niñas, mujeres, trabajadores al aire libre, personas con enfermedades preexistentes y las que viven en la pobreza, especialmente en países de ingresos bajos y medios (LMICs) como Argentina. Estos países enfrentan desafíos adicionales debido a la falta de infraestructura, inversión insuficiente y políticas inadecuadas, que limitan su capacidad para adaptarse a estas amenazas.

Por su parte, si el sector salud a nivel global fuera un país, sería el quinto mayor contaminante del mundo (Karlner et al., 2020), contribuyendo al 4,4% de las emisiones globales netas. Los tres emisores más grandes (Estados Unidos, China y la Unión Europea) representan el 56% de la huella climática total del sector de la salud y si se toman los 10 principales países emisores, esa huella llega al 75% (Salud Sin Daño, 2024). El GHG Protocol Standard, divide las emisiones en 3 alcances, siendo el tercero atribuible a su cadena de suministro, incluyendo la producción, el empaque, el transporte y la disposición de los bienes y servicios adquiridos. Este representa el 71 % de la huella climática del sector de la salud.

En este contexto, la IA se presenta como una herramienta poderosa y transformadora. El informe 2024 del World Economic Forum (9 ways AI is being deployed to fight climate change | World Economic Forum, 2024) da cuenta de proyectos climáticos concretos que visibilizan su potencial. Su capacidad para recopilar y analizar grandes cantidades de datos en tiempo real puede ayudar a los sistemas de salud a adaptarse a los riesgos climáticos emergentes, mejorar la respuesta a emergencias y optimizar recursos. No obstante, el uso de la IA en el nexo entre clima y salud también enfrenta desafíos donde la infraestructura y los datos son limitados. Este capítulo explora las aplicaciones y beneficios potenciales de la IA en la salud en el contexto del cambio climático, así como los retos y consideraciones éticas y técnicas necesarias para implementar estas soluciones de manera efectiva.

La IA como herramienta para la Salud y el Cambio Climático

La IA se está consolidando como una herramienta esencial para abordar los desafíos interconectados de la salud y el cambio climático. Su capacidad para analizar grandes volúmenes de datos, identificar patrones complejos y generar predicciones precisas la posiciona como una aliada estratégica en la planificación, mitigación y adaptación frente a los impactos climáticos en la salud humana. Desde el monitoreo de enfermedades transmitidas por vectores hasta la optimización de recursos sanitarios, la IA abre nuevas posibilidades para transformar la respuesta global frente a una de las mayores crisis de nuestra era.

Predicción de Eventos Climáticos Extremos

La IA mejora la precisión en la predicción de eventos climáticos extremos analizando grandes volúmenes de datos meteorológicos en tiempo real para identificar patrones con mayor rapidez y precisión. Por ejemplo, en ciudades como Shanghai y Filadelfia, y con asistencia de Google en India y Bangladesh, se

han implementado sistemas de alerta temprana basados en IA que monitorean continuamente los patrones climáticos y emiten alertas cuando se identifican condiciones de riesgo (Khalid & Skenazy, 2024). Estos sistemas no solo reducen los tiempos de respuesta, sino que también optimizan el uso de recursos, protegiendo vidas y minimizando pérdidas económicas.

Control de Enfermedades Transmitidas por Vectores

La IA modela la propagación de enfermedades transmitidas por vectores exacerbadas por el cambio climático utilizando datos climáticos y epidemiológicos para predecir brotes y planificar intervenciones preventivas en regiones como América Latina, optimizando así las respuestas de salud pública (Farooq, 2024). Esto permitiría a los ministerios de salud y a las organizaciones locales coordinar mejor las campañas de vacunación, fumigación y educación comunitaria, basándose en datos precisos sobre los riesgos inminentes.

Gestión de Recursos, Telemedicina y Reducción de Huella de Carbono

La IA optimiza la gestión de recursos en el sector salud, desde la optimización de inventarios y la eficientización del uso de energía hasta la implementación de la telemedicina. Al automatizar procesos y analizar grandes conjuntos de datos, la IA reduce costos, mejora la eficiencia y disminuye la huella de carbono. La telemedicina, potenciada por IA, amplía el acceso a la atención médica y reduce la necesidad de desplazamientos, contribuyendo a una mayor sostenibilidad (Das & J, 2023). Además, la integración de IA en la gestión de la cadena de suministro médico permite una mayor eficiencia y reducción de desperdicios, contribuyendo a la sostenibilidad en el sector.

Desafíos en la Implementación de IA en Clima y Salud

A pesar del potencial transformador de la IA en la intersección de clima y salud, existen varios desafíos críticos que deben abordarse, especialmente en contextos de bajos ingresos y en países en desarrollo.

Calidad y Disponibilidad de Datos

El éxito de los modelos de IA depende en gran medida de la calidad y disponibilidad de datos. En los LMICs, muchos de los datos necesarios, tanto climáticos como de salud, no están disponibles o son insuficientes

para desarrollar modelos precisos y representativos (Obringer et al., 2024). Sin acceso a datos de alta calidad y sin sesgos, la IA puede fallar en generar resultados precisos y efectivos (Singh, 2024). Además, en regiones como América Latina, la recopilación y almacenamiento a menudo dependen de infraestructuras frágiles, lo que dificulta la construcción de modelos precisos y consistentes (Khalid & Skenazy, 2024).

Consumo Energético y Sostenibilidad de la IA

El uso de IA es intensivo en energía. Un análisis publicado recientemente (Erdenesanaa, 2024) predice que, para el año 2027, solo los nuevos servidores de IA vendidos ese año podrían consumir la misma energía que Argentina o Suecia usan anualmente (de Vries, 2023). El entrenamiento de modelos grandes de IA consume cantidades masivas de electricidad, y los centros de datos que albergan estos sistemas requieren sistemas de enfriamiento y energía constante. Una sola implementación de IA puede consumir tanta energía como cinco automóviles durante su vida útil (Thomas, 2024). Esto plantea un dilema para un sector que busca reducir su huella de carbono mientras mejora sus capacidades tecnológicas.

Para hacer que la IA sea sostenible, es crucial adoptar prácticas de “IA verde”, como el uso de energías renovables y la implementación de algoritmos de bajo consumo. Las innovaciones en aprendizaje automático miniaturizado, conocidas como “Tiny Machine Learning”, buscan reducir el impacto ambiental mediante el uso de dispositivos más eficientes y compactos, que puedan encoger grandes modelos pre-entrenados en otros más pequeños (Das & J, 2023).



Sesgos y Desigualdades en los Modelos de IA

Existen ciertas limitaciones que no permiten un despliegue completo y estandarizado de esta tecnología. Por ejemplo, la definición de “ola de calor” varía según la región, generando modelos sesgados que pueden ser adecuados localmente, pero no globalmente. A su vez, los sistemas de IA pueden amplificar sesgos presentes en los datos con los que son entrenados, lo que perpetúa desigualdades preexistentes. Por ejemplo, en el ámbito de la salud, se han identificado sesgos en los diagnósticos que varían según género o raza (Sarabu, 2024). Este problema es especialmente relevante en países del Sur Global, donde la representación en bases de datos globales es limitada. Es fundamental que los modelos se adapten y se ajusten para reflejar la diversidad de las realidades locales.

Costos de Implementación y Accesibilidad

Las inversiones globales corporativas en IA fueron cerca de \$190 mil millones de dólares para 2022, siendo el cuidado de la salud el área con mayor inversión –\$6.1 mil millones– (Maslej et al., 2023). Los costos asociados a la integración de IA, adquisición de datos, preparación de infraestructura y capacitación de personal son significativos, y muchas instalaciones de salud en Argentina y otros LMICs priorizan la inversión en equipos médicos esenciales sobre tecnología avanzada (Das & J, 2023). En estos contextos, los programas de telemedicina, aunque prometedores, también presentan desafíos debido a la necesidad de infraestructura digital y dispositivos móviles adecuados, que no siempre están disponibles en comunidades de bajos recursos.

Consideraciones Éticas y Políticas

El despliegue de IA en la intersección de clima y salud plantea dilemas éticos y desafíos regulatorios. En muchos casos, la IA se desarrolla con una perspectiva occidental, sin tomar en cuenta las complejidades y particularidades de los contextos locales en los LMICs (Bloomfield et al., 2021). Es esencial una gobernanza adecuada y la colaboración entre gobiernos locales, organizaciones no gubernamentales y el sector privado para asegurar que la IA se use de manera justa y equitativa.

Además, es necesario evaluar el impacto ambiental completo de la IA a lo largo de su ciclo de vida, desde su desarrollo hasta su implementación. Esto implica realizar evaluaciones de ciclo de vida (Life Cycle Assessments - LCA-) que identifiquen oportunidades para un diseño ecológico, selección sostenible de materiales y gestión responsable al final de la vida útil de los sistemas de IA en el sector salud (Ueda et al., 2024). Estas evaluaciones ayudan a minimizar el impacto ambiental de la IA, asegurando que se integre en la infraestructura de salud sin comprometer los compromisos climáticos globales.

Por otra parte, la gestión responsable de datos es crucial para proteger la privacidad de los pacientes y garantizar que la información no se utilice de manera indebida o discriminatoria. Las soluciones basadas en IA deben promover la equidad, asegurando que estas tecnologías beneficien a las poblaciones más vulnerables.

Conclusiones

La IA puede mejorar nuestra comprensión de relaciones complejas, no evidentes y en constante evolución entre el clima y los factores de salud; predecir escenarios en diferentes horizontes temporales; y recomendar intervenciones para optimizar los resultados de salud. A pesar de este potencial, los casos de uso de IA en la intersección del clima y la salud siguen siendo incipientes, especialmente en los países de bajos y medianos ingresos (LMICs), donde aún no existen los datos necesarios, los sistemas analíticos y las condiciones del ecosistema tanto a nivel infraestructura y recursos como de conocimiento para implementarlo.

El despliegue de estas tecnologías requiere un enfoque colaborativo y adaptativo entre todos los actores involucrados, tanto para la investigación como para su implementación. En los países del Sur Global, donde las disparidades en infraestructura y recursos son notorias, es crucial asegurar que las soluciones basadas en IA se desarrollen con un enfoque equitativo, ético y ajustado a las realidades locales. Gracias a su capacidad de motivar la innovación, su ritmo de adopción y velocidad de procesamiento, la IA podría contribuir en la resolución de los desafíos más urgentes que enfrenta nuestro mundo. Así, podremos avanzar hacia un futuro donde la salud y el medio ambiente se protejan mutuamente, creando sociedades más resilientes y saludables.

Bibliografía

- 9 ways AI is being deployed to fight climate change | World Economic Forum. (s. f.). <https://www.weforum.org/stories/2024/02/ai-combat-climate-change/>
- Bloomfield, P., Clutton-Brock, P., Pencheon, E., Magnusson, J., & Karpathakis, K. (2021). Artificial Intelligence in the NHS: Climate and Emissions. *The Journal of Climate Change and Health*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.joclim.2021.100056>
- Climate change brings new diseases to Europe – using AI to prepare. (s. f.). <https://healthcare-in-europe.com/en/news/climate-change-new-diseases-europe-ai-preparation.html>
- Das, K. P., & J, C. (2023). A survey on artificial intelligence for reducing the climate footprint in healthcare. *Energy Nexus*, 9, 100167.

- <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100167>
- de Vries, A. (2023). The growing energy footprint of artificial intelligence. *Joule*, 7(10), 2191-2194. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.09.004>
- Environmental health. (2024). World Health Organization (WHO). <https://www.who.int/health-topics/environmental-health>
- Erdenesanaa, D. (2024, agosto). A.I. Could Soon Need as Much Electricity as an Entire Country. *Climate Forward*.
- <https://www.nytimes.com/2023/10/10/climate/ai-could-soon-need-as-much-electricity-as-an-entire-country.html>
- Hartinger, S. M., Palmeiro-Silva, Y. K., Llerena-Cayo, C., Blanco-Villafuerte, L., Escobar, L. E., Diaz, A., Sarmiento, J. H., Lescano, A. G., Melo, O., Rojas-Rueda, D., Takahashi, B., Callaghan, M., Chesini, F., Dasgupta, S., Posse, C. G., Gouveia, N., Martins De Carvalho, A., Miranda-Chacón, Z., Mohajeri, N., ... Romanello, M. (2024). The 2023 Latin America report of the Lancet Countdown on health and climate change: The imperative for health-centred climate-resilient development. *The Lancet Regional Health - Americas*, 33, 100746.
- <https://doi.org/10.1016/j.lana.2024.100746>
- Huella climática del sector salud—Reporte | Salud sin Daño (América Latina). (s.f.). <https://lac.saludsindanio.org/recursos/huella-climatica-del-sector-salud-reporte>
- Intergovernmental Panel On Climate Change (ipcc). (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (1.a ed.)*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Karliner, J., Slotterback, S., Boyd, R., Ashby, B., Steele, K., & Wang, J. (2020). Health care’s climate footprint: The health sector contribution and opportunities for action. *European Journal of Public Health*, 30(5).
- <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckaa165.843>
- Khalid, S., & Skenazy, S. (2024, agosto 9). AI for Public and Planetary Health. *Climate Change AI*.
- <https://www.climatechange.ai/blog/2024-08-09-ai-public-planetary-health>
- Maslej, N., Fattorini, L., Brynjolfsson, E., Etchemendy, J., Ligett, K., Lyons, T., Manyika, J., Ngo, H., Niebles, J. C., Parli, V., Shoham, Y., Wald, R., Clark, J., & Perrault, R. (2023). *Artificial Intelligence Index Report 2023* (p. 386). Institute for Human-Centered AI, Stanford University.
- https://aiindex.stanford.edu/wp-content/uploads/2023/04/HAI_AI-Index-Report_2023.pdf
- Nearly 240 million children with disabilities around the world, UNICEF’s most comprehensive statistical analysis finds. (s. f.).
- <https://www.unicef.org/press-releases/nearly-240-million-children-disabilities-around-world-unicefs-most-comprehensive>
- Obringer, R., Kumar, R., & Madani, K. (2024, agosto 18). *Harnessing the Power of AI for Climate Change Impact Assessment*. United Nations University Institute for Water, Environment, and Health (UNU-INWEH).
- <https://collections.unu.edu/view/UNU:9738>
- Pascarelli, K. (2024, agosto 8). *The Role of AI within the Health and Climate Change Nexus: A Worthy Big Bet?* – PSI.
- <https://www.psi.org/2024/08/the-role-of-ai-within-the-health-and-climate-change-nexus-a-worthy->

big-bet/

- Sarabu, C. (2024, enero 21). AI x Climate x Health. CHILL.
- <https://www.ourclimatehealth.org/newsletter/ai-climate-health>
- Singh, V. K. (2024, agosto 23). The role of Artificial Intelligence in advancing climate solutions is quite high.
- <https://www.bizzbuzz.news/technology/ai/the-role-of-artificial-intelligence-in-advancing-climate-solutions-is-quite-high-1334483>
- Thomas, L. (2024, agosto 5). Ensuring sustainable and responsible use of AI in healthcare. News-Medical.
- <https://www.news-medical.net/news/20240805/Ensuring-sustainable-and-responsible-use-of-AI-in-healthcare.aspx>
- Ueda, D., Walston, S. L., Fujita, S., Fushimi, Y., Tsuboyama, T., Kamagata, K., Yamada, A., Yanagawa, M., Ito, R., Fujima, N., Kawamura, M., Nakaura, T., Matsui, Y., Tatsugami, F., Fujioka, T., Nozaki, T., Hirata, K., & Naganawa, S. (2024). Climate change and artificial intelligence in healthcare: Review and recommendations towards a sustainable future. *Diagnostic and Interventional Imaging*, 105(11), 453-459. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2024.06.002>

Sobre el Autor

Damian Markov es Coordinador de Salud y Cambio Climático en Sustentabilidad sin Fronteras. Médico pediatra especializado en Medicina Climática y Salud Ambiental. Docente asociado del Climate & Health Science Policy Fellowship de la Facultad de Medicina de la Universidad de Colorado (EE.UU.). Es también cofundador y director para América Latina de SVIVA, una empresa de consultoría especializada en salud humana y ambiental que se esfuerza por ampliar la promoción y la comprensión de los efectos del clima en la salud, al mismo tiempo que ofrece tecnología climática de vanguardia relacionada con la salud en toda la región de América Latina.

En el ámbito público, dirigió el proyecto “Hospitales Verdes” para el Ministerio de Salud de la Ciudad de Buenos Aires y llevó adelante una beca de investigación en un hospital pediátrico de alta complejidad. Es miembro activo de varias redes de trabajo, como el Comité de Salud Infantil y Ambiente de la Sociedad Argentina de Pediatría, la Red de Clima y Salud de Latinoamérica y el Caribe, Water Positive Think Tank y la Climate & Health Foundation Network donde aporta su perspectiva a través de entrenamientos, proyectos científicos y colaboraciones. Además comunica sobre la relación entre el clima y la salud en redes a través de su perfil @elmedicodelclima.

03

Consumo energético de la IA: desafíos y soluciones



Globant

El avance de la IA viene acompañado de un desafío ambiental significativo: su creciente demanda energética. En el siglo XXI, la IA podría desempeñar un papel económico comparable al que tuvieron el petróleo y el gas en el siglo XX, pero con un impacto ambiental considerable si no se gestionan adecuadamente sus externalidades. La ventaja en esta era radica en que, esta vez, la sostenibilidad se está considerando desde el inicio de muchos procesos.

Además del consumo energético, la intensidad en el uso de recursos **mineros** e **hídricos** representa otra externalidad negativa que desafía la sostenibilidad tecnológica. Según Harvard Business Review, para 2030, se espera que la demanda energética de la IA aumente un **160%**.

La huella energética de la IA en cifras

El entrenamiento y la operación de modelos de IA requieren una cantidad significativa de energía, agua y materiales. **Para ilustrarlo**, una sola consulta en ChatGPT requiere **2.9 Wh de electricidad**, en comparación con **0.3 Wh** de una búsqueda en Google, según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2023).

El impacto global es evidente: los centros de datos, que sustentan estas tecnologías, consumieron entre **1% y 2%** de la electricidad mundial en 2023. Se prevé que esta cifra aumente hasta **3% a 4%** para 2030 (SemiAnalysis, 2024). La IEA advierte que, para **2026**, estos centros podrían llegar a consumir tanta electricidad como **todo Japón**. Asimismo, investigaciones de SemiAnalysis estiman que la IA podría impulsar a los centros de datos a consumir un 4.5% de la generación eléctrica mundial para 2030.

A nivel corporativo, las grandes empresas tecnológicas también enfrentan este desafío. A pesar de sus compromisos para reducir la huella de carbono, tanto **Microsoft** como **Google** reportaron aumentos significativos en sus emisiones para 2024, del 30% y 13%, respectivamente. Esto refleja las crecientes demandas energéticas derivadas del entrenamiento de modelos avanzados de IA y la expansión de sus infraestructuras.

Factores que impulsan el alto consumo energético

1. Complejidad y escalabilidad de los modelos

El desarrollo de modelos cada vez más sofisticados, como GPT-4, que contiene miles de millones de parámetros, requiere recursos exponenciales. A medida que los modelos duplican sus parámetros, las demandas energéticas crecen de manera considerable. El futuro anticipa modelos con billones de parámetros, lo que obligará a duplicar las capacidades actuales de los centros de datos, con un impacto ambiental drástico si no se implementan prácticas sostenibles desde ahora.

2. Infraestructura energética no sostenible

A pesar del crecimiento de las energías renovables, una gran parte de los centros de datos sigue dependiendo de combustibles fósiles, lo que incrementa las emisiones. Centros en regiones como Asia, por ejemplo, funcionan con apenas **un 4% a 18%** de energía libre de carbono, en comparación con el **97%** de Finlandia, donde Google ha implementado energías limpias. Esta disparidad destaca la necesidad urgente de acelerar la transición energética global.

3. Falta de conciencia sobre el impacto de la tecnología

La fascinación por implementar IA en diversas aplicaciones ha llevado a un uso innecesario y poco eficiente de esta tecnología. Soluciones complejas de IA se aplican a tareas que podrían resolverse mediante métodos más simples y con menor impacto energético, como análisis estadísticos optimizados. La falta de un enfoque crítico agrava el consumo energético y refuerza la necesidad de una gobernanza más robusta y consciente.

4. Baja adopción de prácticas de Green IT

El desarrollo de software más sostenible sigue siendo una prioridad secundaria. La mayoría de los modelos priorizan funcionalidad y velocidad, en detrimento de la eficiencia energética. Herramientas como el **Software Carbon Intensity (SCI)** aún no se adoptan ampliamente, dificultando la medición y reducción del impacto ambiental.

Otros impactos ambientales

1. Generación de residuos electrónicos (e-waste)

El hardware especializado para IA, como **GPUs** y **chips ASIC**, tiene ciclos de vida cortos, generando toneladas de desechos electrónicos. Sin políticas efectivas de reciclaje, estos residuos terminan en vertederos, agravando la crisis del e-waste. Además, contienen materiales valiosos como litio y cobalto, que podrían recuperarse dentro de un marco de economía circular

2. Consumo intensivo de agua

El funcionamiento de los centros de datos, necesarios para entrenar modelos de IA, implica un consumo masivo de agua para refrigerar los servidores. Según la OCDE, el uso de IA en regiones desérticas, como **Arizona** o **Chile**, exacerba la escasez de agua, aumentando tensiones en comunidades locales. Una simple consulta de IA, como redactar un correo electrónico de 100 palabras, puede consumir el equivalente a **500 ml de agua**, una cifra alarmante en contextos de estrés hídrico.

Además, la descarga de agua caliente en cuerpos acuáticos genera **contaminación térmica**, afectando los ecosistemas locales. Las regiones áridas, donde el enfriamiento es más demandante, soportan una carga desproporcionada de este impacto ambiental.

Soluciones para mitigar el impacto ambiental

1. Optimización de modelos

Técnicas como compresión de **modelos y distilación de conocimiento** permiten reducir el tamaño y la complejidad de los sistemas sin comprometer su rendimiento. Esto puede disminuir el consumo energético hasta en un **40%**. Además, estrategias como early stopping y aprendizaje transferido optimizan los recursos computacionales y reducen los tiempos de entrenamiento.

2. Energía renovable y almacenamiento

La adopción de **energías limpias** y tecnologías de almacenamiento eficiente es clave para reducir las emisiones. Microsoft está explorando **microreactores nucleares**, mientras que Google ha implementado centros de datos con **energía renovable** en regiones como Finlandia. Asimismo, soluciones innovadoras en refrigeración, como el uso de líquidos dieléctricos y aguas residuales tratadas, reducen el consumo hídrico y energético.

3. Economía circular y gestión de residuos

La reutilización y el reciclaje de hardware permiten recuperar materiales como cobalto y litio, reduciendo la extracción de recursos. Diseños modulares y programas de reacondicionamiento prolongan la vida útil de dispositivos, cerrando el ciclo productivo y minimizando el e-waste.

4. Sobriedad digital y Green IT

El desarrollo de aplicaciones eficientes y el uso de metodologías **Green IT** son cruciales para minimizar el impacto. Optimizar códigos, comprimir datos y adoptar interfaces más ligeras permite reducir la demanda de recursos computacionales y extender la vida útil de los dispositivos.

5. Gestión sostenible del agua

Implementar tecnologías como refrigeración líquida directa y redistribuir la carga de trabajo a centros en regiones con mayor disponibilidad hídrica puede aliviar el impacto. Compromisos como los de Microsoft, que busca ser “positivo en agua” para **2030**, establecen un precedente importante.

Conclusiones

La IA tiene el potencial de revolucionar múltiples sectores y ofrecer soluciones innovadoras a los desafíos climáticos globales. No obstante, si no se implementan prácticas sostenibles de manera inmediata, su impacto ambiental podría socavar sus beneficios. La optimización de modelos, la adopción de energías renovables, la economía circular y la sobriedad digital son estrategias clave para garantizar que la IA no solo minimice su huella, sino que también contribuya a un futuro más sostenible.

Bibliografía

- Dylan Patel, Daniel Nishball, y Jeremie Eliahou Ontiveros. AI Datacenter Energy Dilemma - Race for AI Datacenter Space: Gigawatt Dreams and Matroiyshka Brains Limited by Datacenters Not Chips. SemiAnalysis, 13 de marzo de 2024. Recuperado de <https://www.semi-analysis.com/articles/ai-datacenter-energy-dilemma>. Accedido el 16 de diciembre de 2024.
- International Energy Agency. Electricity 2024: Analysis and Forecast to 2026. 2024. Recuperado de <https://iea.blob.core.windows.net/assets/18f3ed24-4b26-4c83-a3d2-8a1be51c8cc8/Electricity2024-Analysisandforecastto2026.pdf>. Accedido el 16 de diciembre de 2024.
- IEA Study Sees AI, Cryptocurrency Doubling Data Center Energy Consumption by 2026. Data Center Frontier, 9 de marzo de 2024. Recuperado de <https://www.datacenterfrontier.com/iea-study-sees-ai-cryptocurrency-doubling-data-center-energy-consumption-by-2026>. Accedido el 16 de diciembre de 2024.
- Microsoft Corporation. How Can We Advance Sustainability? 2024 Environmental Sustainability Report. 2024. Recuperado de <https://www.microsoft.com/sustainability-report-2024>. Accedido el 16 de diciembre de 2024.
- Ben Gomes y Kate Brandt. Our 2024 Environmental Report. Google Blog, 2 de julio de 2024. Recuperado de <https://blog.google/outreach-initiatives/sustainability/2024-environmental-report/>. Accedido el 16 de diciembre de 2024.

Sobre los autores

Esta sección fue redactada por el Sustainable Business Studio de Globant, un equipo dedicado a promover la transformación sostenible en las empresas por medio de la innovación tecnológica. A través de soluciones

innovadoras en ESG, como la consolidación de datos, estrategias de gobernanza, gemelos digitales y cálculos de huellas de carbono, el Studio ayuda a las organizaciones a reducir su impacto ambiental, mejorar la eficiencia y avanzar en los objetivos de sostenibilidad alineados con la Agenda 2030.

Globant desarrolla productos digitales innovadores que conectan negocios y consumidores, transformando organizaciones a través de tecnología, creatividad e inteligencia artificial. Con presencia en 34 países y más de 29,900 empleados, colabora con líderes globales como Google y Santander. Reconocida por su liderazgo en IA y experiencia del cliente, es miembro de iniciativas como The Green Software Foundation y el Cybersecurity Tech Accord.

04

Futuro de la IA y Cambio Climático



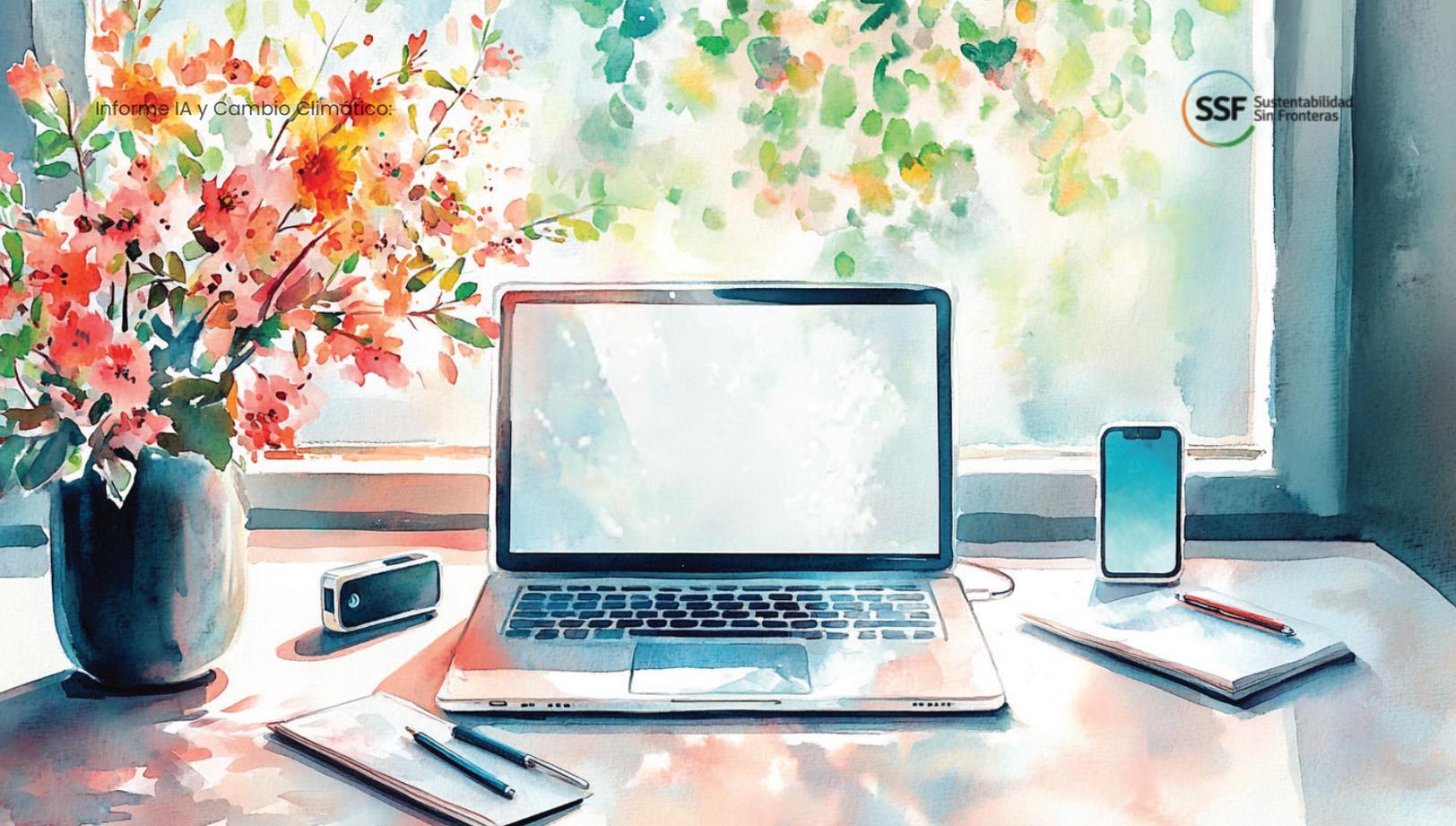
Globant

A continuación, se presentan algunas de las áreas clave en las que la IA está configurando el futuro de la sostenibilidad climática, junto con ejemplos prácticos de su aplicación.

Una de las áreas clave es la creación de sistemas de **Agentes de AI para la acción climáticas**, diseñados para automatizar tareas específicas para el clima. Estos agentes pueden actuar en sectores como la agricultura y la gestión de desastres implementando sistemas de riego inteligentes que ajustan el suministro de agua en función de datos climáticos en tiempo real, optimizando recursos y reduciendo emisiones. En la gestión de desastres, agentes inteligentes pueden monitorear condiciones climáticas extremas a través de sensores IoT y emitir alertas tempranas, mejorando la capacidad de respuesta y minimizando daños.

La gobernanza y la ética en la IA son esenciales para garantizar que su implementación no agrave desigualdades existentes ni cause impactos adversos. La **IA ética** implica desarrollar sistemas transparentes, responsables y equitativos, capaces de priorizar la sostenibilidad y el bienestar colectivo. Por ejemplo, un sistema de IA utilizado para la planificación urbana puede diseñar infraestructuras resilientes para proteger a comunidades vulnerables, asegurando que los recursos y beneficios sean distribuidos de manera justa. Asimismo, marcos regulatorios éticos pueden garantizar que las decisiones tomadas con ayuda de IA en la gestión de recursos hídricos no exacerben tensiones sociales ni económicas.

La sostenibilidad digital en la **cadena de valor de la IA** abarca desde el diseño de modelos más eficientes hasta su implementación responsable. Minimizar el consumo energético durante el entrenamiento y la operación de los modelos es fundamental. Esto puede lograrse mediante el uso de presupuestos de carbono que limiten el impacto ambiental y la adopción de prácticas como el desarrollo de modelos más pequeños que consuman menos energía. Además, la operación sostenible de estos sistemas implica el uso de energía



renovable en los centros de datos y la optimización de recursos. Al final del ciclo de vida, el desmantelamiento responsable del hardware utilizado en IA es igualmente crítico, asegurando la recuperación de materiales valiosos y reduciendo la generación de residuos electrónicos.

Los **gemelos digitales** representan una herramienta innovadora que permite simular y optimizar operaciones en tiempo real a través de réplicas virtuales de sistemas físicos. Estos modelos virtuales amplifican las capacidades predictivas y de respuesta de la IA. Por ejemplo, un gemelo digital de una ciudad puede simular la implementación de políticas de transporte sostenible o evaluar el impacto de sistemas de energía renovable en la reducción de emisiones. En la agricultura, un gemelo digital de un campo puede predecir la productividad de cultivos, optimizar el uso de fertilizantes y minimizar las emisiones asociadas con las prácticas agrícolas.

El concepto de **AI-Powered Ecosystems** propone la creación de ecosistemas completamente gestionados por IA, donde múltiples sistemas interconectados optimicen procesos complejos de manera autónoma y sostenible. Esto incluye desde la gestión de redes eléctricas inteligentes que equilibran la oferta y la demanda en tiempo real, hasta sistemas de gestión de residuos que clasifican automáticamente materiales reciclables, maximizando la eficiencia y reduciendo las emisiones. Estos ecosistemas prometen transformar sectores clave mediante la integración de soluciones avanzadas impulsadas por IA.

La integración de la IA con dispositivos del **Internet de las Cosas (IoT)**, como satélites, sensores y drones, expande significativamente las posibilidades de monitoreo y análisis integradas en tiempo real. Esta

combinación de tecnologías permite recopilar datos detallados y precisos para la toma de decisiones informadas. Por ejemplo, los drones equipados con IA pueden monitorear áreas de deforestación, proporcionando información crítica para la conservación del medio ambiente. De manera similar, sensores IoT conectados a sistemas de IA pueden medir la calidad del aire y del agua en áreas urbanas, ayudando a implementar políticas sostenibles más efectivas.

Sobre los autores

Esta sección fue redactada por el Sustainable Business Studio de Globant, un equipo dedicado a promover la transformación sostenible en las empresas por medio de la innovación tecnológica. A través de soluciones innovadoras en ESG, como la consolidación de datos, estrategias de gobernanza, gemelos digitales y cálculos de huellas de carbono, el Studio ayuda a las organizaciones a reducir su impacto ambiental, mejorar la eficiencia y avanzar en los objetivos de sostenibilidad alineados con la Agenda 2030.

Globant desarrolla productos digitales innovadores que conectan negocios y consumidores, transformando organizaciones a través de tecnología, creatividad e inteligencia artificial. Con presencia en 34 países y más de 29,900 empleados, colabora con líderes globales como Google y Santander. Reconocida por su liderazgo en IA y experiencia del cliente, es miembro de iniciativas como The Green Software Foundation y el Cybersecurity Tech Accord.

05

Conclusión



Globant

La IA, en realidad, no es una tecnología nueva. Reúne una serie de disciplinas que se han venido desarrollando y utilizando durante décadas. Sin embargo, su crecimiento exponencial en los últimos años, impulsado por la masificación de los lenguajes de procesamiento natural, ha democratizado su acceso y ha generado una percepción de novedad. Esta accesibilidad nos ha permitido interactuar y conversar con las máquinas de manera más natural e intuitiva, como si se tratara de una conversación humana, pero es importante recordar que estamos presenciando el resultado de décadas de desarrollo acumulado.

Este auge, potenciado por las inversiones en proyectos de IA, está acelerando su desarrollo a un ritmo sin precedentes. No solo el ecosistema emprendedor, sino también las grandes empresas, están explorando ideas y posibles aplicaciones de la IA en todas las áreas de la economía, buscando integrar en sus operaciones, elevar su productividad, y encontrar soluciones a diversos desafíos que enfrenta la humanidad, entre ellos, la crisis climática. Por lo tanto, es momento de reflexionar sobre las implicancias de esta tecnología y definir cómo abordarla estratégicamente y responsablemente para que su impacto sea positivo.

Esta tecnología está transformando radicalmente la forma en que trabajamos, aprendemos y nos comunicamos, difuminando la frontera entre lo humano y lo tecnológico. Sin embargo, este cambio vertiginoso no debe hacernos ignorar aspectos fundamentales. Es esencial mantener una mirada crítica y reflexiva sobre su desarrollo e implementación.

La relación entre la IA y el cambio climático es compleja y multifacética. La IA no es una solución mágica, como tampoco lo son las energías renovables o el hidrógeno verde. No existen soluciones mágicas; cada tecnología tiene un costo e impacto. El desafío reside en analizarlos y optar por la opción más eficiente en el contexto actual.

En este sentido, la problemática del cambio climático se caracteriza por su complejidad, representa desafíos sociales, económicos, políticos, educativos y de implementación. Esta multiplicidad de factores dificulta la alineación de voluntades y la ejecución de planes de acción. La COP29, una vez más, dejó pasar la oportunidad de impulsar la implementación de la IA en acciones climáticas concretas. Esto resulta especialmente preocupante en un contexto donde el cumplimiento de los objetivos del Acuerdo de París se vuelve cada vez más complejo y distante. La IA puede ayudarnos a repensar enfoques y ejecutar tareas complejas o que hemos pasado por alto. Con su capacidad de aprendizaje y análisis, podría ser la clave.

Sin embargo, debemos ser conscientes de que la IA opera de manera distinta a los humanos. Si bien esto es beneficioso, implica el riesgo de que utilice métodos inesperados con resultados no deseados. Es nuestra responsabilidad definir los objetivos, variables y límites éticos, diseñando responsablemente los “prompts”¹ para guiar su aplicación hacia la acción climática efectiva.

Utilizada responsable y éticamente, puede ser crucial para afrontar los desafíos del cambio climático. Para ello, es esencial una gobernanza proactiva que promueva su uso responsable mediante marcos regulatorios que aseguren la distribución justa y equitativa de sus beneficios.

La historia nos revela la dualidad inherente a toda tecnología, capaz de generar tanto beneficios como perjuicios a la humanidad. La decisión de cómo utilizar la IA recae en nosotros. Debemos ser conscientes de que mal utilizada tiene un enorme potencial para intensificar problemas como la desinformación, la polarización social y la concentración del poder, así como un impacto ambiental significativo. Una gestión responsable es crucial para evitar el consumo desproporcionado de recursos.

Sin embargo, la IA también ofrece oportunidades sin precedentes para acelerar la acción climática. Su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos, identificar patrones y generar predicciones la convierte en un aliado estratégico para la mitigación, adaptación y resiliencia. Del informe surge que ya nos está ayudando a desarrollar sistemas de alerta temprana, monitorear datos climáticos, optimizar el consumo energético, facilitar la integración de energías renovables, impulsar la agricultura de precisión, y mucho más. Cientos de empresas lo están implementando y se pueden evidenciar los primeros resultados. Para que la IA pueda contribuir de manera efectiva a la sostenibilidad, es fundamental abordar sus propios impactos ambientales. El desarrollo de modelos de IA cada vez más complejos exige un consumo energético considerable, lo que plantea la necesidad de transitar hacia una infraestructura energética más limpia y optimizar los modelos para que sean más eficientes. También, su desarrollo deberá promover una gestión responsable de los recursos, incluyendo el agua y los materiales utilizados en la fabricación de hardware, para minimizar su huella ambiental. Solo a través de un enfoque holístico que considere tanto las oportunidades como los desafíos, podremos asegurar que la IA se convierta en un motor de progreso sostenible.

¹ Los prompts en IA son las instrucciones o entradas dadas a un modelo de IA para guiar su salida, ayudándolo a generar respuestas, contenido o realizar tareas basadas en el contexto proporcionado

En definitiva la efectividad de la IA depende de cómo se diseñe, implemente y gobierne, debemos forjar un futuro donde la IA sea una fuerza impulsora hacia la sostenibilidad. Resulta imposible predecir con certeza su desarrollo a largo plazo, pero sí podemos aprender de las lecciones del pasado. La clave reside en un diseño responsable, una implementación ética y una gobernanza que priorice el bien común.

No podemos permitirnos ignorar los riesgos, idealizar sus posibilidades, ni prescindir de ella. La IA es una herramienta poderosa, pero su éxito depende de nuestra capacidad para guiar su desarrollo. Asumamos la responsabilidad que nos corresponde, construyamos un futuro donde la IA sea un motor de progreso sostenible, un futuro donde la tecnología sea una herramienta clave para la acción climática y la regeneración.