

Una hoja de ruta para la innovación en tiempos complejos

Coordinador **Javier García Martínez**



Índice



Entrevistas

Pag. 10

00.

Una hoja de ruta
para la innovación en
tiempos complejos

Pag. 20

01.

Materiales abundantes
por materias primas
críticas

Pag. 38

02.

Sistemas de Salud
gestionados por
inteligencia artificial

Pag. 74

03.

Energía nuclear más
allá del uranio

Pag. 110

04.

Nuevas tecnologías de
diagnóstico: biosensores,
wereables e implantables

Pag. 144

05.

La 'tercera vía' de la
algoritmia cuántica

Pag. 180

06.

La biotecnología en
alimentación como
sistema de defensa

Pag. 212

07.

El vehículo autónomo
toma el control del
volante

Pag. 248

08.

Inteligencia artificial
en el descubrimiento
de antibióticos

Pag. 288

09.

Las carrera tecnológica de
la observación geoespacial

Pag. 324

10.

Redes eléctricas
seguras e inteligentes

Pag. 364

Javier García Martínez



Un año más, 2025 nos sitúa en un momento de creciente incertidumbre en el que España atraviesa una etapa de transformación acelerada, marcada por la convergencia de retos complejos como la transición energética, la expansión imparable de la inteligencia artificial, las tensiones geopolíticas que reconfiguran mercados y alianzas; y los profundos cambios en el empleo, la educación y la competitividad industrial. Desde la publicación del último informe, el país ha sufrido dos desastres medioambientales de enorme magnitud: la dana de octubre de 2024 y los incendios de agosto de este año, que arrasaron más de 300.000 hectáreas. Vivimos un tiempo en el que el riesgo se ha convertido en norma, las certezas se desvanecen y la velocidad de los acontecimientos exige actuar con criterios firmes, información contrastada y una valentía sostenida.

En este contexto, la Cátedra de Ciencia y Sociedad de la Fundación Rafael del Pino se ha consolidado como un espacio de diálogo y prospectiva, nacido de la convicción de que la ciencia y la innovación son herramientas esenciales para el progreso económico, social y democrático de España. Nuestro propósito es tender puentes entre el conocimiento científico, la iniciativa empresarial y la toma de decisiones públicas, y para ello cada año elaboramos una hoja de ruta que nos permita prepararnos mejor para el futuro y diseñar mejores estrategias. El Informe INTEC (Informe de Tecnologías Emergentes para España) es la expresión más visible de este compromiso: un ejercicio anual de selección, análisis y comunicación de aquellas tecnologías que, por su madurez, su potencial transformador y ajuste con nuestro sistema productivo, pueden convertirse en motores de desarrollo a corto y medio plazo.

La selección de las diez tecnologías emergentes que presentamos en cada edición es el resultado de un proceso riguroso en el que nuestro comité de expertos identifica, valora y selecciona las tecnologías que forman parte de nuestro informe. Para ello, cada año analizamos decenas de propuestas, evaluamos su estado de desarrollo científico, su viabilidad industrial, su impacto social y ambiental, y su capacidad para fortalecer el tejido productivo español. No buscamos los descubrimientos más llamativos ni las modas pasajeras, sino aquellas soluciones capaces de responder a los desafíos reales de nuestro país, de crear empleo de calidad y mejorar la competitividad y diversidad de nuestra economía.

Este año, el recorrido nos lleva desde los algoritmos cuánticos, que abren nuevas fronteras en el campo del cálculo, la criptografía y la simulación de materiales, hasta la bioingeniería de nutrientes, clave para garantizar la seguridad alimentaria en un mundo de recursos limitados; desde los biosensores, que permiten diagnósticos clínicos y medioambientales rápidos y descentralizados, hasta las aplicaciones de inteligencia artificial en sanidad y en el descubrimiento de antibióticos, esenciales para mejorar la salud pública y frenar la resistencia microbiana; desde la explotación sostenible de materiales críticos, imprescindibles para la industria tecnológica, hasta las promesas de la energía nuclear sin uranio y los avances en redes eléctricas inteligentes que facilitan la integración de las energías renovables. Por úl-

timo, abordamos las tecnologías geoespaciales, que combinan satélites, big data e inteligencia artificial para gestionar recursos y anticipar riesgos.

Cada capítulo de este informe presenta la tecnología, analiza su viabilidad económica y social, y ofrece ejemplos concretos de empresas, startups y centros de investigación que ya están trabajando en ella. Este análisis detallado se enriquece con datos de múltiples fuentes, estudios de organismos internacionales, así como tablas y figuras que facilitan la comprensión. Pero el aporte más valioso son las entrevistas a expertos de primer nivel, que iluminan las implicaciones humanas, éticas y estratégicas de estos avances. En la edición de este año, contamos con voces autorizadas y claras que nos dan guía y perspectiva. Así, Helena Herrero nos recuerda que la gran tarea de Europa es “ser realmente Europa”, construyendo un espacio de innovación que preserve la privacidad y los valores comunes; Laura Lechuga alerta sobre la pérdida de vocaciones científicas y la necesidad de primar la excelencia y crear masa crítica; Manuel de León reclama blindar las políticas científicas frente a los vaivenes políticos para garantizar una estrategia a largo plazo, y Pablo Artal comparte las dificultades y el valor de emprender en ciencia en un entorno que todavía penaliza la audacia. Sus reflexiones, profundas y a menudo provocadoras, sitúan la tecnología en el marco más amplio de la sociedad que queremos construir y enriquecen de manera extraordinaria este informe.

Por eso quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Comité de Expertos de la Cátedra, cuya experiencia, criterio y generosidad son el alma de este proyecto. No tengo palabras para expresar mi agradecimiento por el tiempo y el compromiso de este grupo de personas que nos ayudan a evaluar, analizar y seleccionar las tecnologías que presentamos en este informe. Por supuesto, no puedo sino agradecer a Eugenio Mallol, Fernando Gomollón y, este año, también a XXX, por hacer posible este informe y por convertir datos y tendencias en un relato apasionante. Como todos los años, quiero reconocer el extraordinario trabajo que lleva a cabo Germinal. Su equipo creativo ha vuelto a demostrar que el diseño no es algo accesorio ni decorativo, sino una de las formas más efectivas y directas de transmitir los complejos conceptos de las tecnologías que presentamos. Gracias a sus infografías, esquemas y recursos visuales, las ideas resultan más sencillas y los números cobran vida. Gracias a su trabajo, el informe es mucho más comprensible y atractivo para todo tipo de públicos.

Pero mi agradecimiento más sentido es, cómo no, para la Fundación Rafael del Pino, que es la que hace que esta cátedra sea posible gracias a su apoyo continuado y generoso. Gracias a María del Pino y a Ana Cebrián del Pino por apostar sin reservas por este proyecto y por la ciencia como palanca de progreso. En particular, quiero expresar mi gratitud también a Vicente Montes, cuyo compromiso sostenido con esta cátedra ha permitido que esta iniciativa crezca año tras año hasta convertirse en una referencia. También quiero dar las gracias a Carlota Taboada, que hace que lo difícil sea fácil y que nos ayuda año tras año a elaborar un informe útil y eficaz.

Y es que el INTEC 2025 no es solo un catálogo de tecnologías, sino fundamentalmente una invitación a la acción. Cada una de las innovaciones que aquí se describen encierra una oportunidad para mejorar la competitividad de la economía española, diversificar nuestro sistema productivo, crear empleo de calidad y proyectar una imagen de país que no teme al cambio, sino que lo lidera. Por eso, para convertir esta oportunidad en realidad es necesario talento, compromiso y políticas

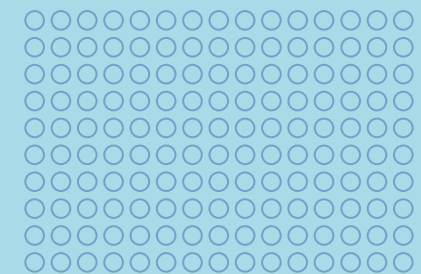
estables que apuesten por el conocimiento. Como bien señala Helena Herrero, la tecnología debe estar al servicio de las personas, no al revés. Ese es el espíritu que guía este informe: ofrecer información útil sobre tecnologías clave que mueva a la acción.

Espero que al leer este informe encuentres razones para imaginar, decidir y actuar. Porque el futuro de España se escribe donde se encuentran la ciencia, la empresa y la sociedad. Y porque, como nos recuerda la experiencia de estos años, la mejor manera de anticipar el mañana es atreverse a construir el futuro hoy.

00

Una hoja de ruta para la innovación en tiempos complejos

e



Introducción

Si se observa el momento actual a través de la lente que propone el profesor de la Universidad de Oxford Carl Benedikt Frey en su libro *How Progress Ends*, resulta complicado evitar la sensación de *déjà vu*. Sus páginas desafían la creencia convencional de que el progreso económico y tecnológico es inevitable. De hecho, durante la mayor parte de la historia de la humanidad, el estancamiento ha sido la norma y, al repasar por qué algunas sociedades prosperaron y otras fracasaron, a lo largo de los últimos 1.000 años, a raíz del rápido cambio tecnológico, Frey ve acreditada la existencia de una tensión recurrente en la historia: mientras la descentralización fomenta la exploración de nuevas tecnologías, la burocracia es crucial para escalarlas. Y cuando las instituciones no se adaptan al cambio, inevitablemente se produce el estancamiento, cuando no un notorio retroceso.

Asistimos a una dinámica contradictoria en nuestros días. Los avances tecnológicos y científicos exigen cada vez más capacidad de colaboración, tanto horizontal, entre distintos sectores, disciplinas y *stakeholders*; como vertical, entre todos los componentes de la cadena de valor. Desde las grandes corporaciones hasta las personas individuales que comparten su talento, pasando por las empresas del *middle market* y las pymes, la sociedad se compone de una gran variedad de nodos de especialización que pueden enriquecerse mutuamente. Sin embargo, el entorno institucional, sobre todo a raíz de la crisis de identidad de los países occidentales, promueve la fragmentación, la polarización y el aislamiento. Y si las instituciones no ayudan a escalar los avances de la innovación, el riesgo de atonía general se acrecienta, según la visión de Frey.

Hay, no obstante, una diferencia sustancial respecto a etapas anteriores, podría objetarse a su argumentación: los líderes de la industria tecnológica que impulsan la generación y aplicación del conocimiento tienen tal poder de iniciativa en la transformación de la economía y la sociedad, espollean y albergan de tal modo la investigación científico-tecnológica y controlan el flujo de

datos en tantos ámbitos y planos de la realidad, que la principal seña de identidad del Nuevo Orden al que nos dirigimos, si la dinámica actual persiste, probablemente no sea el estancamiento, sino el desacoplamiento cada vez mayor, en el plano estratégico, entre el sector público y el privado. Desglobalizado el primero, con el recurso de la fuerza todavía en sus manos, pero una deuda creciente; globalizado el segundo, dominador del capital, pero sometido a la ley allí donde es operativo aplicarla.

El presente Informe INTEC 2025 pretende ser una hoja de ruta para aquellos que quieren transformar la sociedad con una visión integradora, en beneficio de los ciudadanos en esta época de confusión. Hoy, el único propósito viable discurre por el camino de la colaboración, la alternativa es un darwinismo social en sus múltiples acepciones, ya sea capitalista, ya estatalista, ya producto de la desinstitucionalización. Esa realidad acabará imponiéndose necesariamente, porque el efecto transformador del nuevo ciclo de la inteligencia artificial (IA) y de los avances en nuevos materiales, asistencia en salud, tecnologías geoespaciales o redes eléctricas inteligentes, asuntos todos ellos presentes en este trabajo, sólo puede producirse si se actúa con visión de ecosistema, integrando a todos los actores de la cadena de valor. Estén donde estén.

La resolución de este desafío condicionará directamente en la vida individual de las personas. Philippe Aghion, profesor del College de France y de la London School of Economics, vaticina un crecimiento de la productividad gracias al nuevo ciclo de la IA que se situará entre los 1,3 puntos de la revolución eléctrica y los 0,8 de la revolución digital durante los próximos diez años. De resultas de ello, se consolidará una nueva economía intangible, caracterizada por un incremento de la PTF (productividad total de los factores) desigual, repleto de limitaciones y no necesariamente equilibrado. En esas circunstancias, la competencia entre territorios por sacar el máximo partido a la nueva tecnología será feroz. Sólo saldrán reforzados aquellos capaces de adaptar sus instituciones a esa nueva economía intensiva en intangibles. Aquellos aprendan a promover estrategias integradas en las que colaboren todos los actores público-privados.

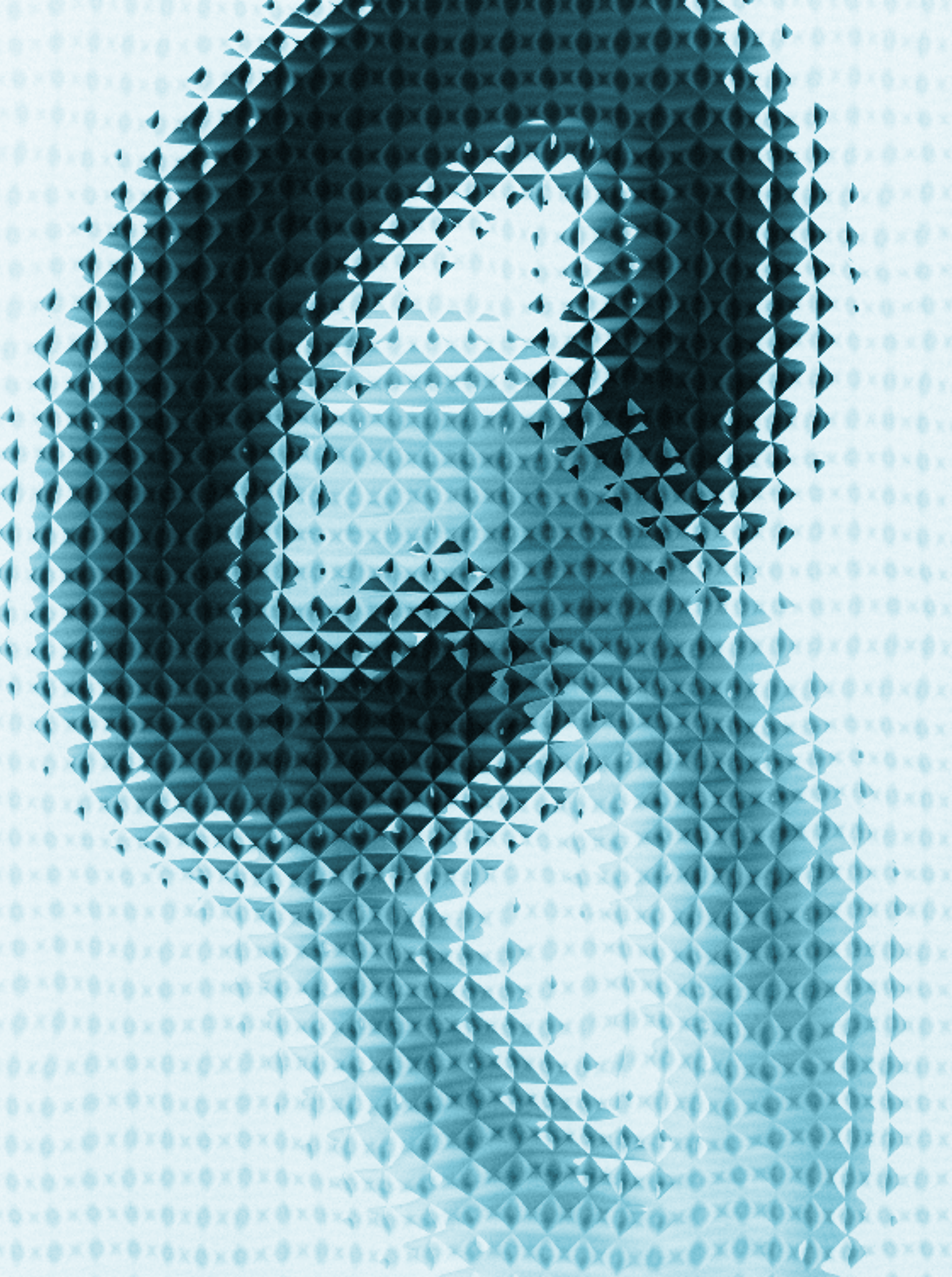
El Premio Nobel Daron Acemoglu ha calculado que, con los costes actuales, en EEUU sería rentable automatizar

el 23% de las tareas en las que interviene el factor visual. Un experimento en el MIT sobre el impacto de ChatGPT estima que puede producir un ahorro de costes del 27%. Sin embargo, esos incrementos en productividad no están trasladándose a los sueldos. La OCDE ha confirmado la desaceleración del crecimiento salarial medio en relación con la productividad agregada, un fenómeno que se conoce como disociación entre productividad y salarios.

La transición laboral en la que estamos inmersos podría tildarse de histórica cuando se analice con perspectiva. Un pequeño conjunto de empresas, que denomina «superestrella», dispone de una posición dominante en el mercado. Ese estatus las protege cada vez más de la competencia, gracias a la combinación de alta productividad, altos márgenes y una plantilla polarizada entre altas y bajas rentas del trabajo. La OCDE alerta de la divergencia de productividad: crece en los sectores de frontera tecnológica y se estanca o apenas avanza en el resto. La robotización está reduciendo los salarios relativos de los trabajadores en los deciles medios de la distribución salarial ocupacional y el contenido de las tareas del trabajo es cada vez menos fijo, al igual que la asignación de tiempo a cada una de ellas. El Foro Económico Mundial (WEF)¹ detecta una transición rápida y creciente hacia empleos en el ámbito de los servicios empresariales (las más habituales en España), en puestos como analista de negocios y representante de ventas, y hacia los empleos digitales, como el de desarrollador de software, generalmente a costa de ocupaciones técnicas de nivel inferior. Lo relevante es que, según la visión del Foro, lo característico de esta época es que las transiciones laborales han dejado de producirse “naturalmente”.

Mercer Marsh Benefits y la Reward and Benefits Association (REBA) coinciden en que, para reequilibrar el mercado, será imprescindible desarrollar personas y talentos que posean las habilidades adecuadas para la nueva economía intangible. Ese es probablemente el riesgo más importante para los empleadores en este momento: el 23% de los puestos de trabajo habrán cambiado en 2027, según el WEF, con 69 millones nuevos empleos y 83 millones de los existentes desplazados. Todo ello, en un contexto de enorme subutilización laboral, con una brecha de empleo global que supera ya el 11% y con aproximadamente el 20% de los jóvenes (de 15 a 24 años) sin ocupación, educación ni formación, según la Organización Internacional del Trabajo (OIT).

Incluso los recién graduados de carreras tecnológicas están topándose con dificultades y representan ahora apenas el 7% de las contrataciones de las grandes compañías². Si éstas fichan a un 25% menos de personal joven que en 2023, las empresas emergentes van incluso peor, sólo el 6% de sus nuevos empleados son recién graduados. El contexto de inestabilidad política e intensa rivalidad por la IA, unidos a la contracción del capital riesgo, está provocando que las nuevas empresas tecnológicas de Serie A sean un 20% más pequeñas que en 2020, y eso hace que opten por equipos cada vez más reducidos y experimentados, acentuando así la tendencia.



El 44% de las competencias requeridas en un empleo determinado se transformarán en un período de cinco años. Es aconsejable llevar a cabo una planificación estratégica de la fuerza laboral y el desarrollo del talento que incorpore mecanismos de reasignación de puestos de trabajo más rápidos y eficientes, dentro y entre diferentes empresas y sectores. Directivos y gestores públicos tendrán la responsabilidad de ayudar a los trabajadores a abandonar sus ocupaciones en declive y ocupar los empleos en crecimiento del futuro. Se proponen, en ese sentido, nuevos sistemas de acreditación de competencias, más allá de los títulos académicos tradicionales. Credenciales que podrían basarse en una nueva taxonomía de habilidades estandarizada y que los profesionales podrían utilizar para moverse entre roles, sectores y regiones. Los gobiernos deben pensar también en políticas que equilibren la flexibilidad laboral con las protecciones y los beneficios de los trabajadores. En 2030, 92 millones de personas podrían trabajar completamente a distancia.

La capacidad de establecer redes de colaboración será clave para abordar los desafíos del nuevo empleo de modo que se refuerce la cohesión social y se impulse, al mismo tiempo, la productividad. Esa cooperación debe implicar a múltiples partes interesadas (*multistakeholders*), ya sean públicas y privadas, centros educativos y productivos, y se verá favorecida por los beneficios transferibles, que se trasladan con el trabajador de un puesto a otro.

El despliegue de la IA eleva esa la tarea de cohesionar la sociedad a través del empleo a una nueva dimensión. Dos años después del lanzamiento de ChatGPT, el número de ofertas de trabajo que pedían habilidades en IA se había duplicado. Una de las primeras preguntas que ha suscitado el nuevo ciclo de las tecnologías generativas es precisamente cómo determinar las ventajas de ser una persona frente a una máquina. Cada industria, banco, empresa de construcción, institución, hospital, universidad, ONG, cadena de retail y hasta servicio de transporte va a tener que decidir qué labores asigna a las personas y cuáles a los sistemas artificiales, y debe hacerlo con una urgencia nunca antes vista.

En el Foro de Davos de 2025, el presidente y CEO de Salesforce, Marc Benioff, proclamó: “este es un momento que ninguno de nosotros olvidará jamás. Vamos a ser los últimos CEO que gestionen sólo a humanos como fuerza laboral”. Apenas unos días antes, el fundador y CEO de Nvidia, Jensen Huang, había anunciado en el CES de Las Vegas la llegada del “momento ChatGPT de la robótica”. Tomará tres formas principalmente, según su visión: los agentes de IA, que denomina trabajadores de la información, capaces de moverse con libertad, aprender, analizar y tomar decisiones por sí mismos; los coches autónomos, a los que este informe dedica un capítulo; y los robots humanoides. Huang cree que las áreas de TI (tecnologías de la información) de cada empresa se convertirán en departamentos de *recursos humanos* de los agentes de IA en el futuro. La IA física podrá entender el lenguaje del mundo, desde la dinámica física a conceptos como la gravedad, la fricción y la inercia, las relaciones geométricas y espaciales, la causa y el efecto.

Inesperadamente, el elemento humano es el eslabón clave para extender la IA con éxito, pero el reparto de papeles entre las personas y las máquinas no lo va a resolver un equipo de tecnólogos de Silicon Valley. Cada organización deberá pensar qué quiere hacer, cuál es el resultado que busca y cómo se puede beneficiar del conjunto de tecnologías para hacerlo brindando un producto de mejor calidad. El nuevo imperativo empresarial es averiguar para qué necesitamos capacitarnos, la nueva brecha digital no será si tenemos un dispositivo o no, sino qué hacemos con él.

A medida que se emplea la tecnología, habrá que promover también un nuevo sentido de confianza y transparencia, porque la IA va a interactuar en nuestro nombre, pero de forma independiente de nosotros. Microsoft confía en que el 95% de su código sea generado automáticamente en 2030, un porcentaje similar al que manejan otras compañías como Google e IBM y han identificado consultoras como McKinsey y Accenture para el conjunto del sector tecnológico. A medida que los sistemas informáticos se vuelvan más sofisticados, crecerá la tendencia a valorar a los especialistas profundos en múltiples especialidades. Un trabajo de investigación reciente se centra, de hecho, en la pujante figura del ‘experto generalista’³.

Los nuevos sistemas basados en IA funcionan especialmente bien allí donde hay que tomar decisiones de manera precisa, ágil y en tiempo real. Son óptimos para situaciones dinámicas en las que se necesita actuar constantemente. En una etapa inicial, la forma de mejorar la IA generativa consistía en escalar su entrenamiento reuniendo el mayor volumen de datos posible. La siguiente oleada, en cambio, provocará sus mayores efectos en la actividad industrial y en el resto de actividades basadas en procesos, porque la investigación se ha dirigido a crear modelos de IA más pequeños y específicos, más eficientes y susceptibles de ser entrenados con casi cualquier modalidad de información, no sólo texto, imágenes y sonidos. Se habla, en ese sentido de los ‘retornos marginales a la inteligencia’, en un sentido similar al que los economistas utilizan para referirse a los rendimientos marginales del capital, del trabajo o de la tierra.

De nuevo, no es concebible emprender este camino con una visión fragmentada. La forma más rápida de avan-

zar en la IA generativa consiste en poner en común datos de diferentes sectores e incluso en compartirlos entre empresas competidoras. En el futuro, deberíamos poder formular una pregunta y que un conjunto de modelos de IA trabajen juntos para resolverla. El cambio de las reglas del juego en la automatización transformará un amplio abanico de modelos de negocio: del software como servicio, a la energía como servicio o la movilidad como servicio. La nueva filosofía está empujando ya a las empresas a unir sus fuerzas en plataformas de colaboración que confluyen en un medio inmersivo, diseñado por una computación híbrida, digital y física, en el que la realidad extendida (XR) podría ser parte de la constelación, junto a metaverso, blockchain, algoritmia cuántica e IA. Hasta ahora, se observaba cada esfera de ese ecosistema de forma aislada, sin que fuera posible componer la imagen general. La IA generativa era la pieza que faltaba.

La capacidad de colaboración marcará la frontera entre los ganadores y los perdedores en este nuevo contexto. Será clave contar con ecosistemas seguros que garanticen la integridad y el valor de la información, cadenas de suministro autónomas que procesen miles de millones de predicciones al día, adaptativas, en las que resulte complicado distinguir entre la actividad *online* y la física, en las que las partes estén interconectadas, sin fricción. Esto implica reimaginar el sistema completo, algo nunca hecho antes a esta escala. La incógnita no reside tanto en si la IA modificará el mundo empresarial como en quién logrará aprovecharla antes y mejor. En estas circunstancias, las empresas deben evitar que sus plantillas se dividan en trabajadores digitales y analógicos, y deberán asegurarse de educar a los consumidores para que aprendan a reconocer las posibilidades de la implementación de la IA en el futuro.

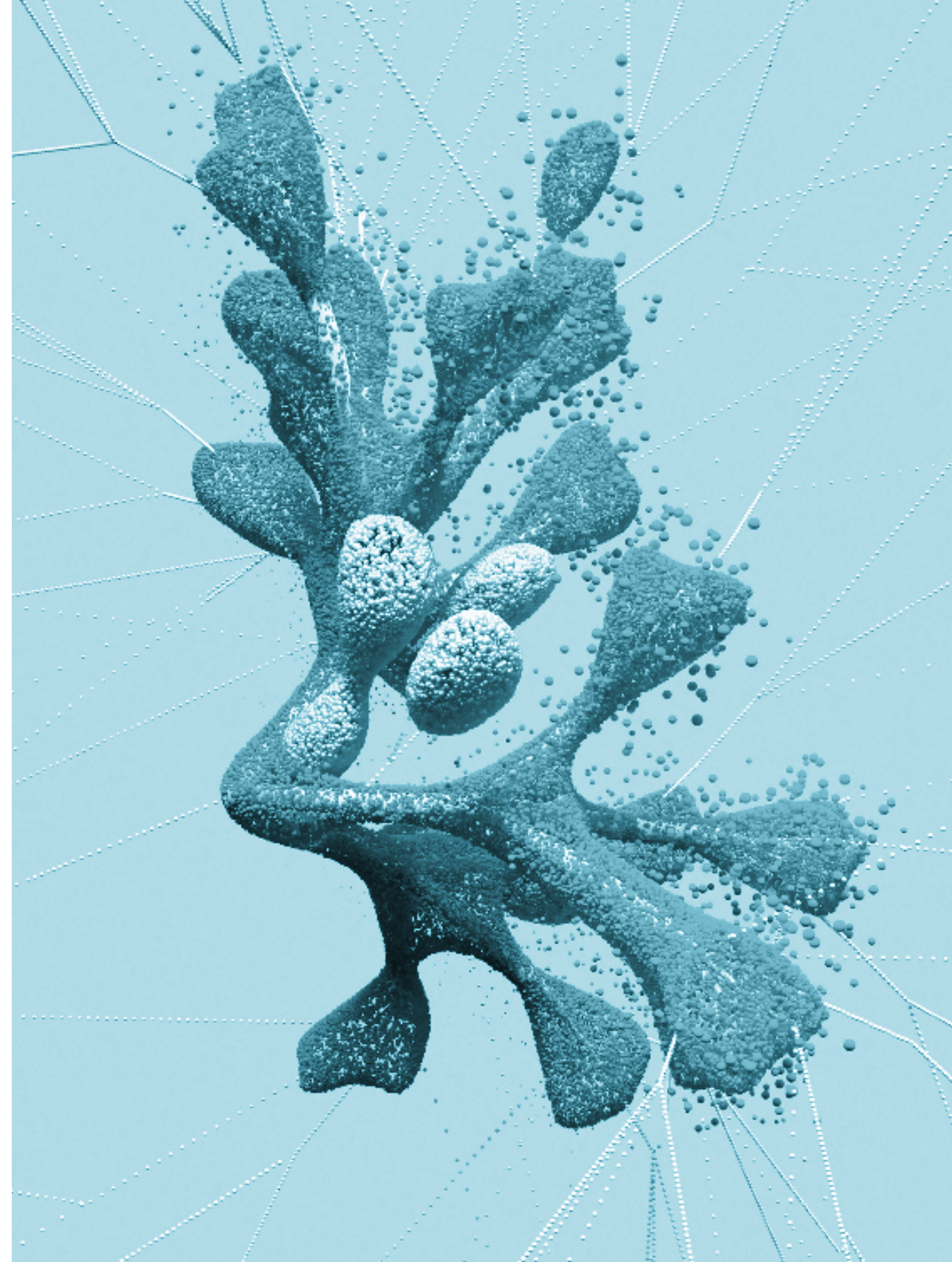
Los datos adquieren, por consiguiente, un nuevo valor. Se espera que la cantidad global de datos crezca de los 33 ZB de 2018 a 175 ZB al cierre de 2025, según el Data Age 2025 y la Global Big Data Analytics Data Guide, publicada por IDC. Más del 20% de ellos se transformarán en nuevos activos de datos, es decir, en factores de producción relevantes para el desarrollo económico y social. La profesora de la Columbia Business School Laura Veldkamp sostiene que los datos son “información digitalizada” y que su verdadero valor radica en reducir la incertidumbre en torno a una predicción, el terreno de juego en el que la IA muestra todo su potencial. De ahí la conexión entre las nuevas tecnologías y la gestión de la información. En última instancia, según Veldkamp, todo riesgo es “un impuesto a la economía”. Su propuesta más atrevida emerge al dar un paso más allá en el silogismo: “todas las ganancias de la recopilación de datos deberían repercutir en los consumidores en forma de precios más bajos”.

Boston Consulting Group cree que compartir datos con la competencia puede intimidar a los ejecutivos del sector industrial, pese a que los mayores desafíos a los que se enfrenta la economía “no se resolverán con una empresa trabajando sola y utilizando únicamente sus datos de propiedad exclusiva”. La consultora estima que el valor de la oportunidad de compartir

datos es del 2,5% del PIB mundial. Problemas complejos como la detección de fraudes o la optimización de la cadena de suministro se pueden abordar de forma más eficaz mediante la colaboración, compartiendo datos entre múltiples actores. Así lo hacen en Estados Unidos las aseguradoras de automóviles a través de la plataforma LexisNexis CLUE Auto; y en Europa, Airbus en el ecosistema digital *Skywise*. Los modelos conjuntos de IA destinados a ecosistemas empresariales, a sectores económicos o ámbitos de la Administración serán entrenados, cada vez más, por una única organización de confianza, encargada de recopilar los datos de cada empresa, sin que éstos salgan de sus instalaciones, y de configurar un modelo aprendizaje federado.

Siemens promueve una iniciativa de este tipo en torno a su LLM industrial y ha convencido ya a 60 empresas para que compartan sus datos a cambio de acceder en el futuro al modelo de IA resultante. La plataforma compartida MELLODDY ha sido desarrollada también por un consorcio europeo de diez compañías farmacéuticas con el objetivo de acelerar el descubrimiento de fármacos. Los Laboratorios de Datos, promovidos por la Unión Europea como componentes integrales de las futuras Fábricas de IA (una de las cuales se instalará en el Barcelona Supercomputing Center), están pensados para impulsar el suministro, puesta en común e intercambio seguro de información. Esos son también los principales objetivos de los Espacios Comunes de Datos europeos, aunque por ahora no hay forma de vencer a la fragmentación y ambos programas operan como ecosistemas distintos, cada uno con sus propias reglas de gobernanza, objetivos estratégicos, modelos de negocio y requisitos técnicos.

La necesidad de colaboración en la gestión de la información no se reduce al ámbito de la IA. En el sector del retail, cada vez son más las empresas partidarias de plataformas de orquestación que permitan cambiar dinámicamente entre múltiples proveedores de pago en tiempo real. Conforme se introduzca la identidad digital, que la Unión Europea quiere extender al 100% de los ciudadanos en 2030, tendrán más posibilidades de aplicación las soluciones de autenticación adaptativa. La experiencia de compra se podrá personalizar, a partir de entonces, según los perfiles de riesgo, lo cual obligará a los minoristas a integrarse con la solución de billetera móvil más adecuada para generar confianza en los clientes.



En el caso de las ciudades, la proliferación de herramientas tecnológicas que permiten capturar los datos multimedia que se generan en ellas abre una era de oportunidades nuevas para innovadores tecnológicos y gestores públicos. El concepto de urbanización computacional gana protagonismo como nuevo paradigma basado en el *big data* geográfico y en la IA. Ayudará a comprender problemas complicados relacionados con la dinámica urbana, el uso de la energía, los patrones de tráfico y los impactos ambientales. Aprovechar, asimismo, las capacidades de computación, almacenamiento en caché y comunicación de los vehículos conectados complementará en el futuro la red de telecomunicaciones de las ciudades. Permitirá habilitar numerosos servicios basados en la ubicación y a aumentar la inteligencia del entorno urbano, aplicando los principios de redes complejas y los enfoques de teoría de juegos. La Unión Europea impulsa la idea Citiverso, con agentes virtuales inteligentes que se comporten de forma compatible con los avatares digitales de los usuarios humanos. En una etapa posterior debería producirse la interconexión de los gemelos digitales en un CitiVerso europeo, dentro del marco Sociedad 5.0, pero la condición para ello es que el 100% de los ciudadanos de la UE dispongan de identidad digital en 2030.

Vistas las posibilidades que abre la colaboración gracias a las nuevas tecnologías, las dinámicas de fragmentación parecen responder a una inútil asincronía. Resulta paradójico, por ejemplo, que el sector tecnológico se esté debatiendo hoy en día entre la posibilidad de un internet apadrinado por EEUU, de adscripción libre casi absoluta, y el que promueve China, que requiere aprobación previa. La novedad no es ya que países como Rusia, Turquía e incluso Brasil estén valorando pasarse al modelo chino, sino que en Occidente se analice la posibilidad de exigir licencias para tener una web activa, al igual que en la radio, como plantea Francia. En su compleja deriva, la batalla de los aranceles ha propiciado la aparición de la herramienta *online* TARIFF, que permite imponer tasas de importación a los paquetes de Python, un lenguaje de programación muy habitual.

Uno de los efectos indeseados de esta contradicción entre las fuerzas globalistas y las divisorias que estresan a la sociedad es que, a mediados de 2025, la burbuja de la IA era ya mayor que la burbuja tecnológica de

las puntocom de finales de los años 90, según Apollo. En ese contexto de incontenida expansión de la tecnología son concebibles centros de datos convencionales centrados en la IA con consumos de electricidad equivalentes a 100.000 hogares. Y se están construyendo complejos significativamente mayores actualmente, que necesitan 20 veces más energía (la mitad que la ciudad de Madrid cada uno de ellos)⁴, y es sólo el principio. Resulta ilusorio concebir una expansión de las infraestructuras de procesamiento de la IA sin adaptar la red eléctrica, los sistemas de generación y los espacios donde se implantarán, como se analiza en uno de los capítulos del presente informe. A finales de la actual década, EEUU destinará más electricidad a los centros de datos que a la producción de aluminio, acero, cemento, productos químicos y todos los demás bienes de alto consumo energético juntos.

La hoja de ruta en tiempos de incertidumbre es la colaboración. El informe INTEC 2025 aborda en profundidad el potencial de desarrollo de 10 ámbitos tecnológicos clave, en los que España puede posicionarse con voz propia todavía, porque se encuentran en un punto emergente y las barreras de entrada no son todavía excluyentes. Hemos aplicado en la elaboración de los textos, el principio de exponer las oportunidades que ofrece la actuación concertada. En el caso de la IA para mejorar los sistemas de salud, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima un déficit mundial de 10 millones de trabajadores médicos en 2030, aunque otras previsiones aumentan esa cifra hasta los 15 millones. Los gastos mundiales de atención médica equivalen ya a todo el PIB de la Unión Europea y en 2025 el sector moverá un volumen de datos superior a los 10 zettabytes, es decir, 10 billones de gigabytes. De modo que sí, la generalización de la sanidad inteligente debería ser imperativa. Capítulo aparte merece la realidad de la investigación para el descubrimiento de antibióticos, especialmente si se considera el hecho de que no se ha registrado ninguna nueva familia de antimicrobianos desde los años 80.

Los coches autónomos circulan ya por ciudades de Estados Unidos y China, aunque están sometidos todavía a férreas trabas regulatorias: deben moverse por zonas prescritas, en las que han sido ampliamente entrenados. Europa se mantiene firme al respecto, pese a que los vehículos autónomos de Waymo tienen un 78% menos de accidentes causantes de lesiones que el conductor humano y un 81% menos de accidentes por airbag. En el caso de los biosensores, se requiere la colaboración de un amplio abanico de industrias para hacer realidad la monitorización permanente, desde las que innovan en materiales como la microelectrónica y las baterías. La disponibilidad de datos geoespaciales incidirá en el desarrollo de la agricultura, la eficiencia en el uso de recursos y la gestión energética, entre otras muchas aplicaciones. La biotecnología permitirá que la alimentación y el suministro de materias primas no sea un punto de potencial vulnerabilidad de las sociedades que las haga menos seguras.

La vertiente de las posibilidades tecnológicas alternativas a las actuales abre un campo muy interesante para la innovación. En el informe hemos es-



cogido ámbitos como el de los nuevos materiales abundantes capaces de producir efectos similares a los de las materias primas críticas; las opciones de energía nuclear sin uranio, con el torio como opción realista sobre la mesa; y la algoritmia cuántica, que permite optimizar procesos con la eficiencia de la computación cuántica sobre ordenadores convencionales.

La innovación sólo despliega todo su potencial transformador cuando se utiliza como factor de cohesión. Está demostrado que las dinámicas de fragmentación, en especial las que se promueven desde las nuevas formas de populismo cuya presencia se expande por Europa, reducen la actividad innovadora de los territorios⁵ y condicionan la capacidad de colaboración de su tejido científico-tecnológico. La transición en el empleo y las nuevas formas de operar que introduce la IA obligan a integrar a las áreas de las organizaciones, construir ecosistemas con el resto de actores de la cadena de valor, compartir datos tanto con el sector público como con el privado y concertar estrategias. En este informe identificamos espacios de oportunidad para los innovadores, claves para una hoja de ruta.

Relación de notas

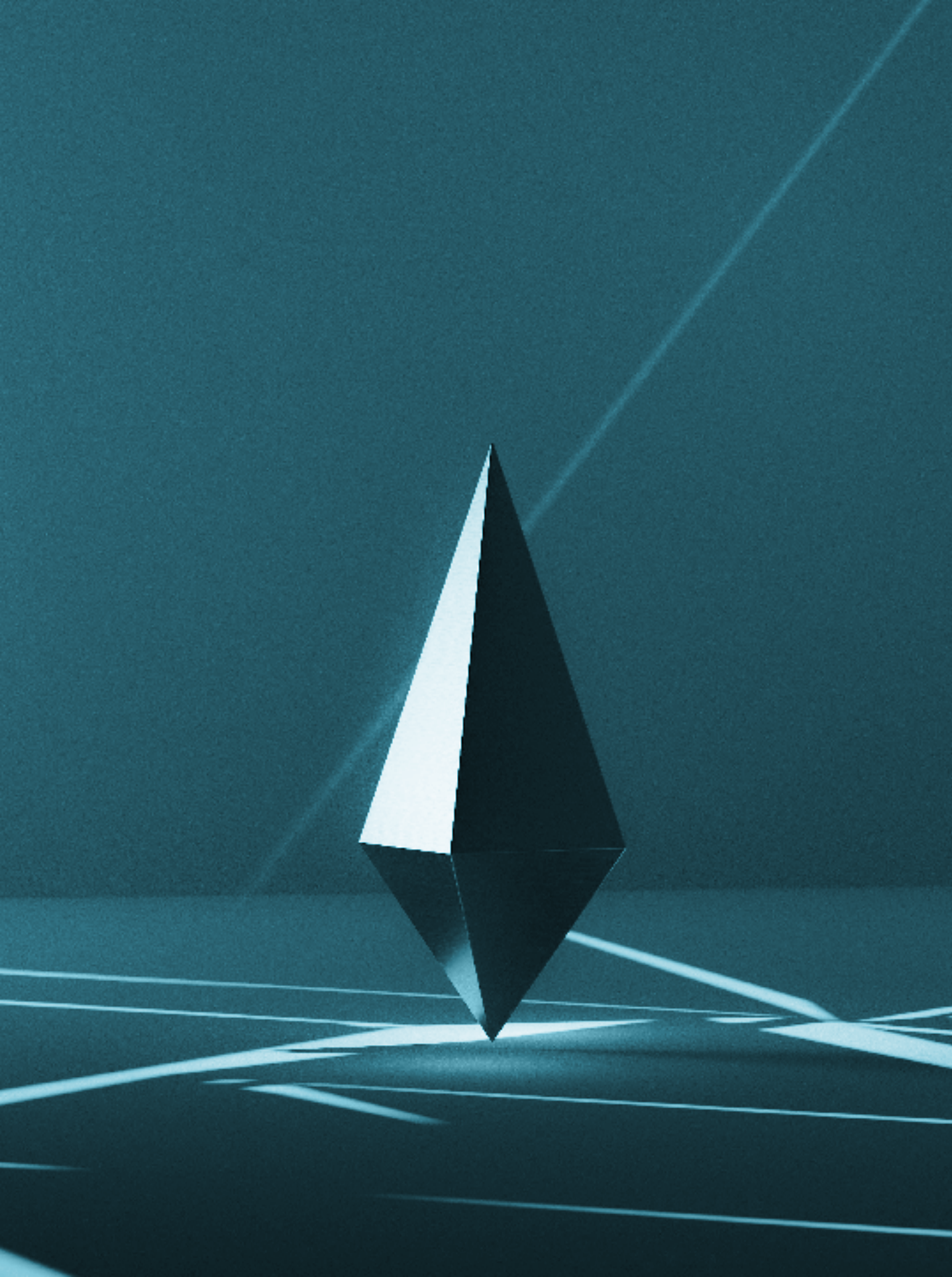
¹The Future of Jobs Report 2025, WEF, 7 de enero de 2025

²The SignalFire State of Tech Talent Report – 2025, SignalFire, 20 de mayo de 2025

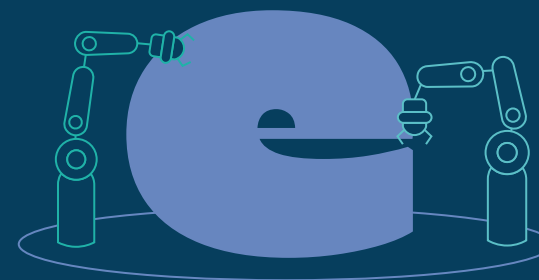
³Unmesh Joshi, Gitanjali Venkatarman, Martin Fowler, “Expert Generalists”, martinofowler.com, 2 de julio de 2025

⁴Energy and AI, IEA, abril de 2025

⁵Andrés Rodríguez-Pose, Zhuo-ying You, Peter Teirlinck, The political extremes and innovation: How support for extreme parties shapes overall and green scientific research and technological innovation in Europe, Research Policy, noviembre de 2025, doi.org/10.1016/j.respol.2025.105307



01 Materiales abundantes por materias primas críticas



¹²
Mg

⁵
B

²¹
Sc

Materiales abundantes por materias primas críticas

Los seres humanos somos animales con unas capacidades un tanto mediocres si nos comparamos con otras especies. Ni somos particularmente veloces, ni robustos, ni fuertes. Tampoco tenemos alas, aletas, garras, ni colmillos que nos permitan desplazarnos por estos medios o ser buenos cazadores. Sin embargo, aun con estas carencias, la humanidad ha sido capaz de dominar todos los entornos, desde el cielo, hasta el mar. Este hecho se debe a que, si destacamos por una habilidad, es nuestra manera de aprovechar aquello que nos ofrece el entorno para suplir nuestras carencias.

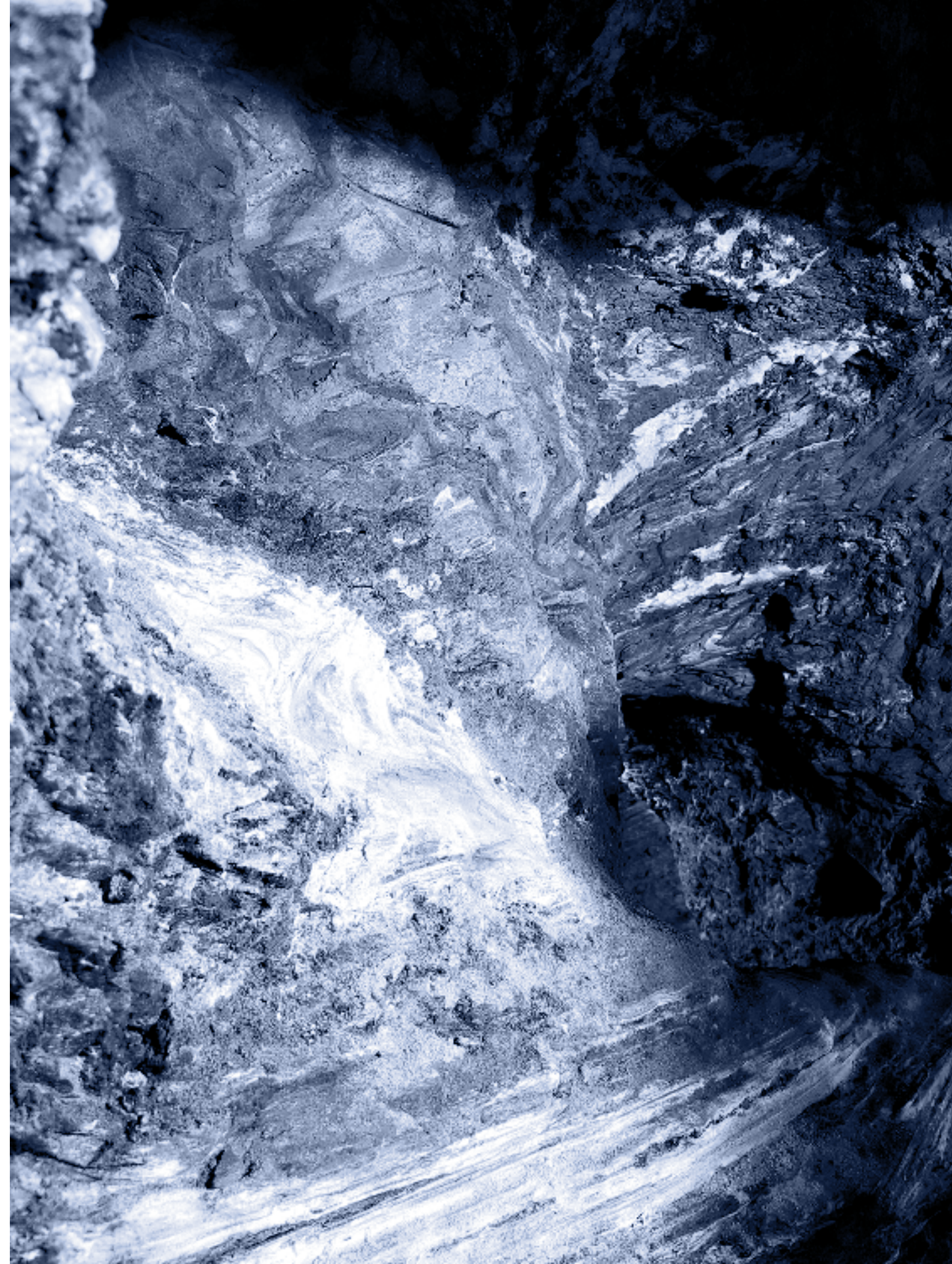
Si echamos la vista atrás, a la Edad de Piedra, el uso de esquirlas de rocas dotó a nuestros antepasados de garras, colmillos, y muelas fuera del cuerpo. Con ellos, podía cazar, abrirse paso a través de la piel de los animales, rasgar la carne y machacar las duras semillas para lograr alimento que, de otro modo, sería inaccesible. Con estas nuevas habilidades desbloqueadas, los humanos primigenios fueron experimentando con otros materiales como hueso, cerámica y, posteriormente, llegaron los metales.

Con cada nuevo material que se ha cruzado con el ser humano, ha aparecido una nueva posibilidad y, con cada posibilidad, nuevos problemas que solucionar que, a su vez, requerían de un nuevo material o técnica. Tras miles de años girando, la rueda de la innovación nos sitúa en un punto en el que los humanos utilizamos casi la totalidad de la tabla periódica para suplir alguna función concreta. Sin embargo, algunos de estos materiales, necesarios en el mundo en el que vivimos, son muy escasos o de difícil acceso. Por esta razón, están considerados como materias primas críticas.

Estas materias cobran especial relevancia a nivel macroeconómico y geopolítico, ya que en muchas ocasiones son el principal punto de disputa en los acuerdos comerciales entre países. Su acceso y su dependencia han puesto

en jaque a la estabilidad de ciertas regiones en más de una ocasión y, con un clima cada vez más tenso, la solución pasa por dejar de depender tanto de estos materiales.

Este es el motivo por el que cientos de laboratorios en todo el mundo dedican gran parte de su esfuerzo a crear materiales con propiedades similares a las materias primas críticas, pero con elementos de fácil acceso.



La cara inexplorada del mundo físico

POR DENTRO

Se conoce como materias primas críticas (critical raw materials) a una serie de materiales listados por la Comisión Europea y que requieren de una atención especial debido a su importancia económica, así como por el alto riesgo que supondría una interrupción de su suministro para la Unión Europea (UE). En total, la Comisión Europea ha identificado 34 materias primas críticas que tienen un papel fundamental en la visión que tenemos de un futuro moderno.

Por tanto, una materia prima es considerada crítica si cumple dos criterios:

1. Tiene una gran importancia económica. Un criterio cambiante y que depende del uso se le dé a este material en sectores estratégicos de la UE.
2. Existe un riesgo en el suministro. Un factor que, además, depende de otras condiciones, como la concentración del material en un país o región fuera de la UE, la estabilidad política de dicha región y su grado de reciclaje.

En concreto, la UE estableció en 2023 que podían considerarse materias primas críticas al antimonio, arsénico, bauxita, barita, berilio, bismuto, boro, cobalto, carbón metalúrgico o de coque, cobre, elementos ligeros de las tierras raras, elementos pesados de las tierras raras, escandio, estroncio, feldespato, fluorita, galio, germanio, grafito natural, hafnio, helio, litio, magnesio, manganeso, metales del grupo del platino, niobio, níquel con un grado de pureza suficiente para baterías, roca fosfórica y fósforo, silicio metálico, tántalo, titanio metálico, tungsteno y vanadio.

Dentro de estos 34 materiales, los 17 destacados también se consideran estratégicos, ya que son claves en la transición verde y en todas las áreas relacionadas con la industria de defensa. Por esta razón, se cree que su demanda va a aumentar de manera exponencial en los próximos años, y puede llegar a superar a la producción. Siguiendo este escenario, emergen dos grandes riesgos asociados al futuro de su explotación, como se puede ver en el Gráfico 1. El primero son los problemas medioambientales derivados de su búsqueda y extracción, que pueden afectar al medioambiente y la seguridad alimentaria de los lugares donde existe mayor concentración de estos materiales. Y el segundo serían las tensiones políticas generadas por su demanda, que podrían poner en riesgo la estabilidad de ciertos países o regiones.

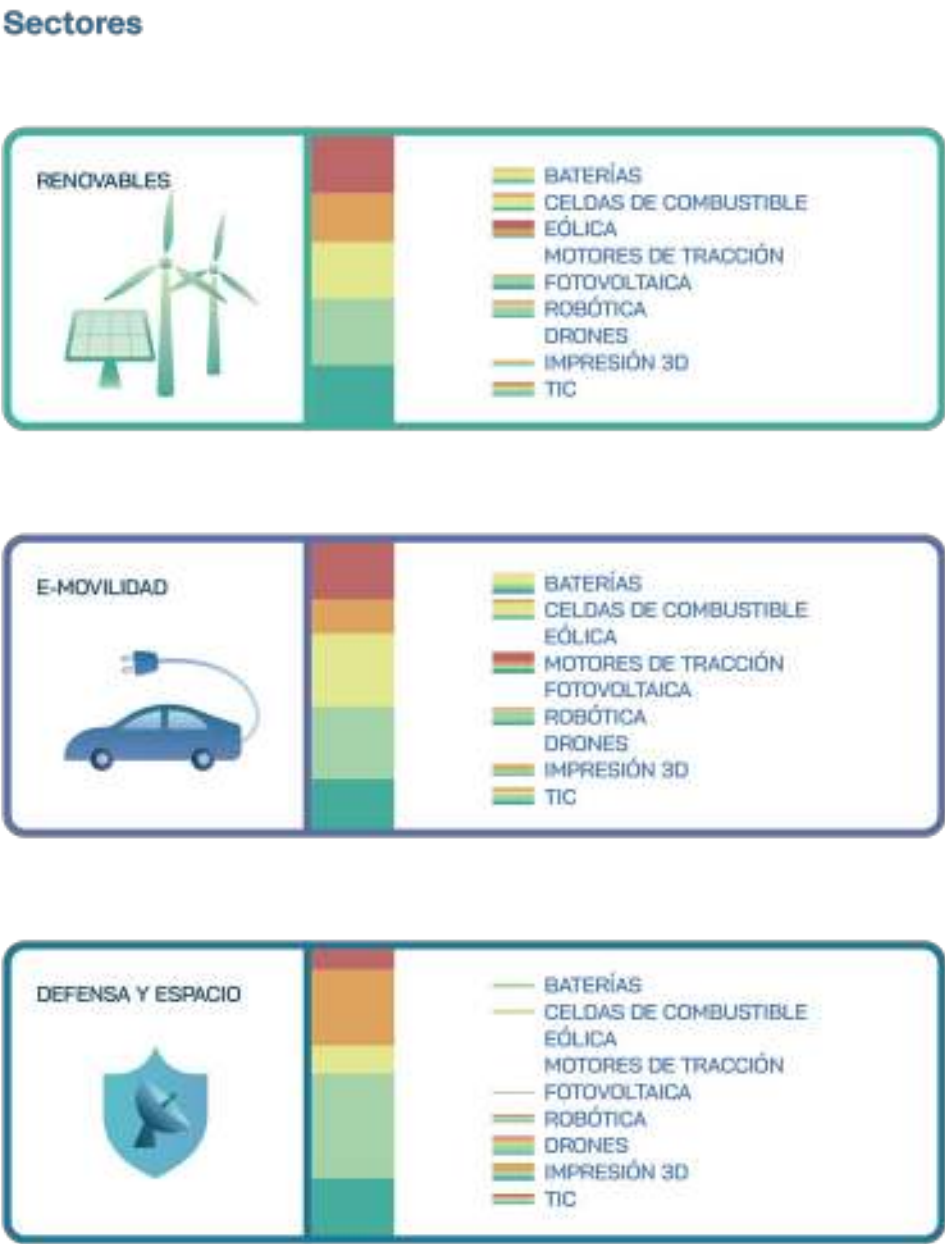
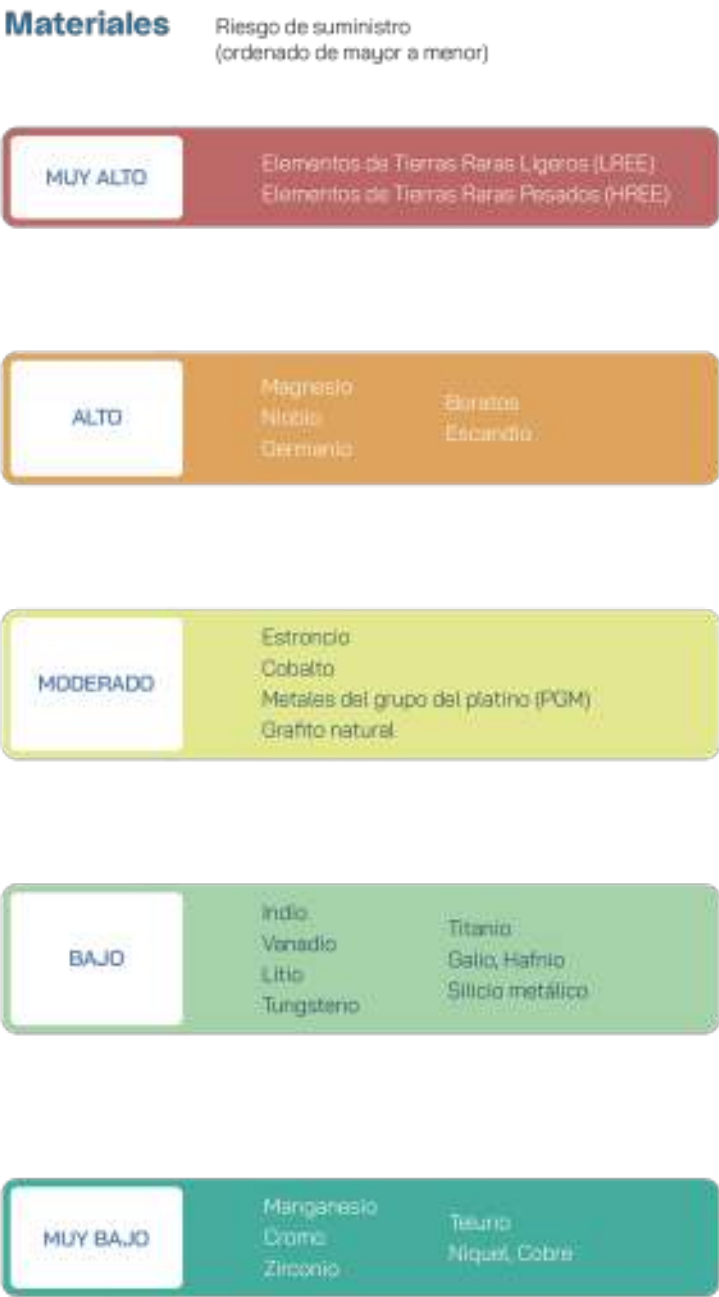
Estos posibles conflictos ya han sido ampliamente difundidos entre los medios, y afectan a diferentes materiales críticos y estratégicos, especialmente el litio. Este material, esencial para las baterías, ya ha sido fuente de conflicto entre Estados Unidos, China y otros países del llamado «Triángulo del litio» en Sudamérica. La imposición de aranceles, así como ciertas medidas controvertidas por parte de Estados Unidos para dejar de depender del gigante asiático han llevado a un clima enrarecido que no tiene una solución sencilla.

Europa, por otro lado, también se encuentra en una situación delicada con el litio. Hoy en día, según el Informe Especial acerca de la política industrial de la UE en el ámbito de las baterías, el 87% del litio no refinado procede de Australia, y el 13% restante de Portugal. En cuanto al litio refinado, el 79% del suministro a la UE procede de Chile, y el resto de Suiza, Argentina y otros países.

Sin embargo, acercar la producción la UE no es una tarea sencilla. Se estima que hay 27 depósitos potenciales en nueve países: República Checa, Serbia, Ucrania, España, Francia, Portugal, Alemania, Austria y Finlandia. Con todos estos depósitos, las reservas ascenderían a 8,8 millones de toneladas de óxido de litio y permitirían la independencia de este material. No obstante, sólo existe una mina de litio europea en explotación, situada en Portugal y está sometida a fuertes presiones para no aumentar su producción. También, los planes para la apertura de una mina en el valle de Jadar, al norte de Serbia, se han visto obstaculizados por grupos ecologistas y la presión pública, que temen que contamine las fértiles zonas circundantes y destruya los ecosistemas.

El problema es que todos necesitan litio, así como otras materias primas críticas, pero nadie quiere que se extraiga en su territorio. Siguiendo con este material, para obtener el litio se emplean principalmente dos técnicas: las minas a cielo abierto, donde se extrae la roca directamente para su posterior procesamiento, o las minas de bombeo y extracción. En estas últimas, primero se excava, y luego donde se bombea gran cantidad de agua para crear una mezcla salobre que, posteriormente se lleva a salares de evaporación, donde el litio se concentra y se extrae para su purificación. Ambos métodos requieren de grandes extensiones de terreno, por lo que acaban teniendo un gran impacto para el medio ambiente y de ahí la oposición de las comunidades.

Chemistry Europe



Fuente: Deloitte

Sustituir materiales críticos no es solo una cuestión económica: es una estrategia de paz, seguridad tecnológica y resiliencia energética. La innovación permite que la escasez deje de ser una amenaza para convertirse en motor de soberanía y progreso. Garantizar nuestra seguridad tecnológica y energética comienza en el laboratorio, donde la química sustituye lo escaso por lo sostenible.

Javier García

La problemática del litio es solo una muestra del resto de materias primas críticas ya que su futuro no es mucho más halagüeño. Como ya ha destacado en varias ocasiones la presidenta de la Comisión Europea, Ursula von der Leyen, la situación es muy vulnerable. En la cumbre del futuro de la seguridad energética del 24 de abril de 2025 manifestó: “Necesitamos materias primas críticas. Todos ustedes lo saben en esta sala. Esto es aún más importante en el contexto de las restricciones comerciales y las prohibiciones a la exportación que se avecinan, ya lo vemos. Estos minerales son los componentes básicos de la transición limpia. Ya se está trabajando en ello”.

Por esta razón, la UE ha firmado diez acuerdos estratégicos sobre materias primas con países socios. Y ha puesto en marcha la Clean Trade and Investment Partnership, una asociación con Sudáfrica en la que se invertirán 4.700 millones de euros en proyectos de energía limpia para el país a cambio de garantizar el acceso a materiales clave para la transición ecológica como litio, cobalto o níquel.

Sin embargo, la solución al problema no pasa por mover las explotaciones a otros lugares, sino por dotar a todas las regiones de la posibilidad de conseguir estos materiales sin depender de un único proveedor. Por ello, se ha impulsado en los últimos años la Ley Europea de Materias Primas Fundamentales. Esta ley tiene varios objetivos, entre los que se incluyen una serie de metas que han de alcanzarse para el año 2030. Por ejemplo, estipula que un 10% de las necesidades anuales de la UE se cubrirá con la extracción, un 40% con la transformación y un 25% con el reciclado. Además, se establecerán un máximo de dependencia de un 65% del consumo de materias primas críticas por parte de terceros países.

Con ello, se proponen desarrollar las capacidades europeas para lograr establecer rutas más robustas, y mejorar la resiliencia de las cadenas de suministro. Además, se prevé invertir en investigación de nuevas tecnologías para mejorar la eficacia de la extracción, y del procesamiento de los materiales. Por último, una de las claves de esta ley es garantizar una economía más circular, que permita recuperar estas materias a partir de residuos. Así, se pretenden mitigar los efectos adversos para el medio ambiente.

Aunque también se pone sobre la mesa una estrategia mucho más radical e interesante a nivel global. Sustituir

completamente estas materias primas críticas por los denominados Earth Abundant Materials. Es decir, establecer como objetivos que las industrias del futuro utilicen en su mayoría o en su totalidad, materiales que no sean considerados críticos.

La corteza terrestre está formada por un 46,1% de oxígeno y un 28,2% de silicio, en su mayoría formando parte de silicatos. Tras ellos, los siguientes elementos más abundantes son el aluminio y el hierro y, cerrando el top 10, se encuentran el calcio, sodio, magnesio, potasio, titanio e hidrógeno.

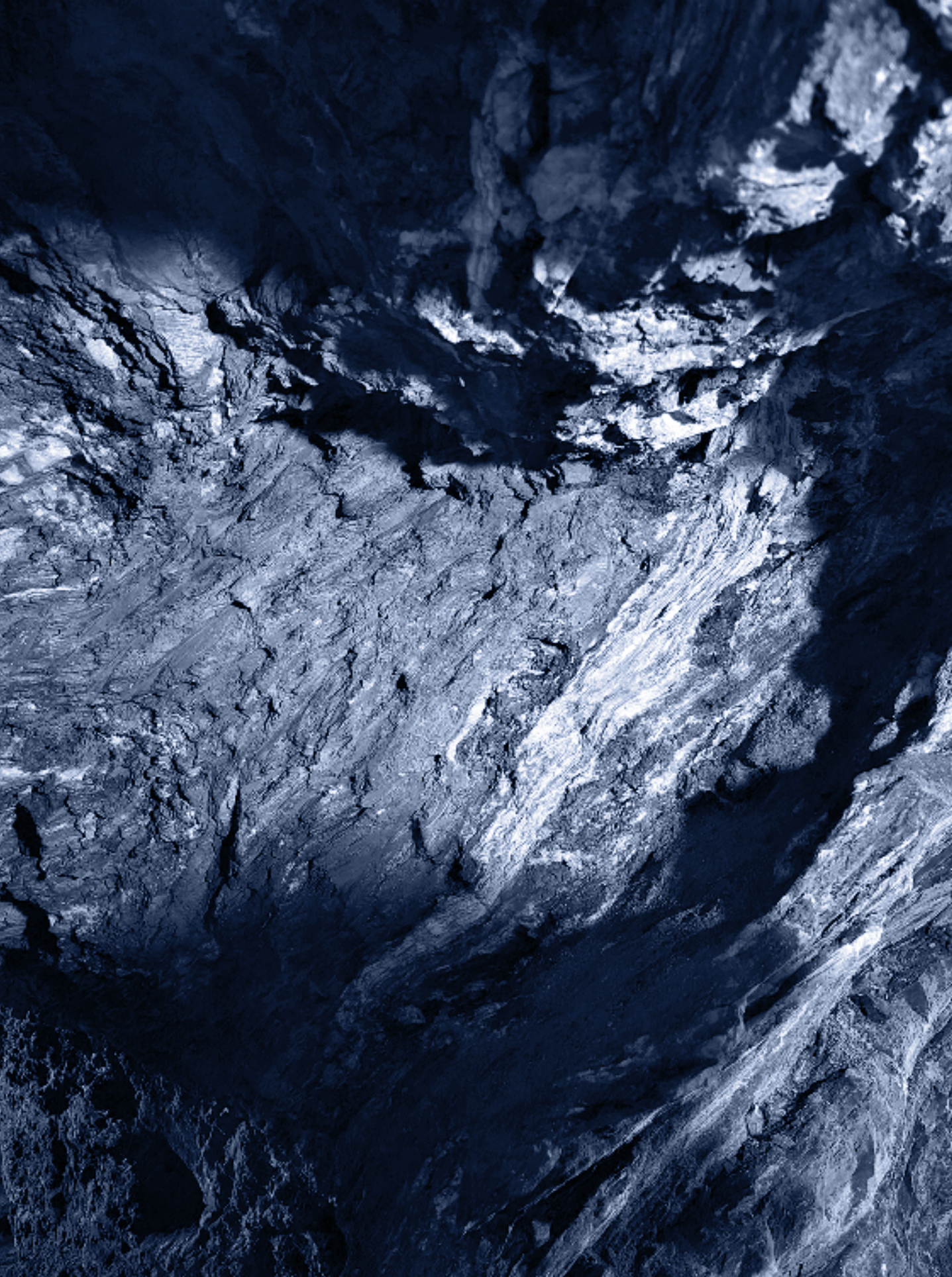
Ahora bien, su abundancia no implica que se puedan extraer y utilizar con facilidad. Por esta razón, dos de estos elementos, el magnesio y el titanio, se encuentran también en la lista de materias primas críticas. En el caso del magnesio, muy utilizado en la industria automovilística y aeroespacial y biomédica, se encuentra en el listado por su dependencia de China, de donde proceden el 99% de las importaciones, y porque por cada tonelada producida, se importan más de seis, lo que convierte a Europa en dependiente.

En el caso del titanio, se trata de un material muy utilizado también en la industria aeroespacial y en defensa, además de ser clave en dispositivos de uso diario, como smartphones y ordenadores, y en la generación de energía eléctrica. El problema del titanio no es tanto su extracción, sino su posterior procesamiento, ya que únicamente una pequeña cantidad de las industrias es capaz de producir el titanio con las purezas y condiciones necesarias para cada uno de sus usos. La mayoría de titanio proviene de Japón, China, Rusia y Kazajistán.

¿Dónde está la clave? En la innovación. En tratar de hallar tanto nuevos métodos tanto de extracción como de aprovechamiento. Y es en este punto donde instituciones, centros de investigación y empresas han de ir de la mano para llevar a cabo estrategias que permitan obtener los recursos necesarios con el mínimo impacto.

En este marco, los científicos invitados al Simposio Nobel sobre Química para la Sostenibilidad en la Declaración de Estocolmo sobre la química para el futuro tienen mucho que decir para dar forma a la química de las próximas décadas. En la declaración, los científicos abogan por la comunión entre química, sociedad y medioambiente, tres ámbitos que han de ir de la mano para garantizar un futuro seguro. Por ello, se puede leer que “toda innovación sin tener en cuenta la sostenibilidad sería ruinosa”.

Esta frase se refleja perfectamente en el primero de los cinco elementos esenciales para esculpir la química del futuro: “debemos asegurar que el diseño, desarrollo e implementación de productos y procesos químicos se realice de manera que integre el objetivo de reducir o eliminar el daño a las personas y al planeta desde su concepción. Nuestras empresas deben garantizar el diseño para una degradación rápida e inherentemente segura en el caso de pro-



ductos químicos/materiales de uso disperso, o el diseño para el desmontaje en el caso de productos con potencial de uso circular”, afirma la declaración.

Y añade: “nuestros procesos químicos deben evolucionar desde el uso de sustancias tóxicas, agotables, raras, persistentes y explosivas/inflamables hacia sustancias saludables, renovables, distribuidas, abundantes, no reactivas y degradables. Nuestra manufactura debe evolucionar de ser eficiente a ser eficaz, de instalaciones centralizadas, de propósito único y construidas para durar, a ser distribuidas, adaptables/dinámicas, continuas e inherentemente seguras.¹

Por tanto, la intención por parte de las mentes más afiladas está ahí. Lista para crear; y esto se materializa en proyectos concretos que eliminan el uso de las materias primas críticas.

La catálisis mediada por metales de transición ha supuesto una auténtica revolución en la síntesis química y ha permitido tanto el estudio como la creación de nuevos complejos metálicos. Además, se trata de una parte esencial para llevar a cabo reacciones químicas que actualmente son omnipresentes en el mundo académico e industrial. Este es el motivo por el que la química de la catálisis por metales de transición ha sido galardonada en varias ocasiones con el Premio Nobel.

Cuatro de las más recientes han tenido lugar en este siglo: en 2001, Ryoji Noyori y William S. Knowles recibieron la mitad del galardón por sus trabajos en catálisis asimétrica mediante rodio y rutenio, y la otra mitad fue para Barry Sharpless, por su trabajo para catalizar moléculas quirales mediante oxidación (entre las que se incluyen aquellas llevadas a cabo mediante osmio y titanio); en 2005, Yves Chauvin, Robert H. Grubbs y Richard Schrock obtuvieron el galardón por su trabajo sobre la metátesis del rutenio y el molibdeno; en 2010, Richard Heck, Ei-ichi Negishi y Akira Suzuki por sus trabajos sobre acoplamientos cruzados catalizados por paladio; y en 2022, Morten Meldal y, de nuevo, Barry Sharpless, recibieron el premio por la química «click» catalizada por cobre. Este premio fue concedido junto a Bertozzi por su desarrollo de la química click bioortogonal.

Estos estudios no quedan en mera teoría, sino que han sido adoptados ampliamente por la industria y gracias a ellos podemos fabricar muchos de los objetos que usamos a diario de forma más eficiente. Entre los catalizadores metálicos más importantes destaca el paladio, que tiene un papel fundamental en las acilaciones carboníativas, que se usan a menudo en la síntesis orgánica, y en las formaciones de enlaces covalentes C-C, C-N y C-O, formados por la compartición de electrones entre átomos. Por su parte, el rodio, el rutenio y el platino se utilizan en las hidrogenaciones (reacciones químicas que adicionan hidrógeno a otro compuesto usando un catalizador).

Todos estos catalizadores están considerados como materias primas críticas, por lo que hoy en día una de las claves es su sustitución por otros de propieda-

des similares y que estén formados por materiales-como aluminio, hierro, níquel o silicio. Por esta razón, se están utilizando técnicas de análisis que permitan entender los mecanismos por los que puede tener lugar la catálisis, y los ratios de transformación del producto deseado.

Otras industrias también están dando pasos para dejar de depender de las materias primas críticas. Entre ellas, por su importancia a nivel internacional, destacan la industria de producción energética solar fotovoltaica, la industria automovilística y la de defensa.

En la industria solar fotovoltaica, los avances actuales se están realizando en las perovskitas. Se trata de materiales que, debido a su configuración, permiten obtener mayor eficiencia a la hora de captar la luz solar en comparación con las obleas de silicio tradicionales. Varios grupos de investigación claman haber conseguido romper la barrera de eficiencia mayor del 30%. La mejora es de más de un 50% comparada los paneles actuales, lo que podría aumentar aún más la adopción de este método de obtención de energía. No obstante, todavía quedan retos por resolver. Su vida útil, por ejemplo, suele ser menor que la de las obleas, y su escalabilidad, en ocasiones, es complicada.

En el caso de la industria automovilística, se trata de un tema controvertido. Se estima que los vehículos son los causantes de forma directa e indirecta de cerca del 25% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, y se espera que sus emisiones sigan aumentando en la próxima década. Para reducir su huella, una de las claves es maximizar su eficiencia sin perder sus capacidades. Con la adopción cada vez mayor de vehículos eléctricos, los departamentos de I+D de las empresas automovilísticas han centrado sus esfuerzos en dos líneas de investigación: la reducción del peso de los vehículos y la eficiencia y sostenibilidad de las baterías de los vehículos eléctricos.

Para el peso cada vez se habla más del “hierro verde”, esto es, materiales que son más ligeros que los tradicionales y que mantienen sus propiedades. Mayoritariamente se trata de aleaciones de aluminio, magnesio o polímeros reforzados con fibra de carbono. Al reducir el peso, también se reduce la energía necesaria para mover el vehículo y, por tanto, el consumo y su impacto en el medio ambiente.

En cuanto a las baterías, hoy en día existe una gran expectación en el uso de ferrofosfato para el cátodo de las baterías de litio, en vez de cobalto o níquel. Sus ventajas son múltiples. En materia de seguridad, por ejemplo, el ferrofosfato es intrínsecamente más estable que sus contrapartes de metales críticos y, por tanto, tiene un menor riesgo de incendio o explosión. También tiene una mayor vida útil, puede soportar una mayor densidad de potencia y una carga y descarga rápidas. Además, la extracción de los materiales necesarios para su construcción es más respetuosa con el medio ambiente que las de níquel y cobalto, al ser el hierro mucho más abundante.

En la industria de defensa, el ambiente se encuentra bastante más enrarecido. La montaña rusa que ha supuesto la política internacional en los últimos años ha provocado un clima tenso. Por ello, el acceso a algunos de los materiales más utilizados en la industria de defensa podría dejar de estar disponible en los próximos años. Realizando una evaluación de las materias primas usadas en defensa, se encontró que al menos 19 (berilio, boro, disprosio, germanio, oro, indio, magnesio, molibdeno, neodimio, niobio, praseodimio, un grupo de otras tierras raras, samario, tantalio, torio, titanio, vanadio, circonio e itrio) la UE depende en más de un 50% de las importaciones. Por tanto, podrían verse interrumpidas por cambios en los países productores.

China es el principal productor de un tercio de las materias primas señaladas y, en la actualidad, el riesgo de suministro de materias primas producidas en este país se considera alto. Por ello, se están investigando potenciales yacimientos en distintos países de la UE, así como una diversificación de los países importadores para que sea posible garantizar los suministros en caso de restricciones.

El reto actual con las materias críticas va más allá de simplemente asegurar el suministro de minerales esenciales; consiste en reinventar la forma en que interactuamos con nuestros recursos naturales en un contexto de sostenibilidad y economía circular. La dependencia excesiva de unos pocos países exportadores no solo restringe la autonomía industrial, sino que también coloca en riesgo el cumplimiento de los compromisos climáticos y tecnológicos que hoy marcan la agenda internacional. En este sentido, surge la necesidad de desarrollar alternativas sostenibles y abundantes que permitan una extracción y procesamiento más limpio, con un enfoque en la innovación y el respeto al medio ambiente.

Este desafío global implica transformar los métodos tradicionales de extracción, incorporando tecnologías emergentes que minimicen el impacto ambiental, fomentando el reciclaje y la reutilización de materiales, y estableciendo alianzas entre el sector público y privado para impulsar proyectos de investigación y desarrollo. Al mismo tiempo, la competencia geopolítica subraya la urgencia de crear modelos de cooperación internacional que garanticen una mayor resiliencia ante crisis en el suministro. La convergencia de estos factores articula no solo una oportunidad para rediseñar la industria del futuro, sino también un compromiso ético y estratégico para impulsar la sostenibilidad y reducir las desigualdades en el acceso a recursos críticos.

La industria química está innovando en diversas dimensiones

Fuente: Deloitte

Tipo	Subtipo
Innovación de producto	Sustitución de materia prima (como materias primas renovables)
	Mejoras en formulaciones químicas (como productos químicos intercambiables)
	Soluciones para aplicaciones en mercados finales (como mejoras en el rendimiento, calidad y huella ambiental del producto final).
Innovación de procesos	Intensificación de procesos
	Digitalización y automatización
	Digitalización y automatización
Innovación de ecosistemas	Investigación y desarrollo colaborativo
	Plataformas de innovación abierta
	Co-creación con los clientes
	Prácticas de sostenibilidad

Tipo
Desarrollo de nuevos polímeros, como biodegradables para aplicaciones en detergentes para la ropa.
Uso de enzimas en detergentes para aumentar la eficiencia y funcionalidad a bajas temperaturas y pH moderado.
Desarrollo de recubrimientos que mejoren la resistencia a la corrosión en maquinaria, alargando su vida útil y reduciendo costos de mantenimiento.
Uso de microreactores electroquímicos de flujo de bajo volumen para optimización rápida y automatizada de procesos.
Implementación de gemelos digitales para la gestión de la integridad de activos en plantas químicas.
Uso de técnicas de química verde.
Creación de alianzas entre empresas químicas e instituciones académicas o centros de innovación.
Recolección de ideas para nuevos productos químicos mediante participación externa.
Establecimiento de colaboraciones entre empresas químicas y agricultores para entender sus necesidades y desarrollar soluciones conjuntas.
Implementación de principios de economía circular.

Reinvertir las materias de la nueva economía

EN ACCIÓN

La industria química se ha convertido en uno de los sectores más grandes de la economía mundial, con unos ingresos anuales de alrededor de 4,3 billones de euros (muy cerca del PIB de Alemania) y más de 15 millones de trabajadores. El 25% de la economía de Estados Unidos depende de la química, un sector que ese país ha liderado durante mucho tiempo a nivel global, aunque no faltan voces que dudan de que pueda seguir haciéndolo, a la vista de las tendencias de cambio. De la industria química dependen actividades tan diversas como los sistemas de atención médica, el embalaje, la agricultura, el textil, la automoción, la construcción... el 96% de los bienes manufacturados requieren de ella. El 80% de la industria actual se compone principalmente de cinco materiales: acero, carbón, oro, cobre y aluminio; sin embargo, la producción de intermedios químicos básicos, como amoníaco, metanol, etileno, propileno, butadieno, benceno, tolueno, xileno, afecta directamente a casi todos los aspectos de la economía mundial. Por lo tanto, a menos que el sistema químico haga la transición hacia un modelo de operación sostenible, será difícil que los otros sectores que utilizan sus productos lo logren verdaderamente.

A pesar de la caída del 8% en los ingresos de la industria química en 2023, en un contexto difícil por el cierre de plantas en Europa² y la regionalización en la fabricación de algunos productos, sus gastos de capital y en I+D crecieron un 6% y un 2%, respectivamente. En ambos casos, reciben el impulso, por un lado, de tecnologías de la era digital como la inteligencia artificial (IA), la robótica, la impresión 3D y la informática de materiales, que incluye aprendizaje automático, las si-

mulaciones y, eventualmente, la computación cuántica. Propuestas como la Iniciativa del Genoma de los Materiales buscan, por ejemplo, desde hace una década, apalancarse en ellas para ampliar la gama de materiales avanzados y acelerar el plazo de comercialización³.

Junto a ello, la innovación en el sector químico se ve impulsada por el mayor enfoque en la sostenibilidad y la necesidad de adaptarse a los cambios en las preferencias de los clientes. Más de 1.700 empresas e instituciones financieras a nivel mundial han anunciado compromisos de cero emisiones netas, y el 59% de los directivos encuestados por Deloitte asegura que sus empresas han comenzado a utilizar materiales sostenibles, como los reciclados y los obtenidos con menores emisiones⁴.

La preocupación está justificada porque se estima que los metales críticos podrían experimentar elevados aumentos de precio hasta 2035, en particular, el paladio, el iridio y el níquel subirán un 165%, un 140% y un 107%, respectivamente, y otros materiales, en un escenario de tasa de inflación anual media del 2% durante la próxima década, podrían ver cómo su precio se dispara un 24%.

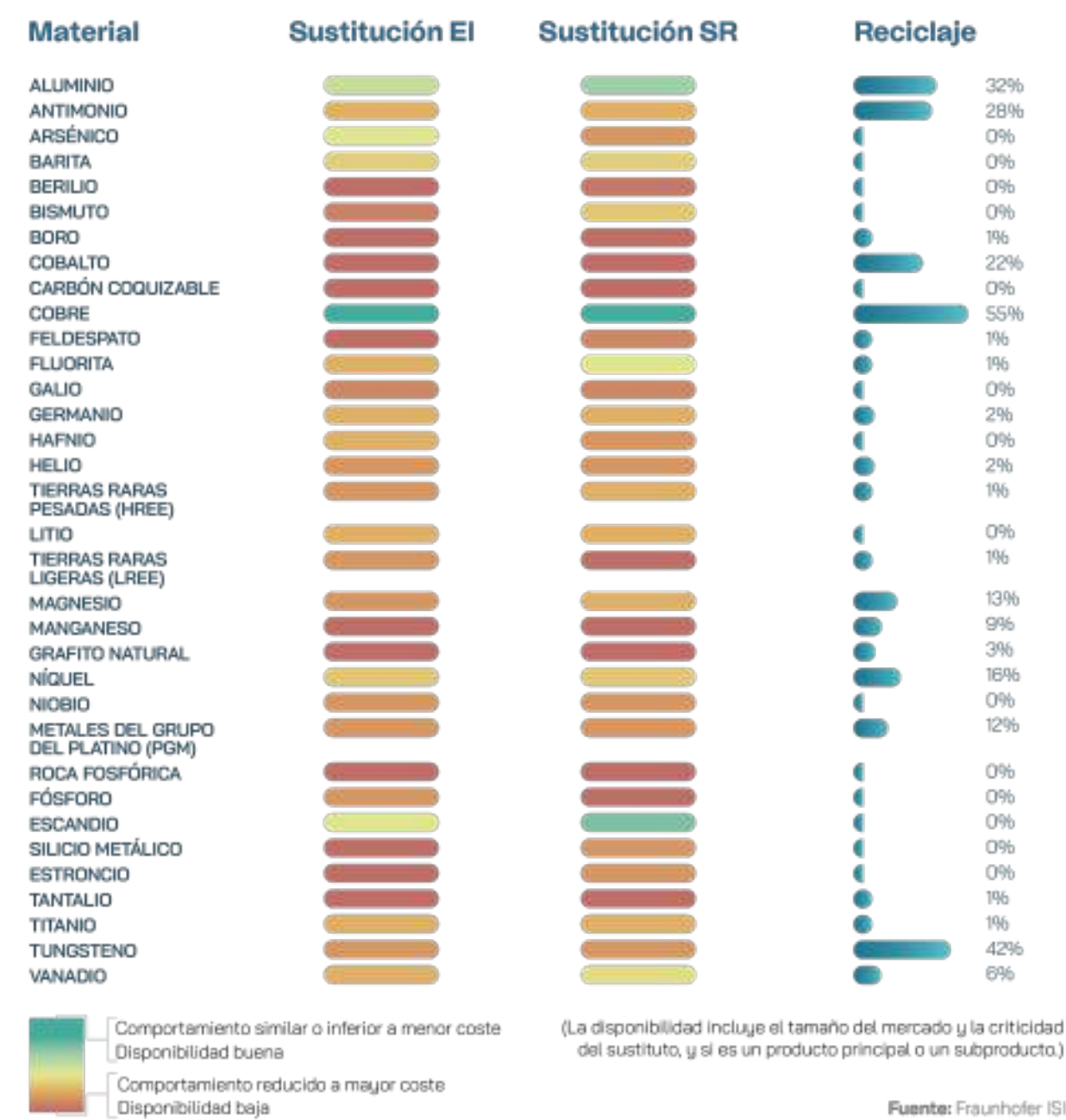
La criticidad del paladio se intensificará, y resulta vital para la industria catalítica del automóvil (83% de la demanda global) y del sector químico (6%). La demanda global de iridio podría alcanzar las 20 toneladas/año en 2040, lejos de las 6,8 t/año de producción en 2022. Su papel es especialmente relevante en las tecnologías verdes emergentes, particularmente para la producción de hidrógeno, pero su tasa de reciclaje es de apenas el 14%. A pesar de su amplia disponibilidad y de que la producción global de níquel está más dispersa, la competencia global por este material muy probablemente se intensificará en el futuro cercano. Tiene aplicaciones críticas en la producción de acero y en las industrias del automóvil y de baterías, y la demanda procedente de la industria de tecnologías limpias crecerá más del 30% en un escenario de continuidad y en torno al 60% en una trayectoria alineada con los objetivos del Acuerdo de París en 2040, en comparación con el 10% en 2022.

La batalla no se centra sólo en la disponibilidad de las materias primas, sino también de las tecnologías que sirven para procesarlas y disponerlas para su uso comercial. China prohibió la exportación de tecnologías de procesamiento de tierras raras en diciembre de 2023 e incrementó sus inversiones en adquisición de minas en el extranjero hasta los 10.000 millones de euros, con un enfoque particular en metales para baterías como el litio, el níquel y el cobalto.

En ese camino hacia la sostenibilidad económica y medioambiental, uno de los grandes desafíos del sector químico mundial en materia de innovación consistirá en encontrar alternativas nuevas a las denominadas materias primas críticas. En 2023, la UE otorgó esa clasificación a 34 materiales, en función de su importancia económica y riesgo de suministro, así como por su relevancia tanto para la transición digital y energética como para las aplicaciones de defensa y espaciales. Este enfoque dio lugar a una segunda lista

Estado actual de la sustitución y el reciclado de materiales en la UE

La columna "EI" hace referencia al coste-rendimiento del sustituto y la columna "SR" a la disponibilidad del sustituto.



de 17 materias primas estratégicas en las que se incluyó el cobre y el níquel, a pesar de su suministro está bien diversificado.

Hay una tercera vía que contempla la transición hacia las «materias primas circulares»⁵, un paradigma complementario a los anteriores y regido por la reducción de residuos, la prolongación del ciclo de vida de los productos y el reciclaje de materiales. En el Gráfico 3 se pueden observar las oportunidades que se abren este sentido. La Alianza Europea de Materias Primas (ERMA), liderada por EIT RawMaterials, cuenta ya con más de 750 miembros, con un potencial de inversión total de unos 50.000 millones de euros, y asegura disponer de capacidad para reducir la brecha entre la oferta y la demanda de materias primas de la UE entre un 20% y un 100% en una amplia gama de materias primas críticas y estratégicas⁶.

Encontrar una solución a la criticidad las materias primas es un imperativo para Europa, que impulsa diferentes vías de trabajo, entre ellas la sustitución de las que se utilizan actualmente en muchos procesos y productos por otras basadas en materiales más abundantes. Puede ser la opción más interesante porque solo el 7,3% de la demanda anual en la UE se satisface mediante reciclaje de residuos⁷, de hecho, la mayoría de las materias primas críticas tienen un EOL-RIR (tasa de entrada de reciclaje al final de la vida útil) inferior al 5%. Mientras ese porcentaje no aumente y no se encuentren alternativas, la dependencia no dejará de aumentar.

La mitad del cobre producido se desecha ahora mismo y eso resulta difícil de digerir para sectores de rápido crecimiento, como la inteligencia artificial (IA), los centros de datos, las tecnologías de energía limpia y los vehículos eléctricos, cuya demanda podría incrementarse en un 50% hasta 2040. Sólo en 2022, se produjeron aproximadamente 64 millones de toneladas de productos electrónicos con un alto contenido de cobre en todo el mundo, pero solo se reciclaron 14 millones de toneladas (22%). Eso implica seguir aumentando el dióxido de carbono emitido durante la producción de cobre, pese a que, con un desarrollo tecnológico adecuado, los expertos creen que podría reducirse hasta en un 85%.

Algunos productos individuales, como las luces LED, contienen solo cantidades minúsculas de estos materiales. Sin embargo, el gran volumen de desechos electrónicos supone un desperdicio significativo de materias primas críticas. Además, los procesos actuales de reciclaje son incompatibles entre sí, y solo se puede recuperar en cada caso uno de estos tres grupos por separado: indio y galio; tierras raras (europio, gadolinio, terbio e itrio); y plata, oro y paladio. Para otras materias primas críticas, como el litio, las tecnologías de reciclaje simplemente aún no existen o no resultan viables por su alto coste. De hecho, de las baterías de iones de litio se recupera de forma principal el cobalto, que es el material más caro.

La rápida adopción de vehículos eléctricos en Europa abre una ventana de

oportunidad, porque está acelerando la eliminación gradual de los vehículos convencionales para reducir las emisiones de CO₂ hasta 2035. El platino utilizado hoy en los catalizadores de automóviles podría ser una fuente interesante de materias primas secundarias para la fabricación de electrolizadores a partir de 2030. La Alianza para el Hidrógeno Limpio ha decidido financiar proyectos de investigación en esa dirección. Se dan circunstancias paradójicas: el sector espacial se nutre de gases nobles y helio, un campo en el que Europa dispone de una potente capacidad industrial, con empresas como Linde y AirLiquide. Sin embargo, el helio crudo es muy sensible al contexto geopolítico, debido a que el suministro se concentra en tan solo tres países: Catar, Rusia y Argelia, que representan el 60% de la producción mundial. De igual forma, la producción anual de amoníaco, que lideran China, Rusia, Estados Unidos e India, aumentará de 235 millones de metros cúbicos en 2019 a 290 millones de toneladas métricas a finales de 2030, debido al enorme crecimiento demográfico y al avance de la industrialización.

El Informe Draghi ha abordado con profundidad la cuestión de las alternativas a las materias primas críticas. Recomendaba que la UE desarrolle una hoja de ruta industrial que tenga en cuenta la convergencia horizontal (la electrificación, la digitalización y la circularidad) y la convergencia vertical (recursos estratégicos, baterías, infraestructura de transporte y carga) de las cadenas de valor en el ecosistema de la automoción. La UE podría cubrir entre más de la mitad y tres cuartas partes de sus necesidades de metales para tecnologías limpias en 2050 mediante el reciclaje local, añade, y recomienda establecer un verdadero Mercado Único para los residuos y la circularidad. Hay un dato relevante a considerar que no suele asociarse al problema de los nuevos materiales y es que las proyecciones indican que, en 2030, el sector de las materias primas necesitará 1,2 millones de profesionales cualificados.

La UE ha decidido apoyar estas dinámicas con la aprobación de normativas como la Ley de Materias Primas Críticas, que establece para 2030 objetivos como los de alcanzar una capacidad de extracción equivalente al 10% del consumo anual de la UE, una capacidad de procesamiento del 40% y una capacidad de reciclado del 25% del consumo anual de materias primas estratégicas,

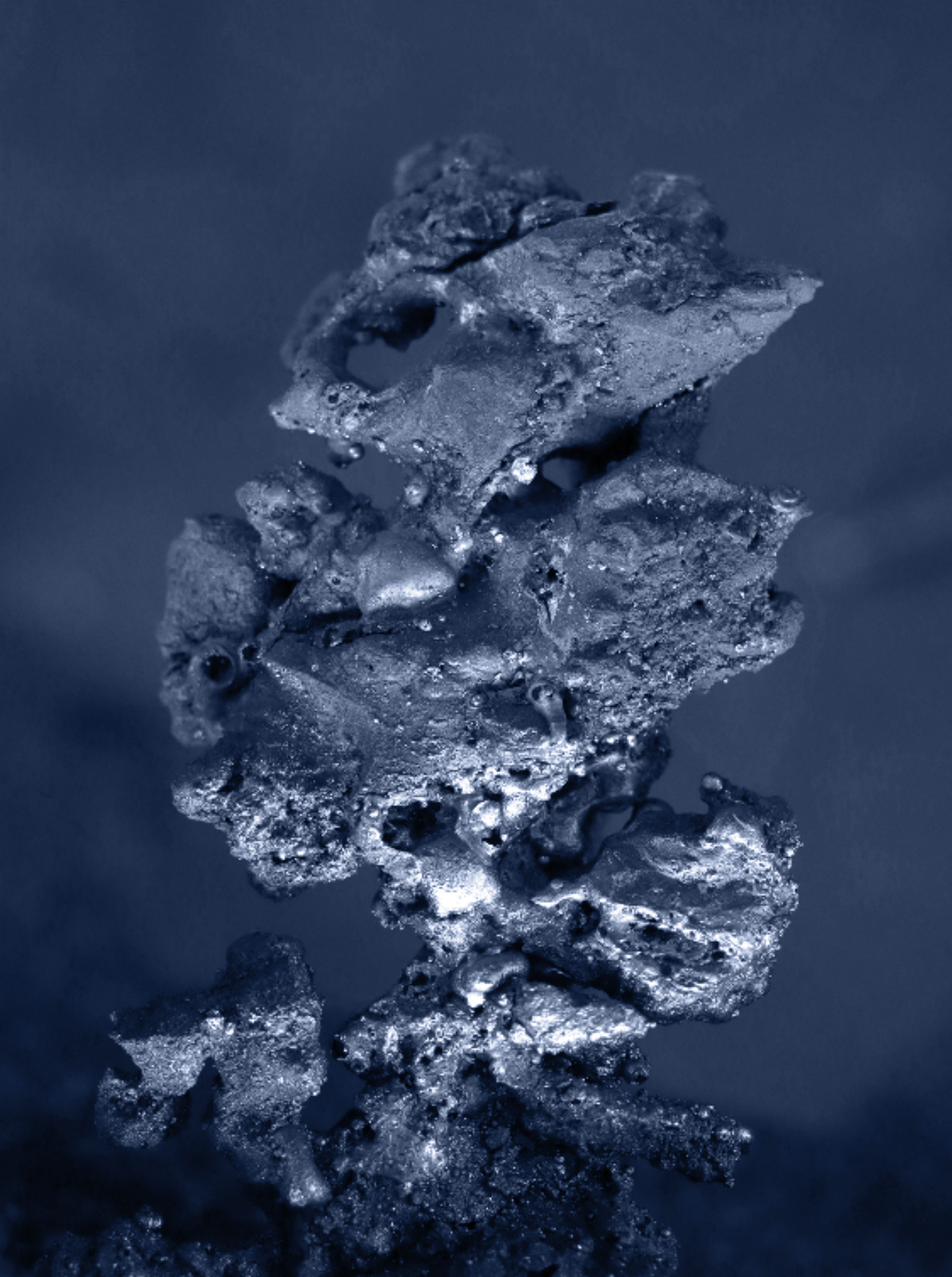
frente al 11% actual. Además, la UE no deberá depender de un solo tercer país en más del 65% del suministro de una materia prima crítica en 2030. La ley insta también a los Estados miembro a implementar plazos de concesión de permisos más cortos para lo que denomina “Proyectos Estratégicos”: 27 meses para los permisos de extracción y 15 meses para la tramitación, en comparación con los procesos que actualmente tardan entre tres y cinco veces más.

Complementan a esta regulación otras como el Reglamento sobre Baterías, que exige un contenido reciclado mínimo para las baterías nuevas, y las Directivas sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos o el Plan de Acción para la Nueva Economía Circular. Al evaluar la criticidad que presentan los materiales de relevancia industrial, por último, la Comisión Europea tiene en cuenta los factores socioeconómicos, ambientales y geopolíticos que afectan a su disponibilidad y a su uso. Por ejemplo, un vehículo eléctrico requerirá aproximadamente seis veces más insumos minerales que un vehículo actual con motor de combustión interna, y una planta de energía eólica terrestre requerirá nueve veces más minerales que una planta de energía a gas de tamaño similar.

Se considera que la necesidad de asegurar el suministro de materias primas críticas es una de las razones detrás del renacimiento de las políticas industriales a nivel mundial, incluidas las llamadas a la reindustrialización de la UE. Resulta paradójico, en ese sentido, que los proyectos en curso financiados a través de Horizonte Europa relacionados con las materias primas críticas se enfoquen principalmente en el reciclaje y la recuperación. Las baterías, los catalizadores y los condensadores son las tecnologías más investigadas, mientras que los imanes para turbinas eólicas y paneles solares parecen estar subrepresentados. Las materias primas críticas que más se abordan en los proyectos de Horizonte Europa son el cobalto, el litio, los metales del grupo del platino, el níquel y el manganeso. Sólo se plantea la cooperación con Zambia y Sudáfrica como países no europeos, mientras que Finlandia, Grecia y Portugal concentran los mayores proyectos de demostración y tecnologías piloto.

Un enfoque interesante aboga por diseñar productos que requieran un uso más eficiente de los materiales, por ejemplo, reduciendo la carga de metales preciosos empleados en los catalizadores. El concepto de «Diseño para la Circularidad» replantea todo el ciclo de vida de los productos desde ese nuevo enfoque. Los teléfonos móviles inteligentes utilizan 31 elementos (algunas fuentes elevan esta cifra hasta alrededor de 70) que suelen tener que reemplazarse cuando se cambia dispositivo, es decir, con mayor rapidez de la necesaria, ya que su perspectiva no es la reutilización.

En los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM), que se emplean para generar oxígeno e hidrógeno a partir del agua, se podrían utilizar catalizadores de un solo átomo, nanopartículas o estructuras de superficie extendida, que no solo implican precios más bajos, sino que tam-



bién habilitan nuevas funciones y características. Se ha encontrado un uso reciente también de los catalizadores de un solo átomo para la síntesis de una variedad de productos químicos finos. Sin embargo, se necesita un enfoque holístico de la comunidad científica para facilitar la inversión y su integración potencial en diversas industrias químicas, como la alimentaria (saborizantes y fragancias) y la farmacéutica (profármacos e intermediarios en la síntesis de diversos principios activos farmacéuticos).

Junto a los esfuerzos en mejorar el diseño de los productos, para hacer un uso más óptimo de los materiales, las técnicas de fabricación avanzadas, como la impresión 3D, ofrecen una vía complementaria interesante, ya que permiten un uso más preciso de los materiales, con un menor coste energético. Es posible encontrar también apoyo en los modelos de producto como servicio cada vez más habituales en la economía. Al permanecer la propiedad en manos del fabricante, se puede promover la longevidad, la reutilización y la renovación de las materias primas, en lugar del reemplazo. Este enfoque, que ya es común en el transporte, podría aplicarse más ampliamente en otros sectores como la iluminación, la impresión o la electrónica.

Y, por supuesto, la inteligencia artificial (IA) está permitiendo dar un salto fundamental en la búsqueda de nuevos materiales. Empresas tecnológicas estadounidenses unieron a varios laboratorios federales de investigación para utilizar IA y desarrollar un nuevo material que podría reducir el contenido de litio en las baterías en un 70%. Una de las implicadas fue Microsoft, que ha lanzado Azure Quantum Elements para acelerar el descubrimiento científico con el poder de la IA, la computación en la nube y, eventualmente, los ordenadores cuánticos a gran escala. Ha trabajado con empresas como Johnson Matthey, 1910 Genetics y AkzoNobel, entre otras. Sus modelos de IA han analizado digitalmente más de 32 millones de materiales potenciales y han encontrado más de 500.000 candidatos estables para un nuevo electrolito de batería de estado sólido⁸. Los modelos GNoME de Google DeepMind han descubierto más de 2,2 millones de estructuras estables con las que incrementar la Base de Datos de Estructuras Cristalinas Inorgánicas (ICSD). Dado que los materiales descubiertos compiten por la estabilidad, la envoltura convexa actualizada ha pasado a contener 381.000 nuevas entradas para un total de 421.000 cristales estables, lo que representa una expansión de un orden de magnitud de todos los descubrimientos previos⁹.

Sustituir las materias primas críticas por materiales menos críticos sigue siendo, en última instancia, la estrategia clave. Se están produciendo multitud de avances en este sentido. La producción de electrolizadores para generar hidrógeno requiere al menos 40 materias primas y la UE actualmente produce solo entre el 1% y el 5%¹⁰. Para el almacenamiento de energía estacionaria a largo plazo, las baterías de flujo redox son una posible solución. Se investiga la sustitución del electrolito de vanadio por electrolitos de zinc o, preferiblemente, de hierro. El desarrollo continuo de nuevas químicas para baterías ofrece un campo de innovación apasionante, con

La búsqueda de materiales alternativos en España va más allá de la tecnología: es una apuesta por proteger el empleo, la industria y la estabilidad económica. La solidez de la química en España es una ventaja decisiva que debemos aprovechar para reforzar nuestra posición estratégica en Europa.

|
Javier García

promesas como los electrolitos sólidos y ánodos de sodio. Aunque estas tecnologías emergentes podrían no adoptarse a gran escala en modelos de automóviles de segunda o incluso tercera generación hasta dentro de 10 a 15 años¹¹. Asimismo, se busca alternativas basadas en ferrita a los imanes de los motores de los vehículos eléctricos y los aerogeneradores que contienen elementos de tierras raras (REE), como los de neodimio-hierro-boro. El ejemplo más famoso ha sido la sustitución de las baterías de iones de litio basadas en níquel, manganeso y cobalto (NMC) de los coches de Tesla por baterías de iones de litio basadas en litio, hierro y fosfato (LFP)¹².

En lugar de sustituir materiales vinculados a las tecnologías energéticas limpias que ya han alcanzado un alto nivel de madurez, se está considerando también la transición hacia tecnologías completamente alternativas. Es el caso de las perovskitas en fotovoltaica, siempre y cuando se consiga resolver el desafío de su vida útil, un problema similar al de la fotovoltaica orgánica. El seleniuro de antimonio es un material muy prometedor, con potencial para convertirse en una alternativa competitiva a las tecnologías tradicionales basadas en silicio, telurio de cadmio y CIGS (material semiconductor compuesto de cobre, indio, galio y selenio). La fotovoltaica de película delgada también genera grandes expectativas desde una perspectiva industrial, pero se ve afectada por la escasez de telurio, indio y galio en la corteza terrestre, a lo que se suma la toxicidad del cadmio.

En cuanto a las tecnologías alternativas para la electrólisis del agua, la mayoría necesitan mejorar en escalabilidad, al igual que la energía eólica aérea y la energía oceánica. Los generadores síncronos multipolares de Enercon y los generadores basados en superconductores General Electric, son ejemplos de soluciones tecnológicas emergentes alternativas a los imanes. SpaceX decidió utilizar para su constelación Starlink células solares de silicio suministradas por Taiwan Solar Energy Corporation (TSEC) pese a que tradicionalmente se han utilizado en aplicaciones terrestres, una decisión que no deja de tener sus riesgos.

Los materiales avanzados y las soluciones de almacenamiento y conversión pueden generar ahorros de dos dígitos en el sector de las energías limpias¹³. Junto a

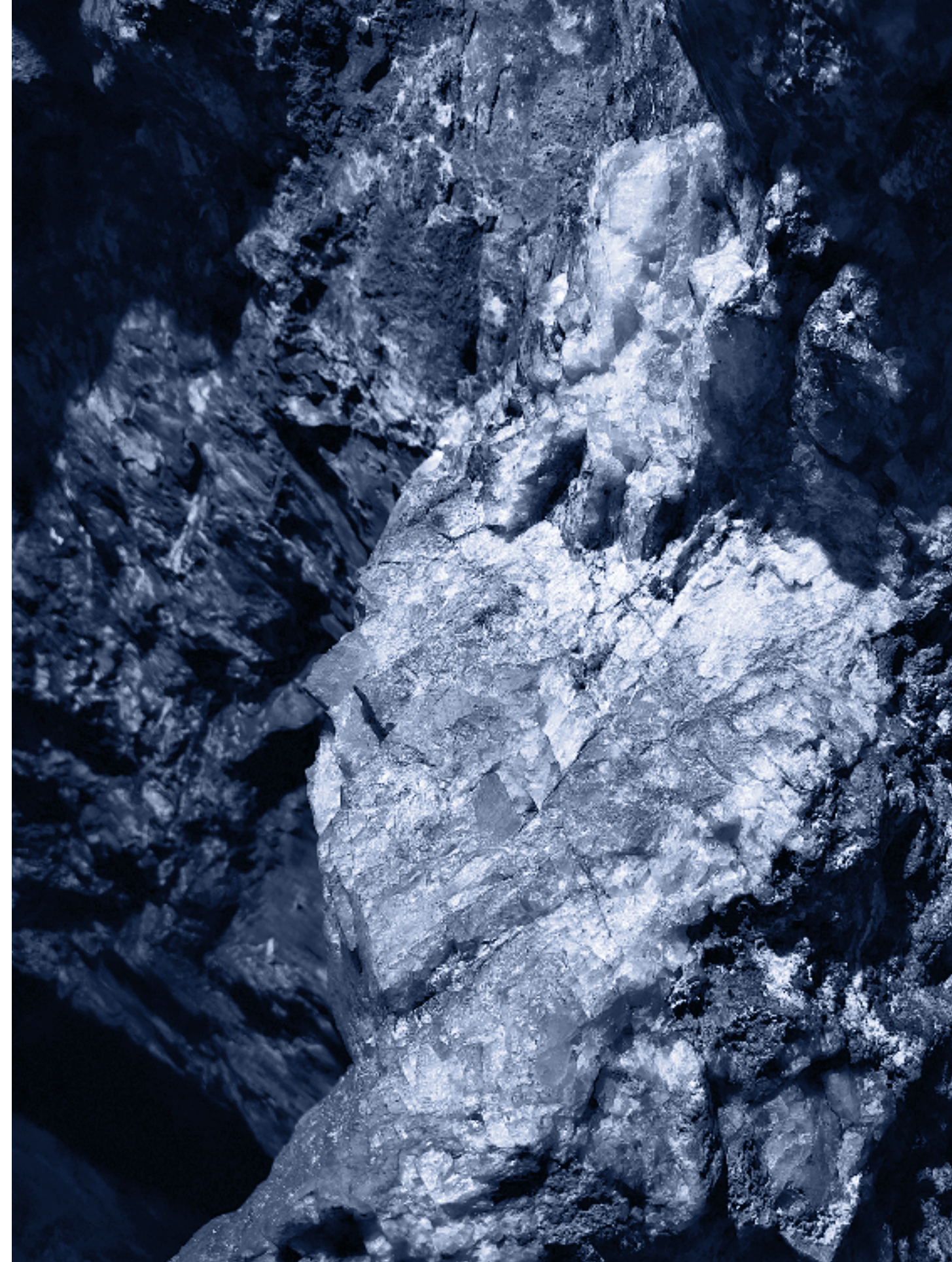
ello, las pérdidas en los sistemas electrónicos de potencia podrían reducirse aproximadamente a la mitad gracias a la introducción de semiconductores WBG (*Wide Bandgap*) de alta tensión, lo que conllevaría una disminución significativa de la cantidad de materiales necesarios, incluidas las materias primas críticas, y favorecería la miniaturización de dispositivos. La expansión de las redes de CC (corriente continua) hacia tensiones cada vez más altas, también reducirá los materiales necesarios para la expansión de la red, ya que son mucho más eficientes que las líneas de transmisión de CA (corriente alterna) con el mismo consumo de material. Además, las nuevas tecnologías para el aislamiento galvánico de media frecuencia de secciones de red pueden lograr ahorros de material superiores al 90% en comparación con los transformadores que operan a las frecuencias predominantes de 50/60 Hz¹⁴.

Otra línea de trabajo de la investigación química se dirige a sustituir los metales menos abundantes en la tierra, como el paladio o el platino, por otros más habituales como el cobalto o el manganeso. Esencialmente eso no supone más que pasar de una materia prima crítica a otra, en efecto, pero la disponibilidad de un elemento y la seguridad del suministro, que por lo general se asocia con el abastecimiento diversificado, son claves para mitigar el riesgo comercial. Sucede lo mismo con el fósforo, el silicio, el carbono, el aluminio y el titanio. Christina Wegeberg, profesora de la Universidad de Sur de Dinamarca, investiga si es posible utilizar el manganeso en la captación de luz y potencialmente en la conversión de energía solar. Su proyecto continúa la senda de otro anterior en el que se consiguió una vida útil del cromo en estado excitado de 50 nanosegundos.

El desarrollo de materiales fotoactivados también podría permitir a la industria realizar reacciones sintéticas complejas en condiciones suaves, aprovechando la energía de la luz solar, lo que abre nuevas posibilidades para la modificación de biomoléculas. Estas últimas, entre las que incluyen desde el ADN, a las proteínas o los carbohidratos, son estructuras muy delicadas y complejas. Las condiciones agresivas de la química tradicional pueden destruirlas o modificarlas de forma indeseada. Al poder realizar las reacciones en condiciones suaves gracias a los materiales fotoactivados, se pueden manipular y modificar de forma controlada y precisa, lo que tiene un gran potencial en campos como la medicina, la biotecnología y la farmacéutica. El mayor aporte de energía gracias a los materiales fotoactivados podría facilitar, asimismo, la descomposición de sustancias químicas indeseables que, de otro modo, serían difíciles de eliminar, como sucede en las aplicaciones de purificación de agua. En ese sentido, los derivados que contienen fósforo son frecuentes en muchas áreas de la vida cotidiana, entre ellas la medicina y el descubrimiento de fármacos, las ciencias de los materiales, en particular para las propiedades electrónicas, y la agricultura y la protección de cultivos¹⁵.

La innovación en el campo de los nuevos materiales puede incluir también desde el desarrollo de nuevas aleaciones a la creación de nuevos materia-

les compuestos y biomateriales sostenibles. En el primer caso, hay que actuar con prudencia, porque se ha demostrado que el riesgo de suministro aumenta con el número de elementos involucrados en la aleación y puede superar rápidamente al asociado al elemento que se busca reemplazar¹⁶. En el segundo caso, se estima que las soluciones del sector químico basadas en la naturaleza pueden contribuir hasta en un 37% a la reducción de emisiones necesaria para 2030¹⁷ y más del 40% de las inversiones en innovación circular están relacionadas con materiales de origen biológico o con el reciclaje de materias primas.



El salto de la química: del laboratorio al mercado

ESPAÑA

España es el tercer país de Europa con más recursos mineros¹⁸, con alrededor de 2.700 explotaciones activas que han consolidado la minería de metales como actividad principal. De ellas se extraen también otros materiales que pueden no ser críticos para la UE, pero tienen enorme relevancia para la economía española, desde minerales industriales (feldespato, magnesita, potasa, caolín, celestina, y arcillas especiales que incluyen atapulgita, sepiolita y bentonita), a rocas ornamentales (calizas y mármoles, granitos y pizarras de techar) y productos de cantera (yeso, margas, arenas y gravas).

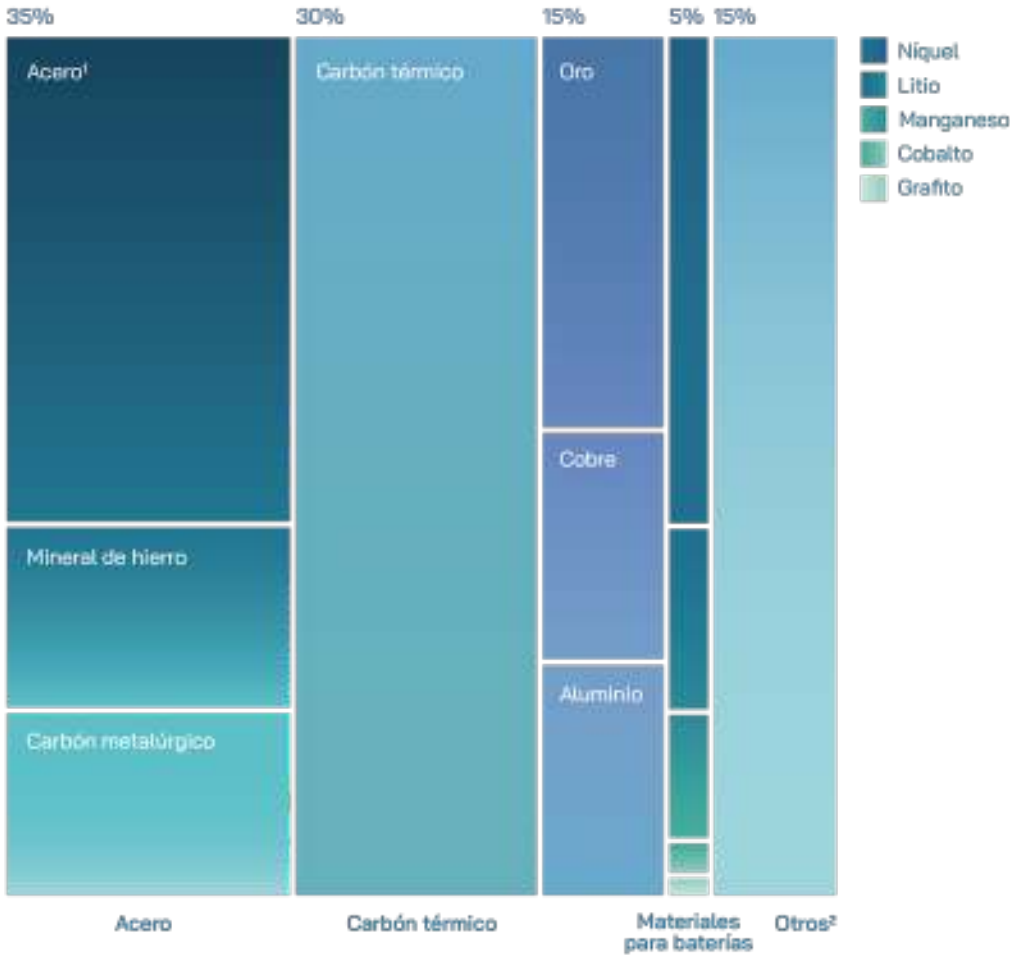
Un informe de la Oficina de Ciencia y Tecnología del Congreso destaca que España es el segundo productor de mineral de cobre y el único productor de estroncio dentro de la UE, responsable del 34% del suministro global de este metal a la UE. Nuestro país produce también feldespato, wolframio, silicio metal, espato flúor y tántalo, y cuenta con depósitos de antimonio, barita, bismuto, cobalto, litio y tierras raras, en su mayoría ubicados en el noroeste de la Península. En la Faja pirítica ibérica se encuentra, por su parte, la mayor concentración de sulfuros masivos. Para el futuro, España estudia alrededor de 40 proyectos de minería metálica en distintas fases de desarrollo o directamente paralizados. La capacidad de procesamiento y refinamiento de minerales se centra fundamentalmente en cobre, aluminio y zinc.

Por lo que se refiere a las líneas estratégicas relacionadas con los materiales avanzados, impulsadas desde el Gobierno central, aparecen tanto en la propuesta de Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en

Ingresos por materiales en el sector de metales y minería, 2023

Ingresos totales del sector de metales y minería:

4 billones de dólares



¹ Valor total del acero, excluyendo el mineral de hierro y el carbón metalúrgico. ² Los materiales más importantes en esta categoría incluyen ferro-cromo y potasa; también incluye todos los demás materiales del sector de metales y minería, como elementos de tierras raras (REE), metales menores, etc.

Fuente: McKinsey

2050 como en la Estrategia Española de Economía Circular, España Circular 2030. En ambos casos se promueve la reducción del consumo y el impulso de las actividades de reparación, reutilización y reciclado para que las materias primas secundarias puedan satisfacer una mayor parte de la demanda de minerales.

Siete comunidades autónomas se han integrado en el Programa de Materiales Avanzados. Se trata de Aragón, Cataluña, Castilla-León, Comunidad Valenciana, Madrid, País Vasco y Castilla-La Mancha¹⁹. Se comprometen a colaborar en materia de investigación e innovación para desplegar una estrategia conjunta de I+D+i basada en el fomento de las sinergias entre centros de investigación, centros tecnológicos y empresas. El programa contempla dos tipos de acciones interconectadas: en el ámbito de las acciones de investigación, propone el estudio de nanomateriales con funcionalidades avanzadas, entre otros, el grafeno y otros materiales 2D, los materiales inteligentes y los materiales nanoestructurados con aplicación directa en sectores estratégicos como la energía, el medio ambiente, la electrónica, las TICs o la salud. En cuanto a las acciones de integración y colaboración, las comunidades autónomas colaborarán en acciones de visibilización y difusión, de formación y de investigación e innovación conjuntas.

Entre los hitos recientes de nuestro tejido investigador destaca la colaboración internacional, dirigida por el profesor Dominik Kraus de la Universidad de Rostock y el Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, en la que participan profesores del ICMUV (Instituto de Ciencias de Materiales de la Universitat de València), que forma parte del Programa de Materiales Avanzados. El proyecto utilizó el láser de alto rendimiento DIPOLE 100-X para estudiar el carbono líquido en el European XFEL, el láser de rayos X más grande del mundo, lo que puede considerarse un logro sin precedentes.

Tecnologías futuras como la fusión nuclear podrían recurrir al carbono líquido, que se encuentra probablemente en el interior de los planetas gigantes helados. Se trata de un hito científico-tecnológico porque resultaba prácticamente imposible hasta ahora estudiarlo en el laboratorio a presión ambiental. Se necesitaba presión extrema y temperaturas enormes, de 4.500 grados centígrados, hasta que la compresión láser ha conseguido convertir

el carbono sólido en líquido durante fracciones de segundo en las que se podrán realizar mediciones.

En España, entidades como MATERPLAT, la Plataforma Tecnológica Española de Materiales Avanzados y Nanomateriales, que representa a más de 250 organizaciones, se encargan de impulsar la I+D de materiales avanzados, con iniciativas como el Plan Complementario de Materiales Avanzados, enfocado en nanomateriales como el grafeno para energía, salud, electrónica y medio ambiente. Por su parte, instituciones como el Sincrotrón ALBA e ICN2 organizan también la Conferencia de Materiales Avanzados en España. La primera de ellas alberga la nueva infraestructura de investigación InCAEM (Instalación correlativa in situ para materiales energéticos avanzados) en la que están implicados también centros como ICN2, ICMAB-CSIC e IFAE-PIC.

Relación de notas

¹ Feringa, B., García Martínez, J., et al. (2025) ‘Declaración de Estocolmo sobre la química del futuro’. Estocolmo: Committee of the Nobel Symposium and Stockholm University Center for Circular and Sustainable Systems (SUCCeSS) (Consultado el 18/06/2025).

² Will Beacham, Corinne de Berry, “Cracker closures: facing the inevitable”, ICIS, n. d.

³ 2025 Chemical Industry Outlook, Deloitte, 4 de noviembre de 2024

⁴ David Yankovitz et al., “The future of materials”, Deloitte, 2 de junio de 2023, consultado el 10/05/2025

⁵ Joost M. van Gaalen, J. Chris Slootweg, From Critical Raw Materials to Circular Raw Materials, ChemSusChem, 22 de octubre de 2024, consultado el 08/05/2025

⁶ <https://eitrawmaterials.eu/position-fp-10>

⁷ A Circular European Critical Raw Materials Management System: The 2023 Playbook, Circular Innovation Lab, 2023.

⁸ Nathan Baker, “Unlocking a new era for scientific discovery with AI: How Microsoft’s AI screened over 32 million candidates to find a better battery”, Microsoft, 9 de enero de 2024, consultado el 09/05/2025

⁹ Amil Merchant et al., Scaling deep learning for materials discovery, Nature, 29 de noviembre de 2023, consultado el 09/05/2025. doi.org/10.1038/s41586-023-06735-9

¹⁰ Mario Draghi, “The future of European competitiveness”, Comisión Europea, septiembre de 2024

¹¹ Juan Merlini, Ricardo Monte Alto, “Metals for mobility: How mining can meet electric vehicle demand and support the energy transition”, World Economic Forum, 12 de febrero de 2025

¹² Jan Merten et al. From emissions to resources: mitigating the critical raw material supply chain vulnerability of renewable energy technologies, Mineral Economics, 20 de febrero de 2024, consultado el 09/05/2024, doi.org/10.1007/s13563-024-00425-2

¹³ Materials for Energy Storage and Conversion A European Call for Action, EIT Raw Materials, ERMA, Comisión Europea, 2023

¹⁴ “Securing sustainable critical raw material supply for clean energy in Europe”, EERA, 2023

¹⁵ Yumeng Yuan, Christophe Darcel, Earth Abundant Transition Metal Catalysts: New and Efficient Tools for Hydrophosphination and Oxyphosphination of Alkenes and Alkynes, ChemCatChem, 27 de mayo de 2024, doi.org/10.1002/cctc.202400703

¹⁶ François Rousseau et al. Is alloying a promising path to substitute critical raw materials?, Materials Today, abril de 2025, doi.org/10.1016/j.mattod.2025.01.015

¹⁷ “Nature Positive: Role of the Chemical Sector”, World Economic Forum, Oliver Wyman, abril de 2024

¹⁸ “Materiales y materias primas críticas en la transición energética”, Oficina de Ciencia y Tecnología del Congreso, 29 de octubre de 2024, doi.org/10.57952/gbrz-xn19

¹⁹ <https://www.materialesavanzados.es/>

02 Sistemas de Salud gestionados por inteligencia artificial



Introducción

Todos los días miles de personas acuden a los centros de salud repartidos por España. Allí, se les realizan distintas pruebas, se ofrece un diagnóstico y un tratamiento. Pero al igual que otros muchos aspectos de la vida, la inteligencia artificial (IA) está transformando el sistema de salud, ofreciendo nuevas herramientas para mejorar el diagnóstico, el tratamiento y la vigilancia epidemiológica. Desde el surgimiento de modelos de lenguaje avanzados como ChatGPT y Med-PaLM, la IA ha demostrado su capacidad para superar exámenes médicos y potenciar la medicina personalizada. Entre sus principales aplicaciones destacan el diagnóstico de enfermedades, el pronóstico de su evolución, la evaluación de riesgos y la optimización de tratamientos, especialmente en enfermedades crónicas y casos complejos.

En el conjunto del sistema sanitario, la IA puede contribuir en áreas como la vigilancia epidemiológica, ayudando a detectar patrones de brotes y modelar la evolución de las epidemias. En España, donde el sistema de salud es reconocido como uno de los mejores del mundo, la integración de la IA se está fortaleciendo con iniciativas como la Estrategia de Salud Digital 2021-2026, que busca optimizar el uso de datos médicos y fomentar la interoperabilidad entre países europeos. Esto permite entrenar modelos de IA con datos diversos, aumentando su capacidad predictiva y robustez.

En conclusión, la IA promete ser una aliada esencial en el sistema sanitario, no para sustituir a los profesionales, sino para trabajar en sinergia con ellos, optimizando procesos y mejorando los resultados médicos y la atención al paciente. El avance en su integración depende de un uso ético y responsable de los datos, así como de la colaboración entre instituciones y países para maximizar sus beneficios.

Un cerebro artificial para impulsar la sanidad

POR DENTRO

La Inteligencia Artificial (IA) es una tecnología que se ha ido adentrando en distintos aspectos de la vida. A partir de 2022, tras el despegue de los modelos de lenguaje de gran tamaño (LLM por sus siglas en inglés), de la mano de ChatGPT, hemos podido observar cómo cada vez aparecen más y más empresas e instituciones que se suben al carro de la IA para mantenerse a la vanguardia de la era moderna. Ahora bien, como con cualquier tecnología, para aplicar la IA de una forma que realmente ofrezca un beneficio para la sociedad primero es necesario estudiar de forma muy concienzuda los lugares en los que pueda suplir carencias actuales. Es decir, que para no malgastar las capacidades de la IA es importante conocer tanto sus ventajas como sus limitaciones.

Estas capacidades son especialmente interesantes en la atención médica. En una visita a un hospital, los médicos recogen una gran cantidad de datos de los pacientes, los comparan con aquel conocimiento que han adquirido u otros casos similares, y tras un razonamiento ofrecen el diagnóstico más probable. Este flujo de trabajo es también uno de los puntos fuertes de la IA: recopilar datos, compararlos con su base de información, y ofrecer una respuesta coherente. Por tanto, con solo un vistazo se puede vislumbrar el potencial de estos sistemas para mejorar la atención médica y los resultados sanitarios.

Aún más interesante es que, ya en junio de 2022, ChatGPT 3.0 superó exitosamente (con más de un 60 %) algunos de los exámenes para la obtención de la licencia médica de los Estados Unidos sin ningún tipo de refuerzo especializado¹. Esto se consideró un hito, ya que la prueba consta de casos clínicos que pueden ser complejos y

que requieren de una comprensión de la unión de distintos factores. Tan solo 5 meses más tarde, en julio de ese mismo año, Google presentó Med-PaLM², un sistema LLM que conseguía superar consistentemente los exámenes con alrededor de un 65%. Y en 2023 presentó Med-PaLM2, que no sólo supera el examen, si no que sus resultados rondan el 86,5% de acierto³, un resultado sólo al alcance de los mejores estudiantes o personas expertas.

Pero sustituir a todos los médicos por una IA no es, desde luego, una opción sensata. Para aprovechar todos los pros de esta tecnología se ha de optimizar el proceso de integración en distintos aspectos que creen la mejor sinergia entre los profesionales sanitarios y la IA. En concreto, algunos expertos⁴ han detectado 8 áreas de interés en las que la IA podría ayudar directamente a los profesionales sanitarios con su trato con el paciente.

1. Diagnóstico: La IA podría ayudar a predecir la presencia o ausencia de enfermedades como lo haría un médico. Para ello, puede basarse en síntomas, pruebas, el historial del paciente u otros datos relevantes. Estas predicciones diagnósticas permiten encontrar un tratamiento a tiempo para hallar la cura de la enfermedad.
2. Pronóstico: Además del diagnóstico, gracias a su enorme base de datos, los modelos pueden ayudar a predecir tanto la evolución como el desenlace probable de una enfermedad. Este tipo de predicciones permiten comprender el progreso de la enfermedad con o sin el tratamiento, así como si existen posibles complicaciones a tener en cuenta.
3. Evaluación de riesgos: Las IAs pueden recopilar datos del paciente como la genética, el estilo de vida, su exposición a factores ambientales y otros problemas de salud. De este modo, podrían lograr predecir la probabilidad de que un paciente desarrolle una enfermedad en un futuro y actuar al respecto antes de que la desarrolle.
4. Respuesta al tratamiento: Una de las ideas más interesantes en las que se pueden emplear los modelos de IA es para potenciar la medicina personalizada. Con los datos de cada paciente, especialmente los genéticos, se pueden establecer dosis de fármacos mucho más precisas que tienen en cuenta factores genéticos o metabólicos de cada paciente. De este modo, adaptando el tratamiento a cada paciente, se puede maximizar su beneficio minimizando el riesgo.
5. Evolución de la enfermedad: En enfermedades crónicas, como la diabetes, o trastornos neurológicos, es crucial predecir cómo va a evolucionar la enfermedad a lo largo del tiempo para poder prever necesidades asistenciales. La IA podría hacer el papel del planificador de estrategias para distintos escenarios y, de nuevo, personalizar el tratamiento para cada persona.

La IA va a resultar decisiva en implantar soluciones sanitarias personalizadas y más precisas. En primer lugar, al realizar los diagnósticos mucho más rápidamente y con mayor eficiencia, y en segundo lugar en los tratamientos que tendrán en cuenta la singularidad del paciente. Por otra parte, estos métodos supondrán un importante ahorro en los costes. La IA también podría contribuir a evitar las desigualdades en materia de salud mitigando la vulnerabilidad de determinados grupos sociales.

Manuel de León

- 6. Riesgos de reingreso: Con todos los datos anteriores, las IAs también podrían ayudar a identificar a aquellos pacientes que tienen una mayor probabilidad de reingreso. Así, tanto profesionales sanitarios, como hospitales en su conjunto pueden estar preparados para actuar de forma efectiva ante las recaídas.
- 7. Riesgos de complicaciones: En todo procedimiento médico existe riesgo de complicaciones. Identificarlas, detectarlas, y tratar de encontrar un remedio para que ocurran con menor frecuencia podría ser un campo interesante para la IA.
- 8. Predicción de la mortalidad: Por último, la IA también podría predecir el riesgo de mortalidad de los pacientes ante una enfermedad. De este modo, podría ayudar a tomar decisiones relativas al tratamiento, así como a planificar los cuidados paliativos que se ofrecen al paciente al final de la vida.

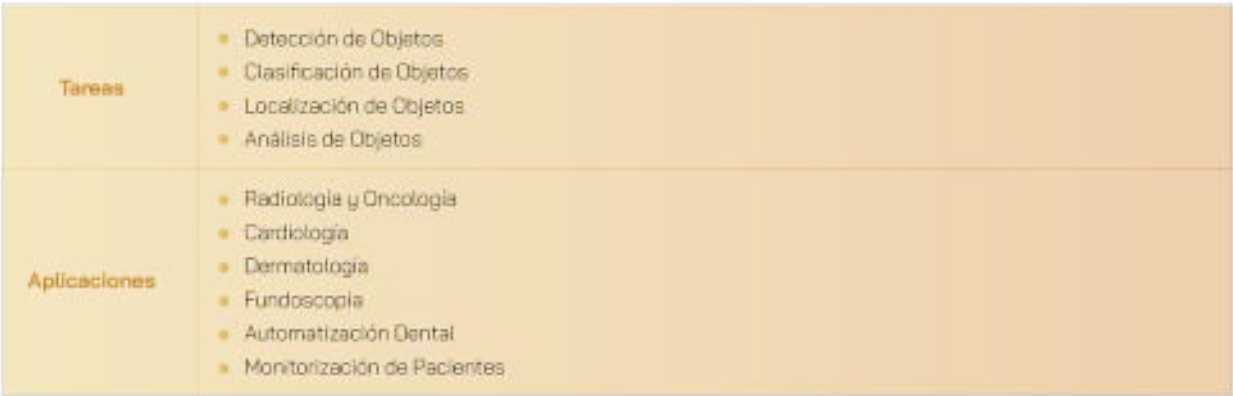
Pero estos usos únicamente tienen en cuenta los potenciales beneficios de la IA en la consulta médica. Es decir, se trata de una especie de compañero que puede echar un cable al médico o indicar que se le ha pasado algo por alto.

Por último, uno de los puntos clave del sistema sanitario es el desarrollo de medicamentos. En estos, las empresas farmacéuticas utilizan cada vez más herramientas de IA en las fases de I+D. Por ello, la EMA ha establecido en mayo de 2025 una hoja de ruta para la gestión, el análisis y el intercambio de datos médicos a través de un documento llamado «*Seizing opportunities in a changing medicines landscape*» Sopesando las oportunidades en un panorama médico cambiante⁵. La idea es establecer también un marco de coordinación para abordar las nuevas iniciativas legislativas en la Unión Europea.

En el sistema de salud intervienen muchos otros actores sin cuyo trabajo, lo más probable es que nada de lo anterior funcionase. Un claro ejemplo son los epidemiólogos, que se encuentran revisando constantemente los casos de ciertas enfermedades para contener posibles brotes y alertar a los centros y ciudadanos



Los datos de la inteligencia artificial en la Sanidad



DESAFÍOS COMUNES



Fuente: Biotechnology Notes

de los riesgos. En España, este trabajo recae sobre la Red Nacional de Vigilancia Epidemiológica (RENAVE)⁶, coordinada desde el Centro Nacional de Epidemiología del Instituto de Salud Carlos III (ISCIII). Para facilitar su labor, una IA especializada en detectar estos patrones podría permitir detectar de forma temprana y establecer directrices en los momentos cruciales de las futuras epidemias y pandemias: sus inicios. Además, permitirían realizar modelos de predicción de la evolución de los contagios, así como ayudar en el desarrollo de vacunas y medicamentos.

Como indican desde el Ministerio de Sanidad, la pandemia de COVID-19 puso de manifiesto la existencia de ciertas debilidades y deficiencias en la vigilancia en salud pública. Especialmente ante casos excepcionales como los acontecidos durante la pandemia. Por ello, se están llevando a cabo una serie de transformaciones aprendidas a partir de los errores del pasado y que están pensadas para responder ante riesgos presentes y futuros. En el Gráfico 1 se repasa el distinto tratamiento que se puede hacer de los datos para impulsar esas iniciativas.

En el decálogo establecido por el encuentro de profesionales de vigilancia en salud pública para avanzar en el desarrollo de la Estrategia de Vigilancia en Salud Pública en 2023⁷, se puede leer que el eje central debería ser la historia electrónica. Muchas de estas historias están normalizadas, es decir, siguen los mismos patrones. Sin embargo, todavía quedan algunos centros en los que no ha sido posible (por falta de recursos o por otros motivos) seguir los patrones de otros hospitales. Ahora bien, la normalización no es sólo buena para los centros. Tener datos ordenados de una forma consistente, puede servir como primera piedra para una correcta entrada de asistentes virtuales basados en IA que puedan ayudar con los análisis de datos epidemiológicos.

En el caso concreto de nuestro país, este refuerzo en la vigilancia es crítico, puesto que están apareciendo nuevas enfermedades que amenazan a la salud de las personas. Como ya hemos podido observar en los últimos años, debido al cambio climático y al establecimiento de especies tropicales, enfermedades otrora erradicadas como la malaria⁸, la rickettsiosis⁹ o la tripanosomiasis africana¹⁰ podrían ser vez más frecuentes. En este escenario es crucial mantenerlas vigiladas

para conocer el nivel de riesgo, los puntos calientes, y poder emitir alertas tempranas ante cualquier caso. Además, también es necesario seguir con el desarrollo normativo para regular la red de vigilancia a nivel estatal y de las comunidades autónomas.

Compartiendo datos médicos entre países de una forma ética y responsable, las IA podrían entrenarse con poblaciones y condiciones más diversas, aumentando así su robustez y su capacidad de acierto en cualquier cuestión médica. Así, también podrán alertar de posibles brotes epidemiológicos que puedan transmitirse rápidamente a los países colindantes y avisar a los centros de salud para que puedan diseñar estrategias ante cualquier contratiempo.

Para lograr implementar las herramientas, lo primero es crearlas y, para ello, cientos de investigadores se encuentran desarrollando y entrenando modelos de IA que permiten hacer en segundos lo que a una persona le llevaría décadas. Este es el caso del Laboratorio de Genómica Biomédica, liderado por la investigadora ICREA Dra. Núria López-Bigas en el Parc Científic de Barcelona. En el laboratorio, han desarrollado una herramienta computacional que identifica las mutaciones que producen cáncer en cada tipo de tumor. De este modo, pueden personalizar la terapia para cada tipo de paciente y elegir el tratamiento con mayor probabilidad de éxito para las mutaciones concretas de cada tumor.¹¹

La herramienta, llamada BoostDM, también es capaz de simular cada posible mutación dentro de cada gen e indicar cómo puede evolucionar, consiguiendo que los oncólogos vayan uno (o varios) pasos por delante del cáncer y, así tomar las decisiones pertinentes.

La IA también se está utilizando en la actualidad para facilitar la interpretación de radiografías. Concretamente, desde el mes de abril de 2025 están participando en una investigación piloto la mayoría de los hospitales de la Comunitat Valenciana. La imagen, tras ser analizada por IA, siempre la interpreta y visualiza un facultativo, que es quien toma la decisión. Para garantizar la validez de este algoritmo la validación se realizó en dos fases. La primera consistió en un estudio retrospectivo donde se fueron seleccionando imágenes que ya habían sido analizadas y diagnosticadas por radiólogos para que las leyera la inteligencia artificial y, de este modo, poder hacer una comparativa de su eficacia. Posteriormente, en el estudio prospectivo, corroboraron estos resultados en la práctica asistencial.

Los resultados hablan por sí mismos: la IA logró más de un 90% de fiabilidad y, aún más importante, un alto valor predictivo negativo. Esto quiere decir que, si la IA no detecta ninguna patología, hay una probabilidad minúscula que se equivoque¹².

El Gráfico 2 repasa las distintas aplicaciones de la IA para mejorar el sistema sanitario. También se está utilizando para reducir la burocracia que limita la

actividad de los médicos. En el caso de la comunidad de Madrid, se está estudiando la posibilidad de implementar en 2026 una herramienta que reduciría en hasta un 70% el tiempo que dedican los profesionales sanitarios a rellenar informes, formularios y documentos. La idea es sencilla: en cada consulta, una IA escuchará la conversación entre el médico y el paciente e irá transcribiendo los datos relevantes en un documento. Para garantizar la privacidad, los audios no se almacenarán, sólo el documento transcrito con las palabras relevantes. El objetivo tras esta idea es optimizar el trabajo del personal clínico y buscar por un lado reducir el tiempo dedicado a introducir información manualmente en la Historia Clínica Electrónica y así mejorar la atención del profesional.¹³

Por tanto, al igual que en otras partes de nuestra vida, no será raro ver como la IA va abriéndose un hueco en nuestro sistema de salud. La IA en sanidad ofrece todo un mundo de posibilidades que explorar, un mundo en el que, primero se requiere inteligencia real que busque dónde esta compañera es realmente útil. De aplicarla correctamente, podemos afirmar sin miedo a equivocarnos que estamos en el principio de una revolución. Una revolución que promete remodelar y hacer más accesibles los recursos de los que disponemos para disminuir el trabajo tedioso y superfluo y aportar valor a todas y cada una de las horas que dedican los profesionales sanitarios a su trabajo. Es decir, la IA en sanidad promete ser esa compañera a la que acudes cuando hay problemas, para pedirle consejos y que ofrece soluciones basadas en una enorme cantidad de datos que tiene en sus cabeza silícea, comúnmente conocida como "servidores".



Casos de uso reales de la IA en salud

Fuente: World Economic Forum

¹ El reconocimiento de imágenes médicas es un área de rápido crecimiento, con empresas que van desde startups hasta grandes corporaciones que desarrollan herramientas para ayudar en el diagnóstico y la interpretación de imágenes radiológicas, patológicas y dermatológicas.

	Caso de uso	Descripción	Ejemplos de empresas
FIRMAS FARMACÉUTICAS	Descubrimiento y diseño acelerados de fármacos	Analiza millones de moléculas y posibles interacciones con proteínas para desarrollar nuevos medicamentos.	Atomwise, Exscientia, Absci, Profluent
	Planificación y ejecución de ensayos clínicos	Mejora el diseño, la ejecución y el análisis de los ensayos clínicos.	Owkin, Saama Technologies, AICure
	Medicina de precisión	Proporciona a los clínicos una oportunidad de adaptar específicamente los tratamientos a cada individuo.	BERG Analytics, AstraZeneca
PROVEEDORES	Detección de pacientes	Utiliza la IA para analizar patrones de voz y clasificar grabaciones de tos y analizar de forma no invasiva las anomalías para el diagnóstico clínico.	Canary Speech, Clarigent Health
	Procesamiento automatizado de documentos	Automatiza procesos como la documentación de reclamaciones, la codificación, la preautorización y las apelaciones, la incorporación de pacientes y la programación.	Augmedix, DeepScribe, Nuance, Doximity
	Reconocimiento de imágenes médicas ¹	Utiliza el aprendizaje profundo y la categorización de imágenes médicas para una interpretación de imágenes más rápida y precisa.	PathAI, DIA Imaging Analysis, Aidoc
	Interoperabilidad de EHR	Mejora la interoperabilidad entre diferentes registros electrónicos de salud (EHR) y sistemas, permitiendo una mejor gestión y un mejor intercambio de datos de pacientes para la continuidad de la atención.	Epiq, eClinicalWorks
USUARIOS DE ATENCIÓN MÉDICA	Atención médica preventiva	Identifica y gestiona proactivamente a las personas con alto riesgo de hospitalización.	ConcertAI
	Automatización del procesamiento de reclamaciones	Detecta fraudes en reclamaciones mediante la búsqueda de diferentes factores de reclamaciones procesadas previamente.	UIPath, H2O.ai
MEDTECH	Diseño de productos generativos	Optimiza el diseño de dispositivos médicos, adaptándolos a las necesidades individuales de los pacientes.	National Centre for Additive Manufacturing
	Identificación de riesgos en la cadena de suministro y procesamiento de aumento	Mejora la gestión de la cadena de suministro.	thoughtful AI, IQVIA, UIPath
OPERACIONES Y SERVICIOS	Generación de datos sintéticos	Genera datos sintéticos de atención médica con modelos de aprendizaje automático.	Syntegra, Google EHR-Safe
	Seguimiento y reabastecimiento de inventario	Optimiza la gestión de inventario de atención médica.	IDENTI Medical
	Interoperabilidad de datos/uso compartido	Permite el uso seguro y el intercambio de datos sensibles	Vellai, Arcadia
	Servicios en la nube de GenAI	Desarrolla servicios de IA generativa a medida para el cuidado de la salud	Google Med-PaLM 2
AGENCIAS DE SALUD PÚBLICA	Vigilancia de la salud pública	Desarrolla sistemas de alerta temprana para pandemias	InstaDeep
	Asignación y uso de recursos	Utiliza datos para informar las decisiones de políticas públicas	CDC

La nueva era de colaboración médico-máquina

EN ACCIÓN

Con 4.500 millones de personas sin acceso a servicios de salud esenciales, la inteligencia artificial (IA) podría ayudar a cerrar la brecha, pero la atención médica está por debajo de la media en adopción de IA en comparación con otros sectores. En el Reino Unido, donde alrededor de 350.000 personas son trasladadas en ambulancia al hospital cada mes, un estudio ha revelado que, en el 80% de los casos, la IA podía predecir correctamente qué pacientes debían ser transportados¹⁴. Se espera que la IA generativa en el mercado de la atención médica alcance los 2.700 millones de dólares en 2025 y llegue cerca de los 17.000 millones en 2034¹⁵. Los servicios de salud experimentarán una transformación fundamental y pasarán de ser sistemas centrados en la información a plataformas de soluciones para la automatización, una revolución que marcar inevitablemente los enfoques operativos del futuro en múltiples sectores.

En los próximos cinco años, la IA tendrá el potencial de transformar la preparación para las pandemias y de predecir el impacto de los brotes de enfermedades en pacientes individuales. Los avances recientes en metodologías de IA funcionan cada vez mejor, incluso con datos limitados, lo que representaba un importante obstáculo para su adopción hasta la fecha, y abre nuevas posibilidades tanto en países de ingresos altos como de bajos ingresos¹⁶. No obstante, habrá que superar las dificultades que todavía frenan su expansión cuando se requiere una gran cantidad de contexto¹⁷ para crear pronósticos epidémicos más completos y precisos¹⁸. Las redes orgánicas y sociales, desde los sistemas inmunitarios humanos hasta la movilidad poblacional, son por definición adaptativos, y cualquier perturbación afecta a la precisión de las predic-

ciones. Se necesitarán nuevos tipos de IA y nuevos enfoques que superen a las visiones compartimentadas.

Un avance notable, en el punto de convergencia entre las posibilidades que abren las tecnologías de IA y la realidad dinámica sobre la que se tienen que aplicar, es la aparición de los Sistemas de Gestión de Automatización Regulatoria (RAMS), que están a punto de sustituir a los Sistemas de Gestión de Información Regulatoria (RIMS) tradicionales en Estados Unidos. Gracias a ellos, empresas como Weave Bio y Collate están consiguiendo reducir los tiempos de procesamiento de documentos de la Food and Drug Administration (FDA) de EEUU de meses a tan solo días¹⁹.

Por su parte, el Espacio Europeo de Datos de Salud (EEDS)²⁰ se presenta como un pilar clave de la futura Unión Europea de la Salud²¹ y abre un amplio abanico de oportunidades para la implantación de nuevas soluciones de IA que ayuden a mejorar la gestión del sistema. Es el primero que surge dentro de la Estrategia Europea de Datos²², entró en vigor en 2025 y promueve el intercambio de información para la asistencia sanitaria en toda la UE, al tiempo que fomenta un auténtico mercado único de sistemas de historia clínica electrónica (HCE) y crea un modelo fiable para reutilizar los datos de salud en investigación, innovación, formulación de políticas y reglamentación.

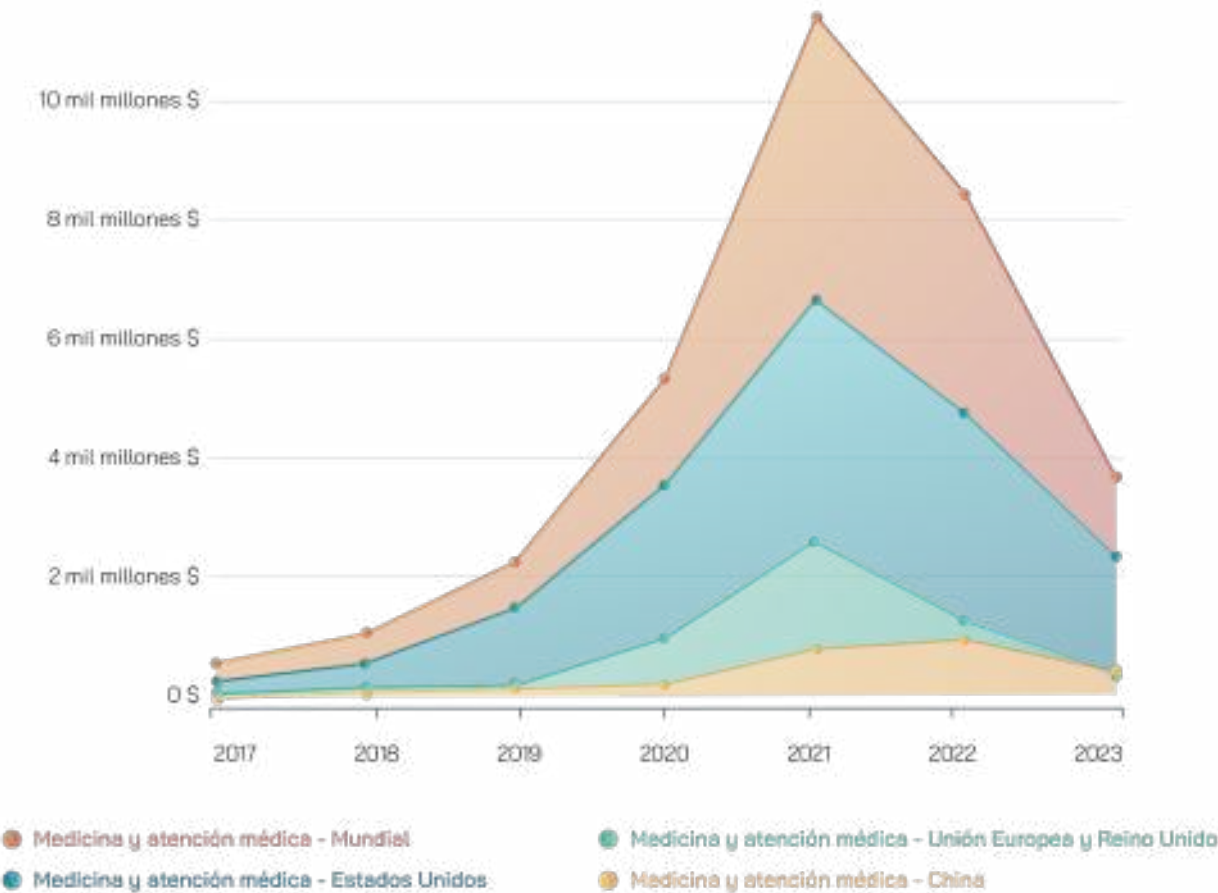
Para facilitar la implantación de la IA, se verá complementado por las infraestructuras de datos especializadas (como 1+Million Genomes, Cancer Image Europe o EOSC-Life), junto con la red de computación de alto rendimiento que impulsa Europa. Hasta 39 entidades de la comunidad sanitaria de la UE celebraron en un comunicado conjunto la publicación del EEDS²³. Según dijeron, es fundamental para evitar burocracia y carga de trabajo innecesarias a los proveedores y profesionales sanitarios, así como para superar las interpretaciones fragmentadas de la legislación. Se complementa, con la Recomendación sobre un Formato de Intercambio de Historiales Clínicos Electrónicos Europeos (EEHRxF) establece el marco para lograr un acceso a la información seguro, interoperable y transfronterizo²⁴.

La Comisión Europea prevé que el mejor acceso e intercambio de servicios de salud produzca un ahorro todavía discreto, de 5.500 millones de euros durante diez años. Aún quedan varios desafíos para garantizar la implementación eficaz y eficiente de las herramientas de IA y ampliar su adopción equitativa y justa en la práctica clínica. La iniciativa AICare@EU está diseñada precisamente para eliminar las principales barreras y el Proyecto SHAIPEd, desarrollado con fondos europeos, pilota la validación y la implementación de modelos y herramientas de IA utilizando la infraestructura del EEDS. Además, la Comisión Europea apoya a los Estados miembro en la planificación del personal sanitario, con el fin de retener a los profesionales y de perfeccionar y reciclar a las plantillas, en el marco del Pacto por las Capacidades.

Las estrategias de IA en salud deben articularse, asimismo, asumiendo que

Inversión privada anual en inteligencia artificial en Medicina y Atención médica

Incluye empresas que recibieron más de 1,5 millones de dólares en inversión. Estos datos se expresan en dólares estadounidenses, ajustados por inflación.



Nota: Los datos se expresan en dólares estadounidenses constantes de 2021.

Fuente: OurWorldinData

los hospitales y los sistemas sanitarios se enfrentan a una ola creciente de ciberataques impulsados por el alto valor económico de los datos de los pacientes, incluidos los HCE. El sector sanitario se ha convertido, de hecho, en el más atacado de la UE en los últimos cuatro años, incluso durante la pandemia de COVID-19²⁵. El 71% de los asaltos informáticos con efectos en la atención al paciente, como retrasos en el tratamiento y el diagnóstico, y dificultades para acceder a los servicios de urgencia, son de tipo ransomware²⁶. En ese sentido, hay que ser conscientes de que, conforme se expande la digitalización (una media del 79% de los ciudadanos de la UE tiene acceso *online* a sus historiales médicos electrónicos en atención primaria²⁷) crece la superficie de ataque. Si se suman los sistemas de información clínica, los sistemas de flujo de trabajo hospitalario, los sistemas de imagen médica y los dispositivos utilizados con fines de diagnóstico o para la monitorización de pacientes, el abanico de objetivos potenciales de un ataque de ciberseguridad resulta inmenso.

La Asociación Médica Estadounidense suele referirse a la “inteligencia aumentada” para enfatizar que la finalidad de la IA debe ser asistir y no sustituir a los profesionales sanitarios, que siguen siendo necesarios para proporcionar contexto clínico a los algoritmos y para traducir sus hallazgos en decisiones en beneficio de para los pacientes. No obstante, algunos usos de la IA en el ámbito sanitario siguen fuera del ámbito de la FDA en ese país, debido a que cierto software está excluido de la definición de dispositivo médico²⁸. Lograr un ecosistema de gobernanza exitosa de la IA es, en definitiva, uno de los grandes desafíos a los que se enfrentan los sistemas nacionales de salud. Requiere de una comprensión detallada de las competencias y capacidades de los diferentes actores, el establecimiento de marcos de actuación y la asignación de responsabilidades a entidades con la capacidad operativa necesaria²⁹. Quizás por ello, como muestra el Gráfico 3, los inversores están mostrando dudas después del alza de interés suscitado tras el COVID-19.

La gobernanza de la IA constituye, de hecho, un concepto relativamente nuevo para los sistemas de salud³⁰. Implica revisar y evaluar las herramientas individuales de IA para garantizar que se puedan utilizar de forma segura y eficaz, y que cumple la legislación aplicable. Un estudio sobre apenas seis sistemas de salud en Estados Unidos detectó que algunos habían integrado la gobernanza de IA junto a la del resto de herramientas de software; otros diseñaron un proceso de gobernanza completamente independiente; y otros adoptaron un enfoque híbrido. Cuando el fiscal general de California, Rob Bonta, solicitó por carta a los CEO de los hospitales de su Estado, en septiembre de 2022, que le enviaran una lista de todas las herramientas de software que utilizaban, pudo comprobar la clara necesidad de un inventario centralizado y un sistema de evaluación estandarizado.

Los sistemas de IA inevitablemente absorben y perpetúan la infrarrepresentación de ciertos grupos o los sesgos de género en el tratamiento de los datos con los que se alimentan. Una IA utilizada en varios sistemas de sa-

La IA aplicada a los sistemas de salud no es un accesorio tecnológico, es el motor para pasar de un modelo reactivo a uno preventivo y personalizado. Desde la estratificación de riesgo poblacional hasta la detección temprana en imagen médica, la priorización de listas de espera y la coordinación del paciente crónico, la IA permite liberar tiempo clínico, reducir ineficiencias y mejorar resultados en salud. Para España, con un SNS universal y tensionado, esto significa más calidad con recursos finitos y una capacidad real de orientar recursos donde generan mayor valor.

(...)

|

Andrés Pedreño

lud de Estados Unidos mostró sesgo al priorizar a los pacientes blancos más saludables sobre los pacientes negros más enfermos para la gestión de cuidados adicionales. Había sido entrenada con datos de costes, no con datos de necesidades de atención.³¹ Si no se adoptan las precauciones oportunas, los algoritmos pueden predecir menores riesgos para la salud en poblaciones que históricamente han tenido menos acceso a los servicios de salud, no porque sean más saludables, sino porque hay menos uso documentado de la atención médica. A ello se suma el cambio climático, que está exacerbando las desigualdades sociales y sanitarias existentes, al aumentar la vulnerabilidad a la aparición y resurgimiento de enfermedades infecciosas como la malaria, el dengue y el zika³². Existe, en fin, una necesidad crítica de científicos de datos en los sistemas de salud, a los que se les podría pedir un “Juramento del Científico de Datos”, similar al Juramento Hipocrático, que consagre su compromiso específico para abordar el sesgo algorítmico³³. Soluciones de blockchain específicas para los sistemas de salud basados en IA ofrecen una solución para los problemas de privacidad y seguridad que frenan la adopción generalizada de aplicaciones de IA en la atención médica³⁴.

Los sistemas de salud se enfrentan a tres desafíos al abordar el sesgo algorítmico: la falta de definiciones claras y de un estándar de imparcialidad; la insuficiente especificidad contextual; y la naturaleza de “caja negra” de los algoritmos³⁵. Los científicos de datos, los médicos y los pacientes desean, necesitan y tienen derecho a saber cómo produjo un resultado o predicción en particular un algoritmo. Al mismo tiempo, los equipos que desarrollan las aplicaciones IA deben ser conscientes de las especificidades del contexto del sistema de salud, así como de las diferentes expectativas de los distintos grupos, para evitar el incurrir en sesgos comprometiendo lo mínimo posible la velocidad de implantación.

El hecho es que, a pesar del auge de la IA médica (la FDA de EEUU había autorizado 1.016 dispositivos de IA para uso clínico hasta septiembre de 2024³⁶), persisten las dudas sobre su uso rutinario que van más allá de las limitaciones técnicas y se centran en la confianza, no solo en las herramientas de IA, sino también en sus creadores. La “IA explicable” sigue siendo, por eso, una prioridad política³⁷, en la medida en que las herramien-

tas digitales pueden perpetuar las desigualdades sistémicas dentro de las sociedades si no se diseñan y valida con equidad.

Una encuesta del Pew Research Center descubrió que el 60% de los adultos estadounidenses, en todos los grupos demográficos, expresan incomodidad con la idea de que su proveedor de atención médica dependa de la IA³⁸. En Europa, los pacientes no quieren que su atención se subcontrate a un algoritmo “cortado por tijera” en lugar de guiarse por la experiencia humana³⁹. Se pide apoyo a la innovación tecnológica europea y una mayor integración de la IA en los centros sanitarios, que garantice una atención y un diagnóstico fiables, seguros y eficaces⁴⁰.

La IA puede automatizar tareas para liberar tiempo y permitir que los médicos se centren más en sus pacientes, “humanizando” la atención de nuevas maneras⁴¹. El síndrome de burnout en profesionales sanitarios ha aumentado en Estados Unidos, especialmente en atención primaria, y el uso de los HCE es un factor clave en esa deriva. La documentación y las cargas administrativas, la usabilidad compleja, la mensajería electrónica y la bandeja de entrada, la carga cognitiva y la demanda de tiempo han cambiado inherentemente con respecto a los registros en papel⁴². Muchas tareas administrativas también se han convertido en responsabilidades adicionales para los médicos. Las consecuencias de este burnout para la atención médica pueden materializarse en errores médicos relevantes, mala calidad de la atención, incidentes de seguridad, menor satisfacción del paciente y rotación del personal de atención primaria.

Casi el 80% de los hospitales⁴³ y el 86% de las clínicas ambulatorias en Estados Unidos implementaron un modelo de HCE en 2015 y 2017, respectivamente. La prevalencia del síndrome de burnout médico ha aumentado en todas las especialidades en los últimos años, y alcanza significativamente los niveles más altos, de casi el 50%, en atención primaria en Estados Unidos⁴⁴. Cerca del 75% de las personas con síntomas de burnout identifican los HCE como una fuente de estrés⁴⁵. En una encuesta a 282 médicos de tres instituciones en California, Colorado y Nuevo México, el 68% de los cuales trabajaba en atención primaria, la preocupación más destacada (86,9% de los encuestados) fue la entrada excesiva de datos. De hecho, los médicos pueden necesitar hasta dos horas adicionales por cada hora de contacto directo con los pacientes para las tareas administrativas. Los médicos que no disponen de tiempo suficiente para la documentación tienen 2,8 veces más probabilidades de presentar síntomas de agotamiento. En algunos casos los horarios de las clínicas se acortan deliberadamente y se cierran espacios para evitar que eso suceda.

La calidad de la experiencia de usuario con una tecnología se puede medir con la escala de usabilidad del sistema (SUS) que oscila entre 0 y 100. Una búsqueda de Google recibe 93 puntos y una calificación de usabilidad de A, mientras que la puntuación de Microsoft Excel es de 57, y su calificación de usabilidad F, lo que lo sitúa en la banda 22% inferior⁴⁶. La media de la industria de salud es de 68 puntos y el sistema EHR (Electronic Health Records)



recibe una puntuación SUS de 45,9, lo que lo sitúa en el 9% con peor rendimiento, y una calificación F, considerada “no aceptable” en comparación con otros productos. El 90% de los médicos de atención primaria señalan que los EHR deben ser más intuitivos y receptivos, y el 72% creen que mejorar las interfaces de usuario sería la mejor manera de abordar sus desafíos en el futuro inmediato. No se trata, por tanto, únicamente de introducir más IA en los registros de pacientes. Para que ésta sea efectiva necesita que el resto de aplicaciones tecnológicas la complementen. Cuando los médicos de la Facultad de Medicina de Yale cambiaron a un sistema de inicio de sesión con tarjeta de identificación para eliminar la escritura repetitiva del nombre de usuario y la contraseña, algo que tenían que realizar hasta 140 veces al día, se ahorraron 20 minutos diarios, además de una evidente molestia.

En abril de 2025, en un centro de convenciones de Chicago, decenas de miles de asistentes observaron cómo GPT-4, era capaz de convertir la interacción con un paciente en una nota clínica en segundos⁴⁷. El profesional sanitario registró la visita en la aplicación móvil de la plataforma de IA, donde aparecía la información del paciente en tiempo real; al finalizar la consulta, la IA generó las notas y, tras la oportuna revisión, las envió a la HCE de la persona. Se estima que los equipos de atención primaria pueden utilizar soluciones de voz basadas en IA para documentar automáticamente las conversaciones con sus pacientes en, al menos, el 60% de las visitas. Esto puede permitir a los médicos atender hasta nueve pacientes adicionales al mes⁴⁸.

El 70% de las tareas del personal sanitario podrían reinventarse, de hecho, mediante la mejora tecnológica. Solo en enfermería, la automatización puede liberar el 20% de las tareas repetitivas y de menor complejidad, lo que generaría un valor anual potencial de casi 50.000 millones de dólares sólo en EEUU. Aproximadamente el 40% de las horas laborales del sector sanitario se dedica a tareas lingüísticas que pueden transformarse mediante IA generativa: el 17% puede automatizarse por completo, mientras que el 23% puede ampliarse, para optimizar la eficiencia del trabajo humano. La integración de la IA en el diagnóstico puede reducir significativamente los gastos en comparación con los métodos convencionales⁴⁹, podría liberar entre 3,3 y 15,2 horas al día y generar un ahorro de costes de entre 1.667 y 17.881 dólares diarios en un hospital⁵⁰.

Desde un punto de vista más sistémico, el concepto de gemelo digital para la salud (DT4H) promete revolucionar todo el modelo sanitario, incluyendo la gestión y la prestación de servicios, el tratamiento y la prevención de enfermedades, y el mantenimiento del bienestar. Sin embargo, si bien existen diversas iniciativas en marcha, el DT4H aún se encuentra en sus etapas iniciales⁵¹. En la gestión de traumas, se están dando pasos prometedores: el gemelo digital puede comenzar a actuar antes de la llegada del paciente al centro de salud, porque la recopilación y recepción de información se realiza ya directamente en el lugar del accidente, lo que permite tiempos de respuesta más rápidos, cruciales cuando el tiempo apremia.

(...)
Para capturar ese valor hay que invertir menos en “apps” aisladas y más en la capa de datos y de evaluación: historiales interoperables (FHIR), espacios de datos sanitarios seguros y gobernados, validación clínica rigurosa y compra pública basada en valor. Añadiría formación para profesionales, auditoría continua de modelos (seguridad, sesgos, explicabilidad) y sandboxes regulatorios que aceleren la traslación a práctica clínica. Quien ordene estos pilares hoy liderará la medicina basada en datos de la próxima década.

(...)
|
Andrés Pedreño

Siemens Healthineers y General Electric Healthcare son algunas de las compañías que se están asociando con centros de salud para simular cambios en los flujos de trabajo y el equipo médico. Durante la pandemia de COVID-19, que podría considerarse una prueba de estrés digital, los modelos predictivos permitieron anticipar el riesgo de escasez de recursos para cuidados críticos, como ventiladores, así de soporte vital extracorpóreo (ECLS), antes de que se produjeran. Los avances futuros en computación de alto rendimiento podrían proporcionar la potencia de procesamiento necesaria para modelados y simulaciones más complejos. Se beneficiarán también de los avances en tecnología móvil de banda ancha en 5G, que ofrecerán velocidades de transferencia de datos más rápidas y una menor latencia. Sobre el terreno las tecnologías AR/VR (realidad aumentada/realidad virtual) permitirán interactuar con los gemelos digitales de salud de una manera más inmersiva e intuitiva y mediante blockchain y DLT (Tecnología de Registro Distribuido) se garantizará el almacenamiento y transferencia descentralizada, segura y transparente de los datos.

Entre las empresas emergentes, la norteamericana Cohere Health utiliza IA para crear proactivamente rutas de atención basadas en datos, lo que permite la preaprobación de los servicios y facilita a los hospitales la gestión de la disponibilidad de camas. Mediante el uso de análisis predictivos basados en IA, pueden pronosticar los ingresos y las altas de pacientes con mayor precisión⁵². La plataforma de la danesa Corti, por su parte, resume automáticamente las llamadas de emergencia, agiliza la documentación y monitoriza el rendimiento de los empleados. De ese modo, ayuda a los equipos a identificar ineficiencias y ofrece retroalimentación personalizada a los empleados.

Garantizar un equilibrio saludable entre la vida laboral y personal para colectivos como el de enfermeros ya no es solo un ideal, sino una necesidad⁵³. Se trata de una de una profesión inherentemente exigente, con turnos largos, entornos de alta presión y un compromiso con la atención centrada en el paciente, a menudo a expensas de la propia salud. La escasez cada vez mayor de enfermeros, exacerbada por las crisis sanitarias mundiales, acentúa aún más la demanda de soluciones para garantizar la atención a una población envejecida y el aumento de los costes operativos⁵⁴. Estados Unidos

se enfrentará a una escasez de entre 54.000 y 139.000 médicos en 2033, mientras que el déficit mundial de enfermería podría alcanzar los 13 millones de profesionales.

Están surgiendo aplicaciones de la IA para abordar esta cuestión clave. En comparación con los horarios preparados manualmente, los generados por ordenador han demostrado ajustarse mejor a las necesidades del colectivo⁵⁵. Pero el desafío de hacer que incluso sistemas rigurosamente probados funcionen bien en la práctica clínica persiste. Las vicisitudes que tuvo que superar el modelo de sepsis épica, una de las plataformas de alerta clínica más utilizados, lo ejemplifican con elocuencia. El Epic Sepsis Prediction Model (ESPM) es un algoritmo desarrollado por Epic Systems para predecir el riesgo de sepsis en pacientes hospitalizados utilizando datos electrónicos de salud. Se construyó a partir de los datos de HCE de 405.000 pacientes de tres sistemas de salud. En un gran estudio de validación externa, el modelo no logró identificar al 67% de los casos de sepsis. Su fracaso se atribuyó, en parte, a la implementación de los modelos de HCE⁵⁶. Las técnicas avanzadas de aprendizaje automático han superado consistentemente a los métodos estadísticos tradicionales en la identificación de dolencias, con índices de precisión de entre el 55,6% y el 95%. No obstante, estos modelos a menudo se han considerado “cajas negras”, lo que dificultaba la interpretación de sus predicciones. El equilibrio entre precisión e interpretabilidad constituye una de las grandes oportunidades para la innovación tecnológica⁵⁷.

Durante el triaje, los profesionales sanitarios toman decisiones sobre el alta y el ingreso basándose en su evaluación de las necesidades de los pacientes y los recursos médicos disponibles⁵⁸. Las decisiones suelen ser subjetivas y pueden llevar a admitir a pacientes de “bajo riesgo”. La capacidad de la IA para procesar, conectar y sacar conclusiones de grandes cantidades de datos se puede utilizar para estratificar el riesgo de los pacientes según sus factores y necesidades personales. Se ha demostrado que las soluciones de IA previas al diagnóstico diferencian con precisión a los pacientes de bajo riesgo de los de alto riesgo⁵⁹, incluso a partir de evaluaciones autoinformadas. El NHS Improvement (NHSI) ha publicado en Reino Unido varias herramientas e informes para ayudar a gestionar el flujo de pacientes. SAFER reduce los retrasos en las unidades de pacientes adultos hospitalizados, y habitualmente se utiliza junto con “Red2Green Bed Days”, un sistema de gestión visual para identificar el tiempo perdido y la LOS (duración de la estancia del paciente).

El panorama regulatorio está teniendo que evolucionar rápido, para mantener el ritmo de los avances tecnológicos⁶⁰ y abordar los nuevos riesgos emergentes asociados al intercambio de datos. Los pacientes pueden percibir esto último como una violación de su privacidad, especialmente si los hallazgos se hacen públicos para terceros. Pero se requieren grandes cantidades de datos de diversas fuentes para entrenar algoritmos de IA en atención médica, y la fragmentación en diferentes plataformas y sistemas dificulta mu-

(...)
La IA está acelerando la ciencia traslacional y acercándola a la cabecera del paciente. Modelos fundacionales multimodales integran imagen, texto clínico y genómica para detectar antes y con mayor precisión; la predicción de estructuras e interacciones proteicas (por ejemplo, AlphaFold) acorta el diseño de fármacos y biomarcadores; los modelos generativos proponen moléculas y anticuerpos optimizados; los gemelos digitales simulan la evolución clínica y ayudan a ajustar dosis; y la inferencia causal con datos del mundo real complementa y abarata ensayos clínicos. El resultado es diagnóstico más precoz, terapias más personalizadas y ciclos de I+D significativamente más cortos en áreas como oncología, enfermedades raras y |
Andrés Pedreño

cho el acceso a ellos. La función de autoaprendizaje del software de IA plantea también retos a los reguladores a medida que los algoritmos evolucionan continuamente con el uso. En un estudio de Panel AmeriSpeak⁶¹, la mayoría de los encuestados mostraron poca confianza en su sistema de atención médica para usar la IA de manera responsable (65,8%) y también en que su sistema de atención médica se aseguraría de que una herramienta de IA no los dañara (57,7%). Las mujeres destacaron por su mayor escepticismo.

Es probable que esos escrúpulos de la población, unidos al enfoque hipercauteloso del sector salud, expliquen que la adopción de la IA generativa se limite todavía, por lo general, a pilotos fragmentados. Pocos modelos han progresado más allá del desarrollo o validación retrospectiva, creando lo que comúnmente se llama el “abismo de la IA”. Sin aplicarse sobre el terreno y sin datos disponibles, traducir algoritmos de IA de entornos *in silico* a entornos clínicos del mundo real sigue siendo un desafío formidable⁶². Los algoritmos no pueden funcionar de forma aislada, deben contar con infraestructura, recursos y personal especializado capacitado para actuar según sus predicciones. Esta situación debe abordarse con urgencia porque la ausencia de una estrategia holística en el campo de la IA podría colocar a las organizaciones sanitarias en riesgo de quedarse atrás. Boston Consulting Group prevé que eso comience a corregirse el próximo año, cuando se expandirá el uso de la IA en flujos de trabajo completos, en lugar de solo tareas específicas⁶³. Por ejemplo, agentes inteligentes automatizarán la atención completa de un paciente, desde la admisión hasta el plan de tratamiento.

Llama la atención que, frente a las suspicacias acerca de la capacidad de la IA para asumir tareas del sistema de salud, los consumidores utilizan cada vez más los chatbots para hacer consultas. Una encuesta de KFF de agosto de 2024 revela que uno de cada seis adultos *conversa* con ellos al menos una vez al mes sobre aspectos relacionados con su salud y bienestar, cifra que aumenta al 25% en el caso de los adultos menores de 30 años. Obviamente, de consolidarse esta tendencia, provocará una reconversión de los modelos de plataformas de atención *online* y potenciará la transición hacia enfoques proactivos ligados a la Medicina 3.0, que impulsa la prevención, la personalización y la participa-

ción con la mirada puesta en la longevidad.

Si vemos el vaso medio lleno, en última instancia, la IA también podrá ayudar a difundir *online* y de forma masiva información sobre la prevención de enfermedades, ya que permite llegar rápidamente a un gran número de personas e incluso analizar textos en redes sociales para predecir brotes⁶⁴. Por ejemplo, un estudio reveló que las búsquedas en internet de términos relacionados con el COVID-19 se correlacionaban con los casos reales de contagio⁶⁵. En este caso, la IA podría haberse utilizado para predecir dónde se produciría un brote y, posteriormente, ayudar a las autoridades a saber cómo comunicarse mejor y tomar decisiones para ayudar a detener la propagación.

IA en la sanidad desde la atención primaria

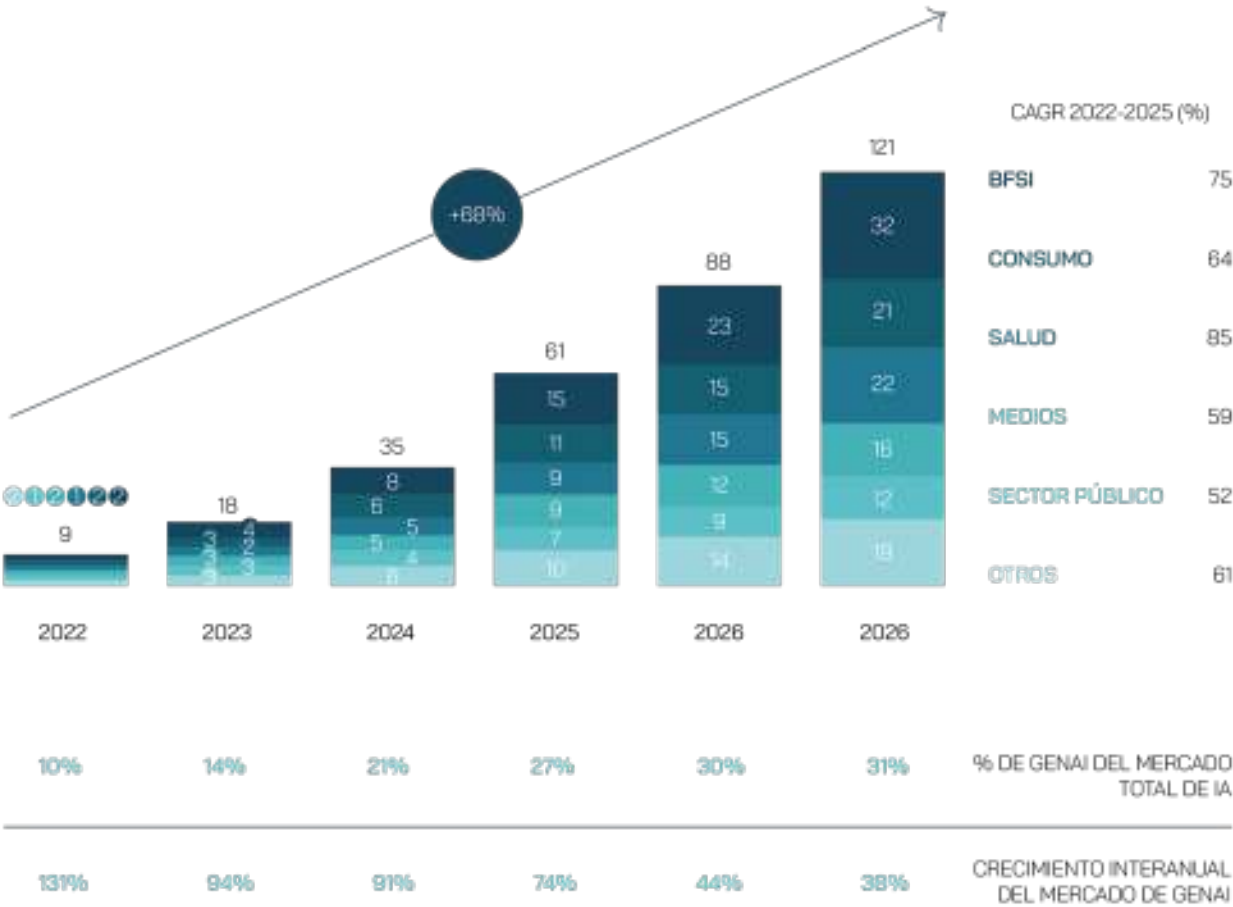
ESPAÑA

La Inteligencia Artificial (IA) se está integrando cada vez más en el panorama sanitario en España, con el objetivo de mejorar la atención al paciente. Asebio detecta⁶⁶ una demanda creciente, ya que en la actualidad sólo el 11% de los profesionales sanitarios en España utilizan la IA, pero un 42% tiene intenciones explícitas de hacerlo en el futuro. El Gobierno ha puesto en marcha iniciativas para promover el uso de la IA en la sanidad, como el programa Estrategia de IA en Salud y el Observatorio de IA en Salud. En el ámbito de la investigación universitaria y los centros tecnológicos, no dejan de aparecer soluciones sanitarias basadas en IA, centradas en áreas como el diagnóstico por imagen o las prótesis. La decisión de Microsoft de ubicar en Barcelona su nuevo centro de I+D especializado en IA reforzará todas estas actividades. El 92 % de la población en España tiene acceso a la información y los sistemas de información basados en registros de Atención Primaria (SIAP) cuentan con datos anónimos de alrededor de 12 millones de personas. A ello se suma una red hospitalaria (CMBD) que integra información administrativa y clínica de los pacientes en hospitales públicos y privados. Pese a que todavía queda mucho camino por recorrer para acabar con los silos de información y facilitar la interoperabilidad y el intercambio, se han producido avances significativos.

Una encuesta a empresas del sector de servicios para la salud revela que la personalización de los tratamientos gracias al uso de la IA es uno de los puntos de me-



Mercado total accesible de GenAI (miles de millones de dólares)



Fuente: Boston Consulting Group & Modetech / World Economic Forum

jora en nuestro país, ya recibió el 37% de respuestas afirmativas de las empresas españolas, frente al 45% de la media del resto de países analizados. Hay margen de mejora también en el ámbito del diagnóstico médico y la actualización de historiales clínicos. España supera al resto, en cambio en el uso de IA para la planificación del tratamiento (49% frente al 46%). El informe detecta, asimismo, retos significativos en torno a la seguridad de los datos de los pacientes y la gestión de dispositivos, debido en buena medida a los problemas de integración tecnológica y de cumplimiento de los sistemas heredados. En cualquier caso, el uso de IA en organizaciones sanitarias ha pasado del 61% en 2024 al 81% un año después, ha dejado de ser una herramienta meramente administrativa y se emplea para la mejora de servicios sanitarios avanzados.

El Gobierno anunció en julio de 2025 un ambicioso plan de ayudas por valor de 180 millones de euros, destinado a la aplicación de la inteligencia artificial (IA), que incluye 50 millones para la convocatoria RedIA Salud, impulsada por Red.es. Cuenta con financiación del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y abordará las diferentes etapas del proceso asistencial, desde la predicción y diagnóstico de enfermedades hasta el tratamiento y seguimiento de los pacientes. También se podrán presentar proyectos enfocados en la investigación clínica, biomédica y farmacológica, así como en la gestión de sistemas sanitarios o la respuesta ante emergencias.

El impacto de la IA está produciendo ya casos de éxito como el del Hospital de Sant Pau en Barcelona, que ha pasado de tener seis máquinas de resonancia magnética a cuatro porque el algoritmo reduce los plazos y permite actuar con más agilidad. Funciona como un copiloto que ayuda a los especialistas a encontrar lesiones, tanto las buscadas, como otras que podrían estar ocultas. En el servicio de urgencias del mismo hospital, la IA permite empezar a diagnosticar de madrugada aunque no se haya incorporado el especialista.

Durante los meses de junio y julio de 2025, el Ministerio de Sanidad puso en marcha un piloto para incorporar la IA a las consultas de atención primaria de siete comunidades autónomas que se ofrecieron voluntarias: Cantabria, Euskadi, Catalunya, Murcia, Comunitat Valenciana, Castilla-La Mancha y Extremadura⁶⁷. La herramienta se usó para transcribir la conversación entre paciente y personal médico, eliminando así la barrera que supone el ordenador. Al final de la consulta, el sistema artificial proporcionaba un resumen con los síntomas, los antecedentes y la situación familiar, documento que se procedía a eliminar una vez el profesional generaba y validaba el correspondiente informe. El facultativo se podía centrar exclusivamente en la entrevista sin necesidad de teclear simultáneamente. El Ministerio tenía previsto implantar nuevas funcionalidades en el futuro como la gestión de citas y la elaboración los resúmenes previos a la consulta a partir de la información disponible de los pacientes.

Relación de notas

¹ Sallam, M. (2023) ‘CHATGPT utility in healthcare education, research, and practice: Systematic review on the promising perspectives and valid concerns’, Healthcare, 11(6), p. 887. doi:10.3390/healthcare11060887. (Consultado el 18/06/2025)

² Singhal, K. et al. (2023) ‘Large language models encode clinical knowledge’, Nature, 620(7972), pp. 172–180. doi:10.1038/s41586-023-06291-2. (Consultado el 18/06/2025)

³ Singhal, K. et al. (2025) ‘Toward expert-level medical question answering with large language models’, Nature Medicine, 31(3), pp. 943–950. doi:10.1038/s41591-024-03423-7. (Consultado el 18/06/2025)

⁴ Khalifa, M. and Albadawy, M. (2024) ‘Artificial Intelligence for clinical prediction: Exploring key domains and essential functions’, Computer Methods and Programs in Biomedicine Update, 5, p. 100148. doi:10.1016/j.cmpbup.2024.100148.

⁵ European Medicines Agency, Seizing opportunities in a changing medicines landscape – The European medicines agencies network strategy 2028, Publications Office of the European Union, 2025 (Consultado el 18/06/2025).

⁶ ISCIII - Vigilancia en Salud Pública - Renave ISCIII Portal Web. Disponible en: <https://www.isciii.es/servicios/vigilancia-salud-publica-renave> (Consultado el 18/06/2025).

⁷ ‘Conclusiones del Encuentro de profesionales de vigilancia en salud pública para avanzar en el desarrollo de la Estrategia de Vigilancia en Salud Pública’ (2023). Ministerio de Sanidad. (Consultado el 18/06/2025)

⁸ Taheri, S. et al. (2024) ‘Modelling the spatial risk of malaria through probability distribution of anopheles maculipennis S.L. and imported cases’, Emerging Microbes & Infections, 13(1). doi:10.1080/22221751.2024.2343911. (Consultado el 18/06/2025)

⁹ Oteo, J.A., Santibáñez, S. and Portillo, A. (2025) ‘Enfermedades Transmitidas Por Garrapatas Duras en España’, Medicina Clínica, 164(12), p. 106989. doi:10.1016/j.medcli.2025.106989. (Consultado el 18/06/2025)

¹⁰ Menéndez-Capote, R.L. and Bandera-Tirado, J.F. (2022) ‘Tripanosomiasis Africana humana’, Revista Española de Casos Clínicos en Medicina Interna, 7(3), pp. 9–12. doi:10.32818/reccmi.a7n3a4. (Consultado el 18/06/2025)

¹¹ Muiños, F., Martínez-Jiménez, F., Pich, O. et al. In silico saturation mutagenesis of cancer genes. Nature 596, 428–432 (2021). doi:10.1038/s41586-021-03771-1 (Consultado el 18/06/2025).

¹² Sanidad introduce La ia en Las radiografías de tórax y hueso para ayudar en el diagnóstico de patologías en urgencias y Atención Primaria - Alicante. (Consultado el 18/06/2025).

¹³ Comunidad de Madrid (2025) La Comunidad de madrid estrenará inteligencia artificial para transcribir La Información Clínica en las consultas de atención primaria, Comunidad de Madrid. (Consultado el 18/06/2025).

¹⁴ “Artificial intelligence: 10 promising interventions for healthcare”, NIHR, 28 de julio de 2023, consultado el 16/05/2025

¹⁵ Madeleine North, “6 ways AI is transforming healthcare”, World Economic Forum, 14 de marzo de 2025, consultado el 16/05/2025

¹⁶ Moritz U. G. Kraemer et al. Artificial intelligence for modelling infectious disease epidemics, Nature, 19 de febrero de 2025, doi.org/10.1038/s41586-024-08564-w

¹⁷ Noah Lloyd, “Northeastern network scientists are developing AI tools to predict – and prevent – the next epidemic”, Northeastern Global News, 17 de marzo de 2025, consultado el 15/05/2025

¹⁸ Amy Roeder, “Harnessing AI to model infectious disease epidemics”, Harvard School of Public Health, 13 de marzo de 2025, consultado el 15/05/2025

¹⁹ Kazi Helal, Aaron DeGagne, “Takeaways From the J.P. Morgan Healthcare Conference”, Pitchbook, 21 de enero de 2025

²⁰ Reglamento relativo al Espacio Europeo de Datos de Salud (EEDS) - Comisión Europea

²¹ “The European Health Union:

acting together for people’s health”, Comisión Europea, 22 de mayo de 2024

²² <https://digital-strategy.ec.europa.eu/es/policies/strategy-data>

²³ “A Call for Effective Stakeholder Engagement and Capacity Building during the Implementation of the European Health Data Space”, VVAA, 5 de marzo de 2025

²⁴ “GUIDELINE on the electronic exchange of health data under Cross-Border Directive”, Comisión Europea 2011/24/EU, noviembre de 2024

²⁵ “European action plan on the cybersecurity of hospitals and healthcare providers”, Comisión Europea, 15 de enero de 2025

²⁶ Reina, V. and Griesinger, C., “Cyber security in the health and medicine sector – A study on available evidence of patient health consequences resulting from cyber incidents in healthcare settings”, Publications Office of the EU, 2024

²⁷ “2024 State of the Digital Decade report”, Comisión Europea, 2024

²⁸ “Changes to existing medical software policies resulting from section 3060 of the 21st Century Cures Act”, FDA, 2020

²⁹ Jee Young Kim et al. “Organizational Governance of Emerging Technologies: AI Adoption in Healthcare”, FAcCT ’23, 10 de marzo de 2023, doi.org/10.1145/3593013.3594089, consultado el 16/05/2025

³⁰ “AI Governance in Health Systems: Aligning Innovation, Accountability, and Trust”, Margolis Institute for Health Policy, 28 de octubre de 2024

³¹ Ted A. James, “Confronting the Mirror: Reflecting on Our Biases Through AI in Health Care”, Harvard Medical School, 24 de septiembre de 2024, consultado el 16/05/2025

³² Artificial Intelligence applications to support epidemic and pandemic prevention, preparedness and response, IDRC, n. d.

³³ “Envisioning the Data Science Discipline: the undergraduate perspective: Interim report”, National Academies of Sciences, Engineering, Medicine, 2018

³⁴ Rucha Shinde et al. Securing AI-based healthcare systems using blockchain technology: A state-of-the-art systematic literature review and future research directions, Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 27 de octubre de 2023, doi.org/10.1002/ett.4884

³⁵ Trishan Panch, Heather Mattie, Rifat Atun, Artificial intelligence and algorithmic bias: implications for health systems, J Glob Health, diciembre de 2019, doi: 10.7189/jogh.09.020318

³⁶ “Health C for D and R. Artificial Intelligence and Machine Learning (AI/ML)-Enabled Medical Devices”, FDA, 20 de diciembre de 2024, consultado el 16/05/2025

³⁷ Madeline Sagona et al. Trust in

AI-assisted health systems and AI’s trust in humans, npj Health Syst., 28 de marzo de 2025, doi.org/10.1038/s44401-025-00016-5

³⁸ Tyson, A., Pasquini, G., Spencer, Funk C. “60% of Americans Would Be Uncomfortable With Provider Relying on AI in Their Own Health Care”, Pew Research Center, febrero de 2023, consultado el 16/05/2025

³⁹ Chiara Longoni , Andrea Bonezzi , Carey K Morewedge, Resistance to Medical Artificial Intelligence, J. Consum. Res. 3 de mayo de 2019, doi.org/10.1093/jcr/ucz013

⁴⁰ Medical technology industry perspective on the final AI Act, Med-Tech, 13 de marzo de 2024

⁴¹ Lisa D. Ellis, “The Benefits of the Latest AI Technologies for Patients and Clinicians”, Harvard Medical School, 30 de agosto de 2024, consultado el 14/05/2025

⁴² Jeffrey Budd, Burnout Related to Electronic Health Record Use in Primary Care, Journal of Primary Care & Community Health,19 de abril de 2023, doi: 10.1177/21501319231166921

⁴³ Adler-Milstein J et al. Electronic health record adoption in US hospitals: the emergence of a digital “advanced use” divide. J Am Med Inform Assoc., 2017, doi.org/10.1093/jamia/ocx080

⁴⁴ Shanafelt TD et al. Changes in burnout and satisfaction with work-life integration in physicians and the general US working population between 2011 and 2017, Mayo

Clin Proc., septiembre de 2019, doi.org/10.1016/j.mayocp.2018.10.023

⁴⁵ Tajirian T et al. The influence of electronic health record use on physician burnout: cross-sectional survey. J Med Internet Res., julio de 2020, doi: 10.2196/19274

⁴⁶ Melnick ER, Dyrbye LN, Sinsky CA, et al. The association between perceived electronic health record usability and professional burnout among US Physicians. Mayo Clin Proc., marzo de 2020, 10.1016/j.mayocp.2019.09.024

⁴⁷ Shashank Bhasker et al. “Tackling healthcare’s biggest burdens with generative AI”, McKinsey, 10 de julio de 2023, consultado el 16/05/2025

⁴⁸ How talent and technology can help solve the nursing shortage, Accenture, 2023

⁴⁹ David B. Olawade et al. Artificial intelligence in healthcare delivery: Prospects and pitfalls, Journal of Medicine, Surgery, and Public Health, agosto de 2024, doi.org/10.1016/j.glmedi.2024.100108

⁵⁰ N.N. Khanna, M.A. Maindar-kar, V. Viswanathan, J.F.E. Fernandes, S. Paul, M.M. Bhagawati, et al. Economics of artificial intelligence in healthcare: diagnosis vs. treatment, Healthcare (Basel), 9 de diciembre de 2022, doi.org/10.3390/healthcare10122493

⁵¹ Evangelia Katsoulakis et al. Digital twins for health: a scoping review, npj Digit. Med., 22 de marzo de 2024, https://doi.org/10.1038/s41746-024-01073-0

⁵² M. Javaid et al. Significance of machine learning in healthcare: Features, pillars and applications, Int. J. Intell. Netw., 5 de junio de 2022, doi.org/10.1016/j.ijin.2022.05.002

⁵³ Moustaq Karim Khan Rony et al. The role of artificial intelligence in enhancing nurses’ work-life balance, Journal of Medicine, Surgery, and Public Health, Agosto de 2024, https://doi.org/10.1016/j.glmedi.2024.100135

⁵⁴ Tejash Shah, Kaveh Safavi, Daniel Owczarski, “Gen AI amplified Scaling productivity for healthcare providers”, Accenture, marzo de 2025

⁵⁵ Franklin Leung et al. Artificial intelligence and end user tools to develop a nurse duty roster scheduling system, International Journal of Nursing Sciences, julio de 2022, doi.org/10.1016/j.ijnss.2022.06.013

⁵⁶ Rachel Knevel et al. From real-world electronic health record data to real-world results using artificial Intelligence, Ann Rheum Dis, marzo de 2023, doi:10.1136/ann-rheumdis-2022-222626

⁵⁷ Christo El Morr et al. AI-based epidemic and pandemic early warning systems: A systematic scoping review, Health Informatics Journal, 2024, bajo revision, doi: 10.1177/14604582241275844, consultado el 15/05/2025

⁵⁸ Fatema Mustansir Dawoodbhoy et al. AI in patient flow: applications of artificial intelligence to improve patient flow in NHS acute mental health inpatient units, Heliyon,

mayo de 2021, doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06993

⁵⁹ He, J. et al. The practical implementation of artificial intelligence technologies in medicine. Nat. Med., enero de 2019, doi: 10.1038/s41591-018-0307-0

⁶⁰ Margaret Chustecki, Benefits and Risks of AI in Health Care: Narrative Review, Interact J Med Res, 18 de noviembre de 2024, doi: 10.2196/53616

⁶¹ Paige Nong; Jodyn Platt, Patients’ Trust in Health Systems to Use Artificial Intelligence, JAMA Netw Open., 14 de febrero de 2025, doi:10.1001/jamanetworkopen.2024.60628

⁶² Jethro C. C. Kwong, Integrating artificial intelligence into healthcare systems: more than just the algorithm, npj Digital Medicine, 1 de marzo de 2024, doi.org/10.1038/s41746-024-01066-z

⁶³ Ashkan Afkhami et al. “How Digital and AI Will Reshape Health Care in 2025”, Boston Consulting Group, 14 de enero de 2025, consultado el 16/05/2025

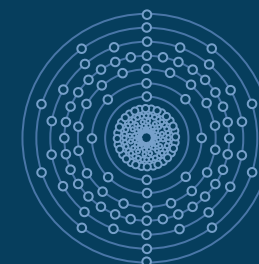
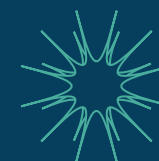
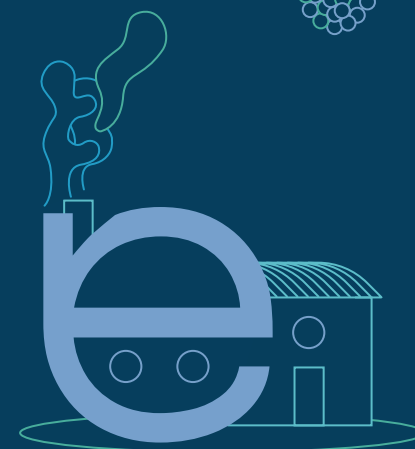
⁶⁴ “AI in healthcare: The future of patient care and health management”, Mayo Clinic, 27 de marzo de 2024

⁶⁵ Atina Husnayain, Anis Fuad, Emily Chia-Yu Su, Applications of Google Search Trends for risk communication in infectious disease management: A case study of the COVID-19 outbreak in Taiwan, Int J Infect Dis., 12 de marzo de 2020 doi: 10.1016/j.ijid.2020.03.021

⁶⁶ “El panorama de la inteligencia artificial en el sector salud en España”, Asebio, 4 de abril de 2024

⁶⁷ Sofía Pérez, “Sanidad comienza un proyecto piloto para usar la IA en las consultas de Atención Primaria de siete comunidades”, eldiario.es, 16 de junio de 2025

03 Energía nuclear más allá del uranio



Introducción

La energía nuclear es un tema candente se hable cuando se hable. Por un lado, este tipo de generación de energía está considerada como una de las alternativas con un mayor potencial para satisfacer las necesidades energéticas del mundo actual. Mientras que, por el otro, sus inicios convulsos y un largo historial de accidentes acontecidos desde su adopción hacen levantar más de una ceja cuando se saca el tema en cualquier conversación. Por ello, cuando en una conversación se plantea la pregunta “¿querrías vivir al lado de una central nuclear?”, de los primeros pensamientos que suelen cruzar la mente de la otra persona son el accidente de Chernóbil, el más reciente de Fukushima, o la problemática de los residuos nucleares. Estos pensamientos, por tanto, suelen dar como respuesta un “no” rotundo.

Afortunadamente, la ciencia sigue avanzando, y los últimos modelos de reactores nucleares son auténticas fortalezas de la seguridad. Sumado a este hecho, gracias a la aplicación de nuevas tecnologías, estas centrales han llegado a ser tan eficientes que pueden emplear hasta los residuos radiactivos de otras centrales para lograr reducir al mínimo su impacto en el medio ambiente. Pero no todo queda en mejoras en las centrales clásicas, en la actualidad también se están desarrollando nuevas centrales nucleares que utilizan torio como combustible o sales fundidas en vez de agua para transferir el calor del núcleo de la central.

Con ello, a pesar de sus muchas luces, la larga sombra de la energía nuclear embarra un debate que es de todo menos sencillo. Como toda la ciencia, las nuevas formas de generación de energía a partir de fuentes nucleares tienen sus ventajas y desventajas. Pero estas primeras parecen situar a la energía nuclear como uno de los ejes de la sociedad del futuro y piezas claves para la transición ecológica hacia un futuro más sostenible. Con 80 años de investigación a cuestas y unas bases bien cimentadas, el futuro de la energía nuclear sólo puede ir hacia delante. Para ello, sigue reinventándose y ofreciendo nuevas posibilidades que casan con la realidad actual.

Una alternativa nuclear difícil, pero posible

POR DENTRO

Las crecientes consecuencias del cambio climático han llevado a la humanidad a comprender que necesita replantearse el modo de vida actual para evitar el colapso de la biosfera. Se debe realizar una transición a un mundo más sostenible, que aproveche mejor sus recursos y que tenga un objetivo claro: dejar la menor huella posible en el medioambiente. Ahora bien, para lograr esta transición ecológica y seguir manteniendo las comodidades del mundo contemporáneo, una de las claves es garantizar el suministro de energía de una forma limpia y coherente con las necesidades.

Siguiendo esta tendencia, las fuentes de energía renovables, como la energía solar, eólica, hidráulica, mareomotriz, así como otras opciones minoritarias, se presentan como las alternativas más adecuadas para lograr la descarbonización completa en el sector eléctrico. España ha sido un país referente en la adopción de energías renovables. En la actualidad, según registran los datos de Red Eléctrica, el 56,8% de toda la electricidad producida en España en 2024 provino de fuentes renovables, el dato más alto de una serie que lleva años tendiendo al alza. De entre el mix de las energías renovables, el viento originó un 23,2 % del total, la solar un 17 %, la hidráulica un 13,3 % y el resto, el porcentaje restante.¹

Por otro lado, los siete reactores nucleares situados en las cinco centrales de España produjeron otro 20% del total de energía, lo que sitúa únicamente alrededor del 23% de energía que se genera en nuestro país como proveniente de fuentes que liberan gases de efecto invernadero a la atmósfera. Los siete reactores nucleares son capaces de producir tal cantidad de electricidad gracias a que apro-

vechan la energía calorífica que emiten los átomos de uranio al desintegrarse. Concretamente, los reactores españoles que se encuentran en funcionamiento, construidos entre los años 83 y 88, son de la clase PWR (*Pressure Water Reactor* o reactor de agua presurizada)². La característica principal de este tipo de reactores es que cuenta con dos circuitos de agua para transmitir el calor que se genera en el núcleo de la central y, de este modo, generar electricidad.

El primero de los circuitos, que está en contacto con el núcleo, es cerrado. En él, el agua se calienta y, al calentarse, tiende a convertirse en vapor. Esta es la razón por la que se mantiene a una presión elevada: impide que el líquido pase a estado gaseoso superando el punto de ebullición. Los conductos de agua hipercalentada entran en contacto con un segundo circuito de agua que sí se puede convertir en vapor y acciona las turbinas de generación eléctrica. Una vez ha hecho su función, el vapor restante escapa por las torres de refrigeración, y el agua caliente restante se enfría en reservorios hasta que alcanza una temperatura adecuada para volver al medio ambiente.

Gracias a este diseño, una central nuclear en funcionamiento únicamente emite agua a la atmósfera y, debido a su estabilidad en la producción de electricidad, puede actuar como salvaguarda para las carencias en la producción de energía renovable.

Sin embargo, toda tecnología tiene su coste. El uranio es un elemento extremadamente escaso, apenas representa un 0,0004 % del peso de la corteza terrestre. Por ello, según datos de la sociedad nuclear española, apenas se extraen entre 55.000 y 60.000 toneladas de uranio metálico al año. De este uranio, el 99,27% es uranio-238, y únicamente el 0,72% es uranio-235, que se necesita en mayor proporción para poder ser utilizado como combustible. Por ello, antes de emplearse en las centrales nucleares españolas, el uranio requiere de un enriquecimiento previo, es decir, de un aumento de su concentración de uranio-235 hasta un 3% o un 5%. Para ello, se emplean distintos solventes hasta crear hexafluoruro de uranio y se emplean técnicas de difusión gaseosa o de ultracentrifugación con las que se llega hasta los porcentajes adecuados. Una vez finalizado el proceso, el resultado es óxido de uranio enriquecido.

Ni la extracción del combustible ni su posterior enriquecimiento se realiza en España. Las minas de uranio con una mayor producción se encuentran en Kazajistán, donde se extraen unas 20.000 toneladas al año, seguido de Australia, con 6.500 toneladas y Namibia, con 5.500 toneladas.³ Han existido negociaciones para extraer y enriquecer uranio en el pueblo salmantino de Retortillo, donde se estima que hay alrededor de 25.000 toneladas de este material⁴, suficientes para abastecer las necesidades de las centrales españolas durante 20 años. Sin embargo, la explotación de esta mina podría tener un profundo impacto en la orografía y los ecosistemas de la región. Este hecho, junto con los planes de cierre y desmantelamiento de las centrales actuales para 2035, hicieron que el Ministerio de Transición Ecológica echara por tierra su explotación en 2022.

No podemos dejar de explorar alternativas al uranio en el ámbito nuclear en el avance hacia un modelo energético más seguro y sostenible. Tecnologías como los reactores de torio o los sistemas de fusión podrían reducir la dependencia de materias primas críticas, minimizar los riesgos de proliferación, mejorar la gestión de residuos y abrir la puerta a una generación limpia y estable de electricidad. Apostar por una “nuclear sin uranio” significa anticipar la próxima ola de innovación energética, con potencial para convertirse en un pilar de la descarbonización y la soberanía tecnológica de Europa.

Emma Fernández

El almacenamiento de residuos de las centrales nucleares también supone un grave problema. En la actualidad, el único almacén de residuos radiactivos en España se encuentra en El Cabril, en la provincia de Córdoba, cuya gestión corre a cargo de la empresa pública ENRESA. Este almacén, de residuos de media, baja y muy baja actividad, ocupa las galerías de unas minas de uranio cerradas en 1956. Allí van a parar todos los materiales de hospitales, empresas e industria que emiten cierta radiación, como la ropa de los trabajadores de centrales nucleares, o instrumental médico que se utiliza para la medicina nuclear.⁵

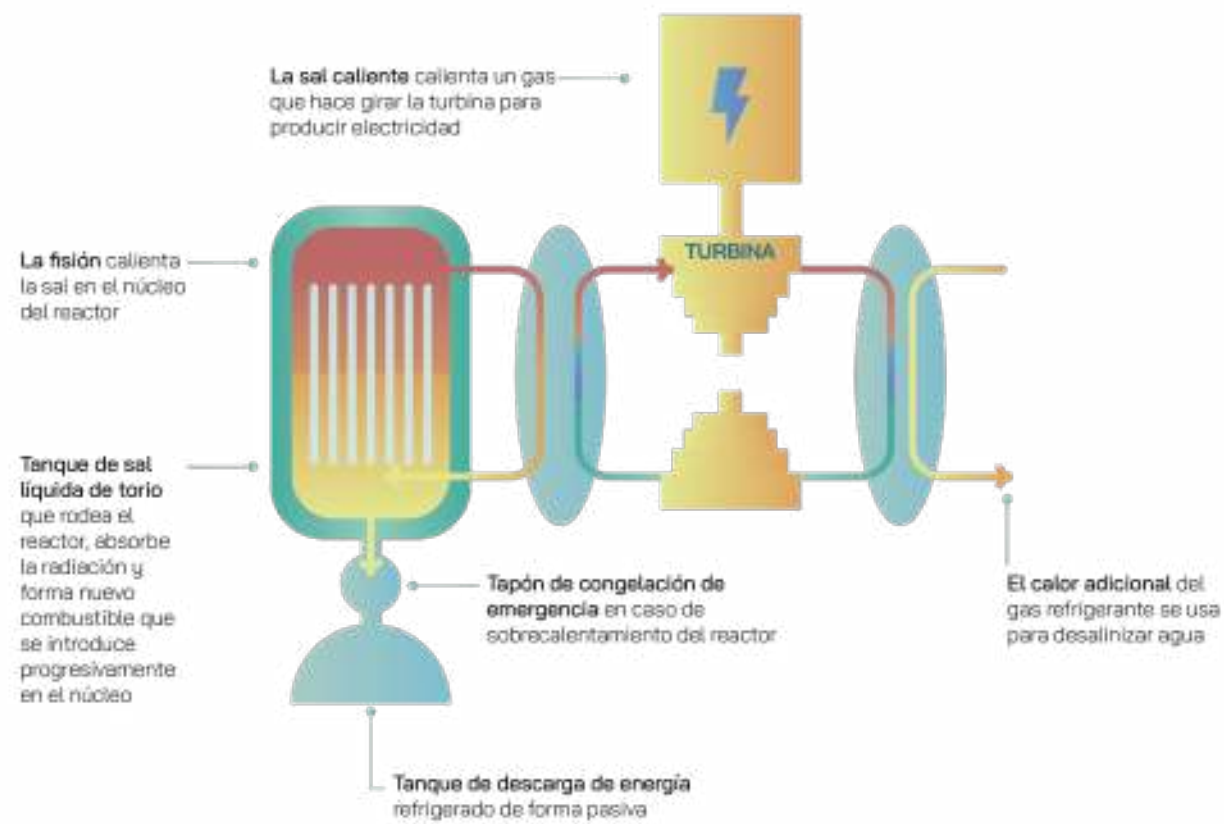
En cambio, los residuos nucleares de alta actividad se almacenan en las propias centrales nucleares durante varias décadas hasta que sea seguro enviarlos a un centro de almacenamiento geológico profundo. En la actualidad, el más importante del mundo es el proyecto de Onkalo, en Finlandia, una megaconstrucción en la que se enterrará el combustible nuclear gastado de decenas de centrales. Sin embargo, esta construcción no está exenta de crítica, puesto que existen riesgos asociados a la gestión de estos residuos, que deberá mantenerse durante miles de años⁶.

Por estos motivos, las nuevas tecnologías relacionadas con las centrales nucleares han sido diseñadas con estos problemas en mente y con la idea de atajar cualquier complicación antes de que ocurra. Algunos modelos de nueva generación son tan eficientes que pueden incluso llegar a emplear los residuos de otras centrales nucleares como combustible, lo que contribuye a disminuir el volumen de desechos radiactivos y a darle una nueva utilidad a los existentes, es decir, transformarlos en un nuevo recurso. En el Gráfico 1 se puede observar una alternativa posible.

Una de las tecnologías más prometedoras al respecto son los reactores de sales fundidas o MSR, cuyo funcionamiento se puede observar en el Gráfico 2. Este tipo de reactores emplea distintas sales (de cloro, flúor, litio o mixtas) que son fundidas para transmitir el calor del núcleo del reactor hasta los lazos externos o hasta los circuitos de agua exteriores. En la actualidad, las sales fundidas se utilizan en industrias y otros sistemas de generación de energía por su alto poder calorífico y por su estabilidad. Por ejemplo, las centrales solares térmicas de Los Arenales y Gemasolar (Sevilla) utilizan



Así funcionan los reactores nucleares alternativos



Fuente: Energy with Thorium

sales fundidas para recoger el calor que los espejos reflejan y llevarlos a los sistemas de generación de energía⁷. Es decir, se trata de una tecnología que se emplea en otros contextos de forma eficaz y que se sabe que funciona y que tiene un gran potencial para la generación de energía nuclear.

Durante los años 60 y 70, en el apogeo de la era atómica, se estudió la viabilidad de este tipo de reactores en distintos experimentos llevados a cabo en Estados Unidos, Reino Unido y la antigua Unión Soviética. Sin embargo, debido a la competencia con otro tipo de reactores, y a el desconocimiento del resto de actores claves en la toma de decisiones de inversión, los distintos programas de investigación de este tipo de reactores fueron desapareciendo⁸.

Pero a principios del año 2000, debido a los nuevos paradigmas climáticos que ya hemos comentado al principio de este capítulo, los centros de investigación volvieron a interesarse por los reactores nucleares de sales fundidas. Este tipo de reactores tienen una serie de ventajas⁹ frente a los LWR, pero también inconvenientes.

Ventajas:

1. Los reactores de sales fundidas pueden funcionar a altas temperaturas, lo que proporciona un elevado rendimiento térmico. De este modo se reduce tanto el tamaño, como los gastos y el impacto medioambiental.
2. Un MSR de baja presión podría tener costes más reducidos tanto en los elementos de contención del núcleo como en las tuberías y equipos de seguridad.
3. En algunos diseños, el combustible y el refrigerante son un único fluido, por lo que una pérdida de refrigerante arrastra consigo al combustible, lo que evita el riesgo de explosión.
4. Los residuos que producen estas centrales son, en su mayoría, productos de fisión con vidas medias cortas. Esto puede reducir la contención necesaria de los residuos a pocos cientos de años, frente a las decenas de miles de años que necesita el combustible gastado de los LWR.
5. No se han de fabricar barras de combustible, sino que se deben sintetizar las sales.
6. Este tipo de reactores podrían explotar residuos radiactivos o torio como combustible, un elemento que emite mucha menos radiación.

Desventajas:

1. En los diseños de sal de fundida circulante, los elementos radiactivos entran en contacto con equipos como bombas e intercambiadores de calor. Por tanto, el mantenimiento de los equipos debería ser totalmente remoto.
2. Las sales fundidas requieren una gestión cuidadosa de su estado

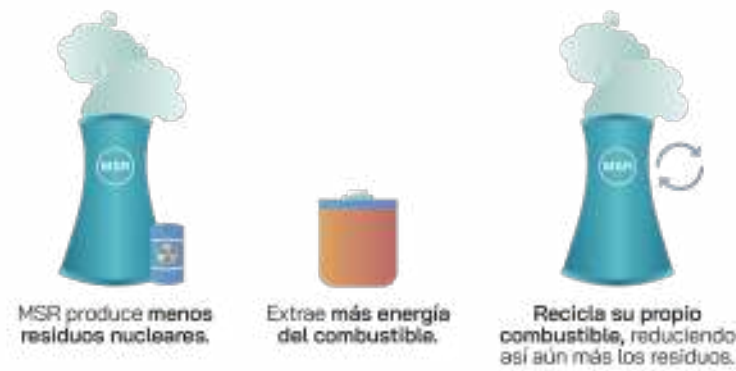
Ventajas de los reactores de sal fundida (MSR)

1. POTENCIAL PARA AYUDAR A DESCARBONIZAR LA INDUSTRIA EN LOS OBJETIVOS DE EMISIONES NETAS CERO

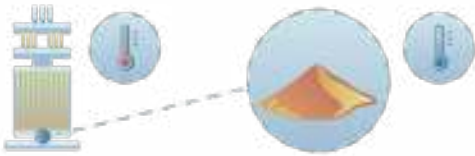
Los MSR pueden producir hidrógeno (H₂) y reducir emisiones de CO₂ gracias a sus altas temperaturas de salida.



2. HUELLA DE RESIDUOS NUCLEARES DE ALTO NIVEL PEQUEÑA



3. CARACTERÍSTICAS DE SEGURIDAD PASIVA



El tapón de sal se derrite si el reactor se calienta demasiado, deteniendo automáticamente la reacción.

4. OPCIONES DE CICLO DE COMBUSTIBLE SOSTENIBLE



Los MSR pueden funcionar con diferentes sales fundidas, permitiendo el uso de uranio (U), plutonio (Pu), o torio (Th).

Fuente: Energy with Thorium

- de oxidación para controlar los riesgos de corrosión. Esto supone un desafío técnico, ya que necesita de partes modulares intercambiables para lograr una mayor eficiencia¹⁰.
- Algunos diseños de MSR pueden reconvertirse en fábricas de material nuclear compatible con las armas nucleares modernas.
 - Se necesitan cambios en las normativas para dar cabida a las características de estos reactores.
 - Todavía no existen estudios independientes que validen su viabilidad económica.

Durante las últimas décadas, el torio ha pasado a ser un elemento que se utilizaba en cada vez menos aplicaciones por miedo a su radiactividad, a uno de los ejes centrales que pueden dar forma a la generación eléctrica del futuro. El Gráfico 3 aporta información relevante para conocer un poco más a este elemento actínido, con número atómico 90, que se encuentra prácticamente en su totalidad en su isótopo ²³²Th, un elemento con una semi-vida de 1.405×10¹⁰ años. En estado puro es un metal blando de color blanco plateado, que en contacto con el aire se ennegrece paulatinamente por oxidación. Su nombre deriva del dios del trueno Thor, de la mitología noruega¹¹.

Se pueden encontrar trazas de este elemento en la mayoría de rocas y suelos a razón de unas 10,5 partes por millón, es decir, una cantidad tres veces superior que la de uranio. En total, se calcula que hay unos 12 millones de toneladas de torio disponibles para su explotación, y sus mayores yacimientos estarían en las costas sur y este de India. Aunque también hay depósitos de torio en otros países como Australia, Brasil, Canadá o Estados Unidos.

Debido a su desintegración, el torio se considera un material «fértil» para la fisión. Es decir, aunque pueda actuar como combustible nuclear por sí sólo, sí se puede utilizar para crear ese combustible. Un reactor de torio necesita de uranio o plutonio con el que iniciar y mantener la reacción nuclear. Cuando se irradia, el torio acaba formando uranio-233, que es el que posteriormente, al desintegrarse, libera la energía necesaria para hacer funcionar al reactor del tipo *Thermal Breeder Reactor*.

Esto introduce ciertas ventajas frente al uranio, puesto que el torio es más abundante en la corteza terrestre, puede aprovecharse prácticamente en su totalidad y, debido a su funcionamiento, genera menos residuos radiactivos. Además, los reactores de torio tienen una probabilidad mucho menor de sufrir accidentes.

Como en India se encuentran las mayores reservas de torio (casi dos tercios de las del planeta), desde hace más de una década están desarrollando un tipo de reactor, denominado *reactor avanzado de agua pesada* alimentado con torio. ¹²China, por su parte, se ha sumado al uso del torio y en 2023 dio sus primeros pasos para tratar de operar un reactor nuclear experimental que aúna las sales fundidas y el torio. La construcción se ha realizado en el desierto de Gobi, y durante los próximos años se investigará la viabilidad del proyecto.

Mientras tanto, el resto de países esperan los resultados para comprobar si, efectivamente, se trata de una tecnología que vale la pena explorar o si meterla de nuevo en el cajón, como ya se hizo en los años 80.¹³

A nivel global, países como Estados Unidos, Francia y China han liderado el desarrollo e implementación de tecnologías nucleares. Francia, por ejemplo, ha dependido de la energía nuclear para la mayor parte de su suministro eléctrico durante décadas, mientras que China está invirtiendo en reactores de nueva generación para diversificar su matriz energética.

El clima actual muestra que la energía nuclear tiene todavía mucha vida por delante. A pesar del lastre de no ser una energía renovable por depender de los recursos que ofrece la tierra, sus condiciones únicas y su potencial descarbonizador la han convertido en un agente clave para el mundo que imaginamos en el futuro. La tecnología de las nucleares más allá del uranio hace que esta tecnología controvertida pueda convertirse en un magnífico apoyo para el mundo. Un mundo donde las emisiones netas acaben siendo 0 o incluso negativas, un mundo en el que la humanidad sea más verde y, en definitiva, un mundo en el que los humanos adopten su rol de protectores del medioambiente.

Cosas que debes saber acerca del Torio

HISTORIA

1960-70s

Se desarrollaron y probaron prototipos de Reactores de Sal Fundida (MSR) en Oak Ridge National Laboratories, EE. UU. Se construyó un reactor experimental con sal de fluoruro de torio líquida, eliminando la necesidad de fabricar costosas barras de combustible.

MSRE

(Experimento de Reactor de Sal Fundida): Usó Torio-232 como material fértil y Uranio-233 como combustible fisible. Operó con éxito durante unos cinco años.

1976

El programa MSRE fue cancelado por falta de financiación. La decisión se vio influida por la carrera armamentista entre EE. UU. y la URSS, ya que los reactores con uranio generaban plutonio utilizable para armas nucleares. Esto marcó el rumbo de la industria nuclear durante cuatro décadas, dejando al torio como una tecnología prometedora olvidada.

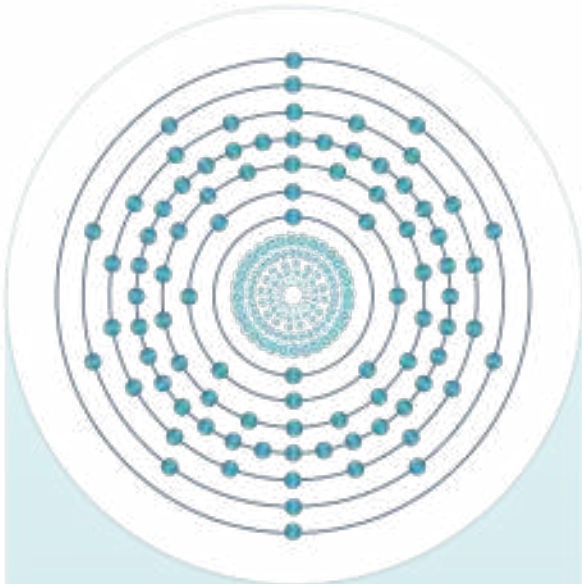
2006

Se digitalizaron y publicaron los documentos de investigación del MSRE original, reavivando el interés.

Actualidad

El torio gana terreno en los sectores científico, energético y ambiental, entrando ahora en la discusión pública.

Fuente: Energy with Thorium



¿QUÉ ES EL TORIO?

El torio es un elemento químico

- Número atómico: **90**
- Símbolo químico: **Th**
- Descubierta en **1828** por Jöns Jakob Berzelius
- Recibe su nombre por **Thor**, dios nórdico del trueno

Isótopo natural: Torio-232

- Vida media: **14,05 mil millones de años**
- Se descompone lentamente mediante la emisión de partículas alfa
- Es **ligeramente radiactivo** en su forma natural
- Puede ser transportado en pequeñas cantidades **sin riesgos** para la salud

Estructura atómica:

- **90 protones**
- **90 electrones**, de los cuales **4 son electrones de valencia**

El camino de la nuclear sin uranio está en marcha

EN ACCIÓN

La comunidad energética internacional se sobresaltó en la primavera de 2025 cuando científicos chinos anunciaron que habían conseguido agregar con éxito combustible nuevo a un reactor de sal fundida de torio, todo un hito tecnológico. El reactor experimental, en el que venían trabajando durante casi dos décadas, se ubica en el desierto de Gobi, al oeste de China, utiliza sales fundidas y torio, pero es todavía de pequeñas dimensiones, apenas puede generar dos megavatios de energía térmica de forma sostenible¹⁴.

El país asegura que tendrá listo en 2030 un reactor de sales fundidas de torio mucho más grande, capaz de producir 10 megavatios de electricidad (poco más que los seis megavatios del reactor que usa el MIT para sus experimentos). Además, la industria de construcción naval estatal china trabaja en un modelo de buques portacontenedores propulsados por torio, el KUN-24AP¹⁵, y concibe también que las futuras bases lunares podrían alimentarse de reactores de ese material.

China no es la única que pretende aprovechar las propiedades únicas del torio. Anteriormente, India, Japón, el Reino Unido, Estados Unidos y otros países han mostrado entusiasmo por su posible aplicación en la energía nuclear. El torio presenta varias ventajas sobre el combustible nuclear convencional, el uranio-235. Puede generar más material fisible (uranio-233) del que consume, si alimenta a un reactor refrigerado por agua o de sales fundidas, y se estima que la corteza terrestre superior contiene un promedio de 10,5 partes por millón (ppm) de torio, en comparación con aproximadamente 3 ppm de uranio¹⁶, lo que plantea benefi-

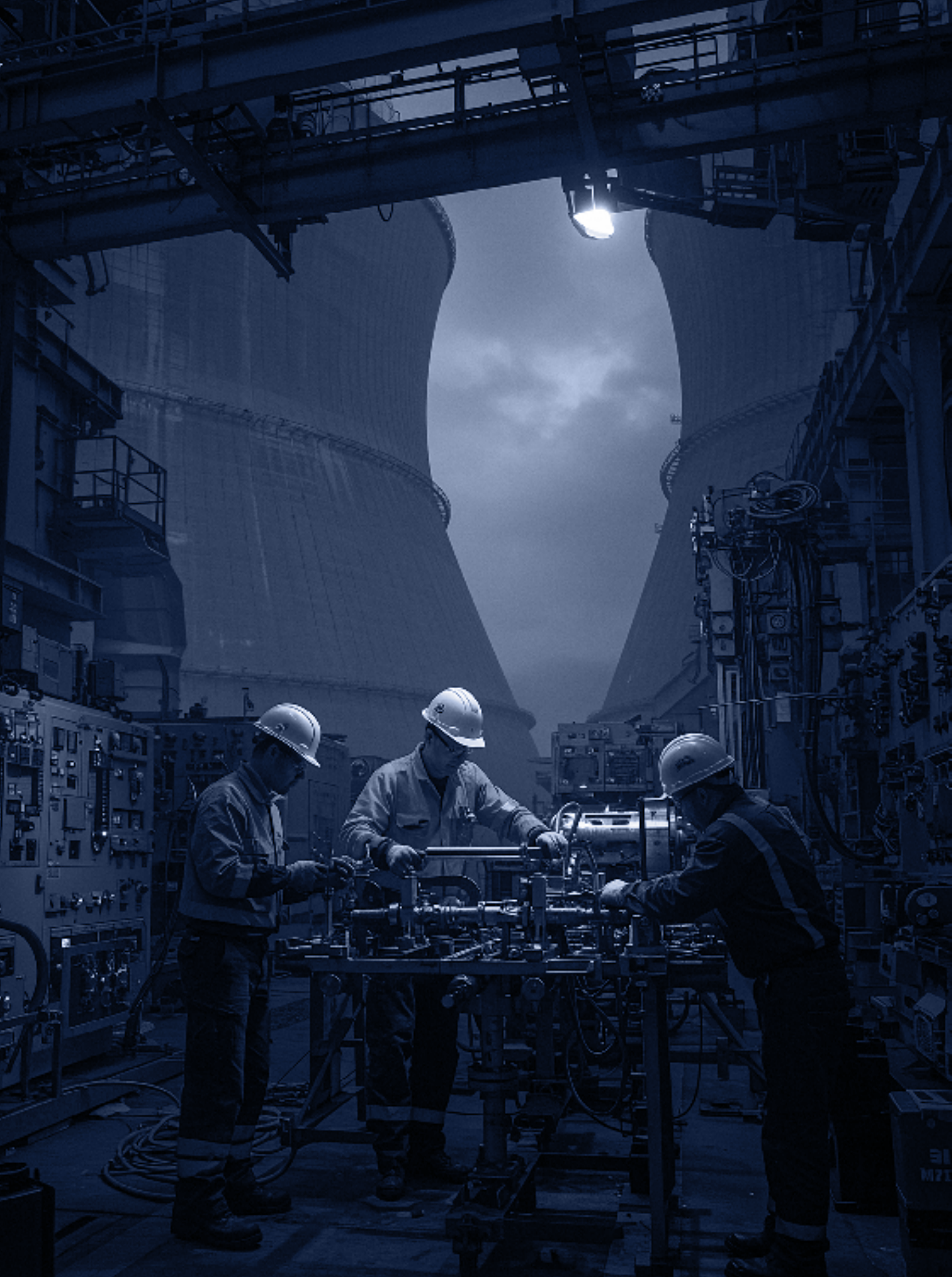
cios geopolíticos, pero también desafíos para su explotación económica¹⁷. Además, todo el torio extraído puede utilizarse como combustible, en comparación con menos del 1% del uranio.

Según los datos oficiales, India, Brasil, Australia y Estados Unidos poseen la mayor parte de las reservas mundiales de torio, que se estiman en 6,4 millones de toneladas¹⁸. Los recursos mundiales de monacita, el mineral del que se extrae principalmente, rondan los 16 millones de toneladas, 12 de las cuales se encuentran en depósitos de arenas minerales pesadas en las costas sur y este de la India. Otro gran depósito de veta de torio y metales de tierras raras se encuentra en Idaho en Estados Unidos¹⁹, cuyo Departamento de Energía Atómica (DAE) ha planificado el uso de los grandes depósitos de torio disponibles en el país como una opción a largo plazo²⁰.

Securing America’s Future Energy (SAFE) ha instado a financiar la investigación del torio para desarrollar aplicaciones industriales, de defensa y energéticas, incluido un banco de torio para gestionar el subproducto del proceso de refinado²¹. Un tercio de los 750 millones de dólares que considera necesario dedicar a la investigación en tierras raras debería destinarse al torio, al tiempo que sugiere otorgar una carta federal a una entidad para que asuma la propiedad y la responsabilidad. En los últimos años, el Congreso de los Estados Unidos, el Departamento de Energía (DOE) y el sector privado han expresado un interés considerable en el desarrollo y despliegue de reactores nucleares avanzados²². Las Academias Nacionales del país conformaron un comité de expertos centrado en el impulso de los reactores avanzados que podrían implementarse comercialmente en 2050 y el DOE creó la Oficina de Demostraciones de Energía Limpia para gestionar los dos principales proyectos.

Los principales depósitos de torio en Europa se encuentran en Groenlandia, Finlandia, Noruega y Turquía, aunque desde 2019 no se ha realizado ninguna extracción. Se estima que solo alrededor del 10% está disponible económicamente, contando con la recuperación de subproductos, pero en las condiciones actuales del mercado, no se espera la producción de torio en Europa²³.

China sostiene que hay motivos para atribuirle el liderazgo absoluto, pese a que las estadísticas oficiales la colocan en una posición discreta con 100.000 toneladas. Asegura disponer de una mina rica en torio en Mongolia Interior que podría, en teoría, satisfacer todas sus necesidades energéticas durante decenas de miles de años, produciendo al mismo tiempo un volumen mínimo de residuos radiactivos. Además, el complejo minero de Bayan Obo podría producir un millón de toneladas de torio, suficiente para abastecer a China durante 60.000 años, y habría identificado 233 zonas ricas en torio agrupadas en cinco cinturones clave desde el interior de Xinjiang hasta la costa de Guangdong, incluidas las arenas costeras Fujian y Hainan que contienen monacita con torio fácilmente extraíble²⁴.



El torio es un subproducto principalmente de la monacita, y su extracción requiere métodos más costosos que los del uranio, al menos mientras la demanda de torio y su aplicación en la energía nuclear no contribuyan a encontrar la forma de abaratarlos. Su separación requiere grandes cantidades de ácido y energía y podría generar cientos de toneladas de aguas residuales por cada gramo de torio purificado. La I+D y los experimentos para probar las instalaciones nucleares alimentadas con torio tampoco son económicas, debido a la falta de desarrollo de la industria y a la preeminencia histórica del uranio. A ello se suma su difícil manejo y el hecho de que, al ser un material fértil y no fisible, necesita un factor desencadenante, como el uranio o el plutonio, para activar y mantener una reacción en cadena. El torio y el uranio-233 son más peligrosos por su radiactividad al ser procesados químicamente y, por ello, son más difíciles de manipular²⁵. El Gráfico 4 muestra la capacidad transformadora de su energía.

El combustible de torio-uranio es caro, hasta el punto de que el equilibrio con el uranio solo se alcanzaría si el precio de este último se duplicara. No obstante, los ingresos generados por las ventas de electricidad, combinados con el coste de recarga de combustible durante el tiempo de inactividad del reactor, muestran que puede ser ventajoso: un ahorro del 14,8% si se compara en períodos de tiempo equivalentes²⁶. El alto coste de fabricación se debe en parte al alto nivel de radiactividad que se acumula en el U-233 separado químicamente del combustible de torio irradiado. Su reciclaje plantea problemas similares debido a la presencia de torio (Th-228) altamente radiactivo.

Algunos de estos problemas se solucionan con los reactores de sales fundidas, en los que se espera que el ciclo del combustible en equilibrio presente una radiotoxicidad relativamente baja. En ese caso, el ciclo del combustible de torio ofrecería beneficios para la seguridad energética que permitirían dibujar escenarios de energía nuclear creíbles a largo plazo: dominar los reactores de ciclo reproductor de torio de fisión nuclear podría aumentar la cantidad de material fisible en más de 100 veces²⁷ y el ciclo del combustible de torio-uranio podría implementarse en pequeños reactores modulares de sales fundidas²⁸, en los que a largo plazo la contribución energética del torio podría alcanzar el 89,1%.

La realidad es que no resulta fácil justificar económicamente, a corto plazo, una apuesta por la comercialización de combustibles de torio y eso ralentiza su expansión como posible alternativa. Requiere un gran volumen de pruebas, análisis y licencias para que pueda entrar en servicio y eso lo aleja del mercado y complica el apoyo gubernamental. Además, el uranio es abundante y barato, y representa solo una pequeña parte del coste de la generación de electricidad nuclear, por lo que, hoy en día, no existen incentivos reales para invertir en un nuevo tipo de combustible.

Desde un punto de vista geoestratégico, sí hay motivos para pensar, en cambio, en una demanda que sustente en el futuro esta apasionante carrera tecno-

La crisis energética derivada de la invasión de Ucrania en 2022 puso el foco sobre un riesgo que se creía ya superado, el de no tener garantizada “la seguridad de suministro”. Como consecuencia, la mayoría de los países revisaron sus políticas energéticas para reconstruir un mix diversificado y equilibrado que mitigara ese riesgo. Es en ese contexto donde se recupera con fuerza la apuesta por una tecnología, que a pesar de estar más que probada, ser económica y tener cero emisiones de CO2 no estaba entre las más populares, la energía nuclear.

(...)

|

Fernando Temprano

lógica. Amazon, Meta, Google y DOW aparecen entre los firmantes del llamado “Compromiso de los Grandes Usuarios de Energía” que apoya el objetivo de al menos triplicar la capacidad nuclear mundial en 2050²⁹. Los 391 GWe actuales de capacidad nuclear operativa, podrían elevarse hasta 686 GWe en 2040; y si las necesidades mundiales de uranio para reactores rondaron las 65.650 tU en 2023, podrían aumentar a casi 130.000 tU en 2040³⁰.

El *Libro Rojo*, una publicación conjunta del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Agencia de Energía Nuclear (AEN) de la OCDE, coincide en que la producción mundial de energía nuclear podría aumentar en más del 50% hasta 2040, y va más allá de esa fecha: su proyección es que la demanda mundial anual de uranio podría situarse entre las 200.000 y las 250.000 tU en la segunda mitad del siglo XXI³¹. La capacidad de extracción actual de las minas está muy lejos de esas cifras, y no hay que esperar gran cosa del suministro secundario de uranio, cuya participación será cada vez menor en el mercado mundial, y pasará del nivel actual de 11-14% de las necesidades de uranio para reactores a un 4-11% en 2050.

Con la capacidad nuclear global actual, sin contar el incremento del 50% previsto hasta 2040, se estima que las reservas comprobadas de uranio dan para unos 90 años. Los océanos contienen este mineral radioactivo en una concentración de 3,3 microgramos por litro, de modo podrían proporcionar decenas de miles de años de suministro, por lo que científicos del Laboratorio Nacional de Oak Ridge de EEUU han desarrollado un material capaz de adsorber seis gramos de uranio por cada kilogramo de material adsorbente. La escorrentía pluvial procedente de las masas terrestres repondrá de forma renovable el uranio que se extraiga del mar³². Pero esas opciones a futuro deberán convivir con nuevos episodios de inestabilidad geopolítica, como la reciente guerra entre Rusia y Ucrania, que incrementan el valor estratégico de la energía nuclear por motivos de seguridad y soberanía energética.

Es lógico que empresas de servicios públicos, los proveedores y los gobiernos de todo el mundo estén buscando, por consiguiente, oportunidades para diversificar sus suministros energéticos. Los países con los parques de reactores más grandes están alargando la

vida de las centrales existentes hasta los 60 años, e incluso hasta los 80 años en el caso de EEUU, pero más de 140 reactores alcanzarán ese límite en 2040³³. Los pequeños reactores modulares y microrreactores, podrían contribuir hasta con el 10% de la capacidad total en el más favorable de los escenarios, pero no constituyen una alternativa clara.

Los combustibles de torio necesitan un material fisible como *inductor* y las únicas opciones, en ese sentido, son el uranio (U-233 y U-235) y el plutonio (Pu-239), ninguno de los cuales resulta fácil de suministrar. También es complicado diseñar combustibles de torio que produzcan más U-233 en reactores térmicos que el material fisible que consumen, un proceso que se conoce como reproducción. Otra opción distinta consiste en utilizar el torio como matriz fértil para combustibles que contienen plutonio, como el combustible de óxido mixto de torio y plutonio (Th-Pu MOX). El problema en este caso es que no se produce plutonio nuevo a partir del torio, por lo que el nivel de consumo neto de plutonio es elevado.

La minería integrada del torio podría ser particularmente beneficiosa para cerrar la brecha de recursos de los metales críticos³⁴. La adopción y ampliación del ciclo del combustible nuclear de torio no debería requerir imperativamente la construcción de nuevas minas, porque hay muchas oportunidades para recuperar torio junto con la minería de uranio y, principalmente, de titanio, así como cantidades más pequeñas de la minería de estaño y hierro. Se estima que se podrían obtener al menos 100.000 de toneladas al año sin necesidad de poner en funcionamiento nuevas minas. Y si toda la generación de energía nuclear actual cambiara de uranio a torio, el suministro potencial vía subproductos alcanzaría 12 veces la cantidad de torio requerida, y 250 veces si se implementara el ciclo de combustible de reprocesamiento.

La investigación en curso³⁵ contempla, en primer lugar, la posible aplicación del torio en reactores de agua pesada Candu, es la línea en la que trabajan conjuntamente grupos canadienses y chinos. Los desarrolladores nucleares de India han diseñado un Reactor Avanzado de Agua Pesada (AHWR) específicamente para la combustión de torio, capaz de alcanzar una potencia de 300 MWe, aproximadamente el 75% de la cual provendrá del torio. Ese mismo país ha diseñado también un reactor AHWR300-LEU que utiliza uranio poco enriquecido y torio como combustible capaz de aportar el 39% de la energía.

El campo de los reactores de agua ligera presenta un enorme dinamismo, como otra posible opción. Investigadores noruegos están desarrollando combustibles de óxido de torio-plutonio (Th-MOX), susceptibles de ser utilizados en reactores existentes con mínimas modificaciones, gracias a la tecnología de uranio-MOX. Hitachi y la Japan Atomic Energy Agency (JAEA) evalúa la opción de utilizar combustibles de torio en un reactor de agua de reacción. El reactor de torio *Radkowsky* se ha adaptado a los reactores de agua ligera de tipo ruso introduciendo el diseño de las barras de combustible de semilla en la porción central propio de los reactores navales rusos.

La capacidad transformadora de la energía basada en torio



Fuente: Energy with Thorium

El Programa Marco Europeo ha apoyado tres ensayos de irradiación con combustibles de torio-plutonio y, en Estados Unidos, el Laboratorio Nacional de Idaho y el Centro de Ingeniería y Ciencias Nucleares de la Universidad Texas A&M, junto con Clean Core Thorium Energy³⁶, han colaborado en el desarrollo de un combustible de Energía Nuclear Avanzada para una Vida Enriquecida (ANEEL), que mezcla de uranio poco enriquecido de alto ensayo (HALEU) y torio.

En cuanto a la tecnología de sales fundidas, existe un renovado interés por los reactores de reacción de masas (MSR) alimentados con torio. Se están llevando a cabo proyectos en China, Japón, Rusia, Francia y Estados Unidos. Es uno de los seis diseños de reactores de Generación IV³⁷ considerados como dignos de mayor desarrollo. El Instituto de Física Aplicada de Shanghai (SINAP) impulsa dos líneas de trabajo en torno a los MSR, con el apoyo, significativamente, del Departamento de Energía de EEUU, a través del Laboratorio de Oak Ridge, que colabora con la Academia China de las Ciencias en el programa, dotado con un presupuesto inicial de 350 millones de dólares. Su primer gran resultado ha sido el logro científico de la primavera de 2025 mencionado anteriormente, que dará lugar a un reactor de 10 MWe (electricidad), ubicado cerca de Wuwei, en la provincia de Gansu, a partir de 2030.

Cuando entre en funcionamiento será capaz de generar también hidrógeno, ya que estará diseñado para producir 60 MW de energía térmica. De hecho, el sistema de sales fundidas de torio se está considerando para aplicaciones no eléctricas, gracias a las altas temperaturas del reactor. En caso de sobrecalentamiento o corte de energía, el sistema utiliza un tapón de sal congelada en el fondo de la vasija del reactor que se funde automáticamente, y permite que la sal radiactiva fundida se drene a una cámara de enfriamiento secundaria³⁸. El informe de impacto ambiental de la Academia China de Ciencias indica que el núcleo del reactor de sales fundidas tendrá tres metros de altura y 2,8 metros de diámetro³⁹. Uno de los temas a considerar es, precisamente, la naturaleza corrosiva de las sales fundidas, que exige aleaciones a medida como el Hastelloy-N, capaz de resistir tanto la radiación como la degradación química y de funcionar de forma fiable durante décadas, a temperaturas extremas y en entornos radiactivos.

A nivel estatal, es conocido también el plan de tres etapas de India para el ciclo del torio, propuesto por primera vez en la Universidad de Chicago en 1944. En el momento actual, el país está poniendo en marcha una flota de reactores rápidos refrigerados por sodio de 500 MWe, en los que producirá el plutonio necesario para liberar el potencial energético del torio en sus reactores avanzados de agua pesada (AHWR). Esto tardará entre 15 y 20 años, por lo que aún pasará algún tiempo antes de que pueda utilizar la energía del torio en alguna medida. En la parte final del modelo, los AHWR de India quemarán combustibles de torio-plutonio y generarán U-233, que eventualmente podrá reutilizarse como propulsor fisible, como se demostró en el núcleo final del reactor *Shippingport* en EEUU.

(...)
La apuesta estratégica por la energía nuclear y los nuevos proyectos e inversiones impulsaron, como ocurre siempre, la innovación tecnológica, que empieza retomando desarrollos iniciados hace años y que después fueron discontinuados por falta de interés. Hoy, algunos de esos desarrollos avanzan de forma rápida y prometedora mediante pilotos a elevada escala. Como ejemplos más destacados de los mismos se pueden mencionar los reactores de torio y/o de sales fundidas, que muy probablemente alcanzarán la escala industrial en tiempo reducido.
|
Fernando Temprano

No faltan las empresas de base científico-tecnológica emergentes que están atreviéndose a participar en la carrera para reemplazar el uranio en las centrales nucleares. Natura Resources⁴⁰ y la Universidad Cristiana de Abilene (Texas, EEUU), colaboran en un reactor de sales fundidas líquidas de un MW. Kairos Power desarrolla un reactor de alta temperatura refrigerado por sales de fluoruro en el Laboratorio Nacional Oak Ridge que utilizará combustible de partículas isotrópicas triestructurales (TRISO) a base de uranio. La empresa ha firmado un acuerdo con Google para suministrar un total de 500 MW en 2035 con los que alimentará sus centros de datos.

Copenhagen Atomics⁴¹ (Dinamarca) trabaja en un reactor de sales fundidas basado en torio y planea soldarlo para que los posibles ladrones tengan que forzar un sistema altamente radiactivo si quieren llegar al material y usarlo en armas. Transmutex recibió una inversión de 23 millones de dólares para desarrollar su concepto de reactor de torio⁴². La empresa emergente suiza se basa en décadas de trabajo iniciado por el Premio Nobel de Física Carlo Rubbia en el CERN en los años 90⁴³. Combina un acelerador de partículas llamado ciclotrón con un reactor subcrítico refrigerado por plomo. Transmutex pretende utilizar esta inversión para desarrollar una simulación digital completa de todo el sistema del reactor que minimice los errores durante su construcción. Podría construir su primer reactor en un plazo de 10 a 12 años.

Copenhagen Atomics está adoptando un enfoque completamente diferente, se centra en pequeños reactores de sales fundidas para satisfacer las necesidades energéticas de empresas privadas. Los reactores modulares producen 100 MW de energía térmica cada uno, y la empresa contempla la posibilidad de combinar un número ilimitado de unidades para conseguir una mayor potencia. En lugar de vender los reactores en sí, el modelo de negocio de Copenhagen Atomics permite a los clientes adquirir energía térmica como servicio, se ocupa de la implementación, la operación y el desmantelamiento de los reactores. Si el Reino Unido adopta su prototipo experimental, Copenhagen Atomics desea construir su primer reactor comercial en 2028 y desplegar unidades adicionales con una capacidad total de 12 GW para 2035. Estima que el ahorro en gasto energético que podría obtenerse en el país ronda los 8.000 millones de libras.

La startup franco-holandesa Thorizon⁴⁴ ha anunciado planes para construir un pequeño reactor modular de sales fundidas que utilizará las reservas existentes de combustible nuclear gastado, mezclado con torio, para producir 100 megavatios de electricidad, lo que será suficiente para abastecer a 250.000 hogares durante más de 40 años. Los expertos estiman que las actuales reservas de residuos nucleares podrían abastecer a Europa durante más de cuatro décadas.

Al igual que Thorizon, la empresa francesa NAAREA se ha propuesto sacarles provecho y desarrolla el XAMR, un microrreactor de sales fundidas diseñado para generar 40 megavatios de electricidad y 80 megavatios de calor utilizando combustible gastado de centrales nucleares convencionales⁴⁵. Ha firmado cerca de 30 memorandos de entendimiento con actores industriales, entre ellos Automotive Cells Company (ACC), para alimentar sus gigafábricas de baterías; EO Concept, una subsidiaria de Energy Observer, para producir hidrógeno y combustibles bajos en carbono destinados al transporte marítimo; y Phoenix Manufacture, que busca industrializar el reactor, desde el prototipo hasta la producción en masa. En Noruega, Thor Energy está probando un combustible con torio para su uso en centrales nucleares existentes. Flibe⁴⁶ y ThorCon⁴⁷, por su parte, planean utilizar en sus reactores un ciclo de combustible basado en torio en lugar de uranio. Terrestrial Energy también estudia operar su reactor como generador de torio en el futuro.

Cualquier opción de ciclo de combustible que se considere requerirá plazos relativamente largos para su implementación: entre 15 y 20 años para diseñar, construir, obtener los permisos y poner en marcha una nueva instalación de ciclo del combustible; el despliegue del primer reactor comercial podría concretarse en varios años; y la implementación completa de un ciclo del combustible podría requerir de un par de décadas a un siglo para la transición de una flota que utiliza un solo ciclo del combustible.

El torio ha suscitado un interesante debate acerca de su posible impacto en la proliferación nuclear. En principio, los combustibles de reactores de potencia a base de torio serían una fuente deficiente de material fisible utilizable en la fabricación ilícita de un dispositivo explosivo. El U-233 presente en el combustible de torio gastado contiene U-232, que se desintegra para producir nucleidos hijos muy radiactivos, y eso dificulta la proliferación, ya que genera importantes problemas de manipulación y mejora considerablemente la posibilidad de detección.

Otros expertos apuntan, en cambio, que si el combustible circula dentro y fuera del núcleo del reactor durante su funcionamiento, este movimiento facilita el robo de U-233. Un estudio financiado por la Administración Nacional de Seguridad Nuclear (NSA) concluyó que los subproductos del ciclo del combustible de torio, en particular el U-233, podrían ser un material atractivo para la fabricación de armas nucleares⁴⁸. Y otro de la Universidad de Cambridge también concluyó que los ciclos del combustible de torio presentan riesgos significativos de proliferación⁴⁹.



Junto a ello, conviene tener en cuenta también la salud de los mineros en la búsqueda de la explotación de recursos de torio⁵⁰. En la mina Steenkampskraal (Sudáfrica), las altas concentraciones naturales de torio provocan una elevada presencia de gas de torón. Y en cuanto al riesgo de los residuos, un estudio exhaustivo del DOE, realizado en 2014, reveló que los residuos de los ciclos de combustible de torio-uranio tienen una radiactividad similar a los ciclos de combustible de uranio-plutonio a los 100 años, e incluso mayor a los 100.000 años⁵¹.

China también es pionera en tecnologías de reactores avanzados. Los reactores de alta temperatura que utilizan gas como refrigerante son un área de gran interés para China; algunos reactores que utilizan esta tecnología se han puesto en marcha recientemente, y hay más en fase de planificación o construcción⁵².

Industria avanzada en un país que baja del tren nuclear

ESPAÑA

La condición de pionera de España en el ámbito de la energía nuclear, que le otorga el impulso a las centrales hace 50 años, ha consolidado un tejido industrial con enormes capacidades científico-tecnológicas. Con la aparición de proyectos de generación sin uranio, especialmente los basados en torio y sales fundidas, no debe extrañar que una empresa como Empresarios Agrupados firmar en 2022 un contrato para el desarrollo de la ingeniería de una central nuclear de IV Generación (GEN IV) en Indonesia⁵³ con 500 MW de potencia y promovida por ThorCon. La compañía española participa en la dirección del proyecto, el control de la documentación, el cumplimiento de la normativa, la preparación del emplazamiento, las actividades previas a la construcción y los acuerdos de licencia, según explica Foro Nuclear. Además, sus servicios de ingeniería estarán presentes desde el diseño hasta la construcción, la explotación y el desmantelamiento. El TMSR-500 de ThorCon está inspirado en los experimentos del Laboratorio Nacional de Oak Ridge del Departamento de Energía de Estados Unidos, de los que se ha hablado en el apartado anterior, al igual que el reactor de sales fundidas de 2 MW del Instituto de Física Aplicada de Shanghái. Será el primer Reactor de Sales Fundidas a escala comercial del mundo.

En España no se desarrollan en la actualidad proyectos de centrales nucleares de torio, pero entre sus yacimientos de tierras raras algunos incluyen este metal, como el de Matamulas (Ciudad Real). Entre las empresas que conforman el sector tecnológico con presencia en proyectos de energía nuclear en todo el mundo se encuentran⁵⁴ Amphos 21, EDP EAG (Empresarios Agru-



Comparación de reactores nucleares

			
Tipo de reactor	REACTOR DE URANIO DE AGUA LIGERA	REACTOR DE SEMILLA Y MANTA	REACTOR DE FLUORURO DE TORIO LÍQUIDO
Combustible	Barra de combustible de uranio	Óxido de torio y barras de óxido de uranio	Solución de fluoruro de torio y uranio
Entrada de combustible por salida de Gigavatios	250 toneladas de uranio bruto	4,6 toneladas de torio crudo y 177 toneladas de uranio crudo	1 tonelada de torio crudo
Coste anual del combustible para un reactor de 1 GW	\$50-60 millones	\$50-60 millones	\$10.000 (estimado)
Refrigerante	Agua	Agua	Autoregulación
Potencial de proliferación nuclear	Medio	Ninguno	Ninguno
Espacio necesario	200.000-300.000 metros cuadrados, rodeada de una zona de baja densidad de población.	200.000-300.000 metros cuadrados, rodeada de una zona de baja densidad de población.	2.000-3.000 metros cuadrados sin necesidad de ninguna zona de amortiguación

Fuente: Energy from Thorium

pados GHESA), Endesa, ENUSA, Enwesa Equipos Nucleares, Grupo Eulen, Naturgy, Proinso, Ringo Válvulas o Tamoin. Están especializadas en los servicios de apoyo a las instalaciones nucleares tanto para la operación como en el mantenimiento en más de una veintena de países, en los que han desarrollado fuertes vínculos tecnológicos. Esto ha supuesto un marco de mutuo beneficio, mediante el cual la industria española ha podido participar en el desarrollo de proyectos nucleares en todo el mundo.

La fábrica de elementos combustibles de Juzbado (Salamanca) ha suministrado desde el inicio de su operación en 1985 cerca de 30.000 elementos combustibles para centrales nucleares tanto españolas como extranjeras. En el ámbito de los bienes de equipo, el sector en nuestro país produce turboalternadores, válvulas, grúas, y tuberías, calderería o equipos para la manipulación y almacenamiento de combustible, en su mayoría para la exportación. Los servicios de ingeniería, por su parte, incluyen desde el suministro de simuladores a inspección y mejora en la explotación.

Se trata, en definitiva, de un potencial industrial con capacidad de liderazgo para adaptarse al cambio tecnológico que podría suponer la entrada de alternativas al uranio en la energía nuclear. De hecho, la industria nuclear española participa en proyectos internacionales de I+D de centrales nucleares avanzadas, en reactores modulares pequeños (SMR), fusión nuclear como el Proyecto Internacional ITER y en programas relacionados con la física de altas energías.

Un ejemplo de ello es la adjudicación, por parte del Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI), a la UTE conformada por Asturfeito, Empresarios Agrupados Internacional e Ingecid de un contrato para el desarrollo de soluciones innovadoras en el ámbito de la validación de sistemas y materiales en energía de fusión (DONES). Otro lote del contrato VATIST, tiene por objeto el desarrollo del validador tecnológico de la celda de ensayos del proyecto IFMIF-DONES (International Fusion Materials Irradiation Facility – DEMO-Oriented Neutron Source), una infraestructura científica localizada en Granada y concebida para apoyar el desarrollo de la energía de fusión nuclear, un tipo de energía limpia, segura y sostenible. Su objetivo principal es probar y evaluar materiales avanzados capaces de resistir las condiciones extremas dentro de un reactor de fusión nuclear, como altas temperaturas y altas dosis de radiación. En concreto, el alcance del contrato VATIST incluye el diseño, fabricación, montaje y pruebas del validador, conformado por la vasija de vacío, el blanco de litio, los blindajes radiológicos, los sistemas de servicio y el sistema de control de los equipos.

Relación de notas

¹ Integración de Renovables. Red Eléctrica. (Consultado el 18/06/2025).

² Centrales nucleares en España. (2025) Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (Consultado el 18/06/2025).

³ Las 10 Minas de Uranio más grandes del mundo (2020) Foro Nuclear. Available at: (Consultado el 18/06/2025).

⁴ Verificartve, G.I./ (2025) Uranio en España: Sí Hay Reservas Pero por ley no se puede extraer, RTVE.es. (Consultado el 18/06/2025).

⁵ J. Guillermo Sánchez León / The Conversation. (2024) Lo Que Sabemos sobre el único almacén de residuos radiactivos en España, National Geographic España. Available at: (Consultado el 18/06/2025).

⁶ Benke, E. (2023) Finland’s plan to Bury spent nuclear fuel for 100,000 years, BBC News. (Consultado el 18/06/2025).

⁷ Nuevo, D. (no date) Las plantas termosolares en España ubicación e impactos ambientales, Formación de ingenieros. (Consultado el 18/06/2025).

⁸ History of Molten Salt Reactors (sin fecha) FHR, UC Berkeley. (Consultado el 18/06/2025).

⁹ Midgley, E. y la agencia, I.A.E. (2025) ¿Qué son los reactores de sales fundidas?, OIEA (Consultado el 18/06/2025).

¹⁰ La Corrosión de Sales Fundidas Al

Servicio de las tecnologías energéticas: De Las Renovables a la nuclear (sin fecha) CIC energiGUNE. (Consultado el 18/06/2025).

¹¹ Thorium, World Nuclear Association. (Consultado el 18/06/2025).

¹² Advanced Heavy Water Reactor (AHWR) Research & Development Activities – Research Projects:AHWR , BARC. (Consultado el 18/06/2025).

¹³ Near term and promising long term options for the deployment of thorium based nuclear energy (2022) International Atomic Energy Agency. (Consultado el 18/06/2025).

¹⁴ Stephen Chen, “China has world’s first operational thorium nuclear reactor thanks to ‘strategic stamina’”, scmp.com, 17 de abril de 2025, consultado el 22/05/2025

¹⁵ Stephen Chen, “Chinese shipyard unveils plans for world’s first nuclear container powered by cutting-edge molten salt reactor”, SCMP, 5 de diciembre de 2023

¹⁶ Artem Vlasov, “Thorium’s Long-Term Potential in Nuclear Energy: New IAEA Analysis”, IAEA, 13 de marzo de 2023, consultado el 22/05/2025

¹⁷ Rajesh Kumar Jyothi et al. An overview of thorium as a prospective natural resource for future energy, Front. Energy Res., 15 de mayo de 2023, doi.org/10.3389/fenrg.2023.1132611

¹⁸ Caroline Banton, “4 Clean Energy

Alternatives to Uranium”, Investopedia, 12 de julio de 2022, consultado el 22/05/2025

¹⁹ “Thorium”, WNA, 2 de mayo de 2024, consultado el 23/05/2025

²⁰ “Thorium-Based Nuclear Reactors”, Gobierno de India, 26 de junio de 2019

²¹ The Commanding Heights of Global Transportation, SAFE, marzo de 2021

²² “Merits and Viability of Different Nuclear Fuel Cycles and Technology Options and the Waste Aspects of Advanced Nuclear Reactors (2023)”, National Academy of Sciences, 2023, DOI: 10.17226/26500

²³ “World thorium occurrences, deposits and resources”, International Atomic Energy Agency, 2019

²⁴ Stephen Chen, “China’s thorium survey finds ‘endless energy source right under our feet’”, SCMP, 1 de marzo de 2025, consultado el 23/05/2025

²⁵ Jesslyn Shields, “Could Thorium Power the Next Generation of Nuclear Reactors?”, howstuffworks.com, 16 de abril de 2024, consultado el 23/05/2025

²⁶ Du Toit, M. H., Cilliers, A. C., Preliminary economic evaluation of thorium-based fuels in PWRs. Nucl. Technol., 2014, doi: 10.13182/NT13-134

²⁷ Dittmar, M., The future of nuclear energy: Facts and fiction chapter

IV: Energy from breeder reactors and from fusion? Phys. Soc., 2018, doi:10.48550/arXiv.0911.2628

²⁸ Yu, C. et al. Thorium utilization in a small modular molten salt reactor with progressive fuel cycle modes, Int. J. Energy Res., 25 de junio de 2019, doi:10.1002/er.4511

²⁹ “Large Energy Users Pledge”, WNA, 2025

³⁰ “The Nuclear Fuel Report”, WNA, 21 de mayo de 2024

³¹ “Uranium Supply is Not a Significant Constraint to Using Nuclear Energy for Climate Mitigation”, NIA, 18 de enero de 2023

³² Thomas E Rehm, Advanced nuclear energy: the safest and most renewable clean energy, Chemical Engineering, marzo de 2023, doi.org/10.1016/j.coche.2022.100878

³³ WNA, 21 de mayo de 2024

³⁴ Ault, T. et al. Assessment of the potential of by-product recovery of thorium to satisfy demands of a future thorium fuel cycle, Nucl. Technol, 22 Mar 2017, doi: 10.13182/NT14-19

³⁵ WNA, 2 de mayo 2024

³⁶ Clean Core Thorium Energy

³⁷ “Generation IV Nuclear Reactors”, WNA, 30 de abril de 2024, consultado el 23/05/2025

³⁸ “China refuels thorium reactor without shutdown”, Nuclear Engineering International, 22 de abril de

2025, consultado el 23/05/2025

³⁹ Emily Waltz, Yu-Tzu Chiu, “Why China Is Building a Thorium Molten-Salt Reactor”, IEEE Spectrum, 30 de diciembre de 2024, consultado el 23/05/2025

⁴⁰ <https://www.naturaresources.com/>

⁴¹ <https://www.copenhagenatomics.com/>

⁴² Victoria Atkinson, “‘It’s an efficient machine to destroy nuclear waste’: nuclear future powered by thorium beckons”, Chemistry World, 17 de abril de 2024, consultado el 23/05/2025

⁴³ <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1984/rubbia/biographical/>

⁴⁴ Aman Tripathi, “Europe’s firm to use nuclear waste to generate 100 MW power for 250,000 households”, Interesting Engineering, 19 de mayo de 2025, consultado el 23/05/2025

⁴⁵ Aamir Kholam, “France’s NAAREA advances 40 MW reactor that uses spent fuel as energy source”, Interesting Engineering, 8 de abril de 2025, consultado el 23/05/2025

⁴⁶ <https://fiibe.com/>

⁴⁷ <https://thorconpower.com/>

⁴⁸ Charles G. Bathke et al. Cycles for Various Proliferation and Theft Scenarios, Nuclear Technology, 2012, doi.org/10.13182/NT10-203

⁴⁹ Stephen F. Ashley et al. Thorium fuel has risks, Nature, 5 de diciembre de 2012, doi.org/10.1038/492031a

⁵⁰ Lindsay, R. et al. Pilot study of thoron concentration in an underground thorium mine, Health Phys., 1 de octubre de 2022, doi: 10.1097/HP.0000000000001598

⁵¹ “Nuclear Fuel Cycle Evaluation and Screening – Final Report”, Departamento de Energía de Estados Unidos, 8 de octubre de 2014

⁵² Casey Crownhart, “A long-abandoned US nuclear technology is making a comeback in China”, MIT Technology Review, 1 de mayo de 2025

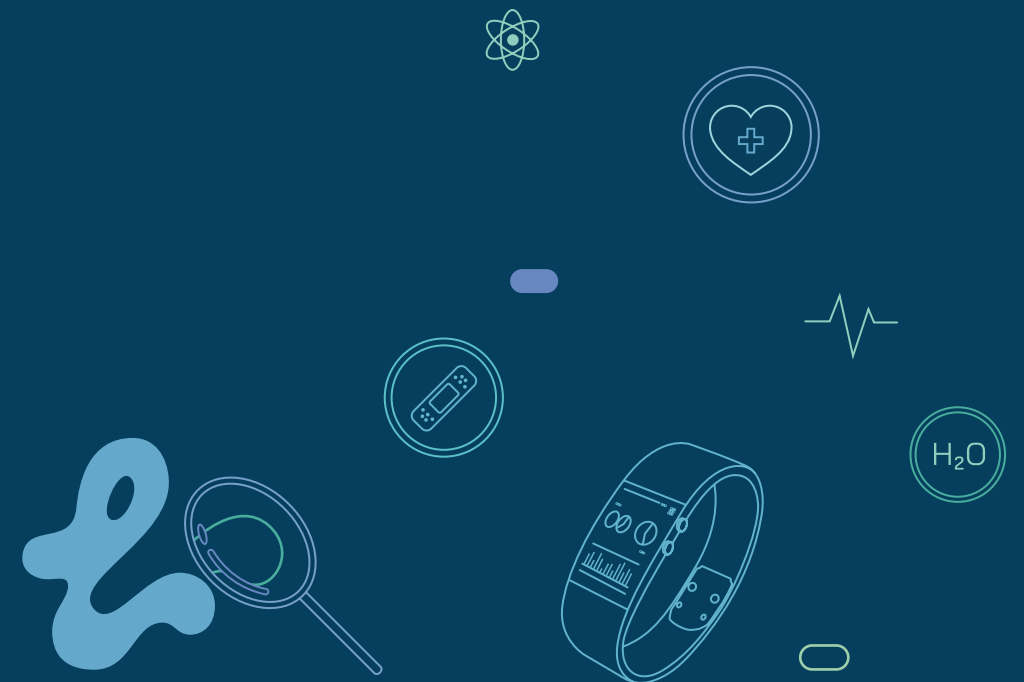
⁵³ “La española Empresarios Agrupados participa en el primer reactor comercial de sales fundidas del mundo”, Foro Nuclear, 25 de febrero de 2022

⁵⁴ “Industria Nuclear Española 2025”, Foro Nuclear, 2025



04

Nuevas tecnologías de diagnóstico: biosensores, wereables e implantables



Introducción

La tecnología *wearable* o vestible cada vez forma parte de la vestimenta diaria. Desde las pulseras inteligentes, que prácticamente han redefinido el nombre del reloj, hasta anillos, pieles electrónicas, biosensores y la tecnología implantable, estos dispositivos son los nuevos compañeros invisibles de nuestra vida. Todos esos dispositivos son más que un simple accesorio, tienen la misión de susurrarnos en todo momento cómo nos encontramos. Los *wearables* son capaces de detectar nuestra posición y movimiento, de medir la salud cardiovascular, e incluso algunos pueden analizar nuestro estado de ánimo y estrés a través del sudor. Por ello, su integración en el día a día ha tenido un enorme impacto en el ámbito de la salud. Gracias a los *wearables*, cualquier persona puede monitorizar y comprender en todo momento su bienestar. Es decir, han democratizado el acceso a los datos de salud y, con ello están fomentando una cultura de prevención y autocuidado.

Además, medir de forma constante los parámetros de la salud supone otra ventaja, ya que cuanto mayor es el número de datos que se tienen en una situación normal, más sencillo es detectar alteraciones que puedan suponer un riesgo. De este modo, la recopilación masiva de información, junto con los avances en inteligencia artificial, han resultado en el desarrollo de algoritmos capaces de interpretar la ingente cantidad de datos y predecir situaciones que puedan poner en peligro a las personas, como caídas o alteraciones cardíacas.

Es por esto que una buena implementación de la tecnología *wearable* tiene el potencial de revolucionar el sistema de salud. Sin embargo, su ubicuidad también plantea retos éticos y de privacidad que deben situarse en el centro de las futuras investigaciones, dado que la gestión responsable de los datos que generan es fundamental para garantizar la confianza y la seguridad de las personas usuarias.

Monitorizar la salud con dispositivos de consumo y nanotecnología

POR DENTRO

En todos los armarios hay zapatos, camisas, faldas y pantalones. Piezas de vestir con las que salir a la calle, que transmiten nuestra personalidad, o que muestran (o no) nuestra afinidad con la moda actual. Pero en esta última década ya no sólo llevamos ropa encima. Las tecnologías vestibles o *wearables* han ganado una enorme popularidad, ya que nos ofrecen, además de una nueva prenda con la que mostrar al mundo quiénes somos, el control sobre datos que produce nuestro cuerpo. Los *wearables* recogen en su interior décadas de investigación y avances científicos que les permiten, desde triangular nuestra posición, hasta medir el latido de nuestro corazón. Estos parámetros, sumados a un teléfono móvil presente en el bolso o bolsillo de casi cualquier persona, permiten mantener una monitorización constante de nuestra salud. Datos que, analizados correctamente, pueden detectar a tiempo y avisar de forma autónoma en el caso de que una persona sufra una caída, vaya a tener un infarto o tenga los niveles de glucosa bajo mínimos. En definitiva, estos nuevos accesorios y prendas de ropa no sólo son pura estética, sino que la aúnan funcionalidades muy interesantes.

Echando la vista atrás, el reloj, tanto en su versión de bolsillo (de alrededor del siglo XV), como de pulsera (atribuido al virtuoso relojero Abraham-Louis Breguet para Caroline Murat, la hermana menor de Napoleón Bonaparte en 1812¹), podría considerarse unas de las primeras formas de tecnología vestible. Los relojes hacían bien su función e informaban a su usuario de la hora siempre que lo quisiera, sin tener que acudir a una estancia con un reloj de pie o, en caso de que se encontraran a la intemperie, sin depender de otras formas más rudimentarias y menos precisas de medición del tiempo.

Aunque importantes para la época, este avance nos puede saber a poco en la actualidad y, por ello, para ver una evolución significativa en la tecnología, hemos de avanzar hasta principios del siglo XXI, cuando se produjo una fantástica combinación entre la miniaturización de los ordenadores y un entusiasmo generalizado por lo relacionado con la tecnología. Era la época de la popularización de los teléfonos móviles, el inicio de ordenadores portátiles personales y de un internet que expandía constantemente sus raíces. Los ordenadores salieron de su estancia habitual, los despachos, para lanzarse al mundo y, con la era digital, comenzó la computación ubicua. Siempre habría un ordenador listo para recopilar y analizar datos cerca del usuario. Con este cambio en la realidad cotidiana, también aparecieron nuevas oportunidades y posibilidades para las empresas que supieron ver el enorme potencial.

El desarrollo de sensores miniaturizados, baterías de larga duración y sistemas de comunicación inalámbrica han logrado crear una comunión entre los dispositivos inteligentes y el cuerpo humano. Una comunión que está revolucionando el bienestar personal y la sanidad, y permite a atletas de élite y a profesionales de distintos sectores alcanzar su máximo potencial. En la actualidad, nos encontramos en un entorno en el que la tecnología se vuelve una extensión de la persona, una era de los datos que define la sociedad contemporánea.

En la actualidad la variedad de tecnologías vestibles sigue en aumento. Las más comunes son aquellas accesorias, como pulseras o anillos que han popularizado los gigantes de la tecnología. Estos *wearables* también actúan como complementos y están sujetos a modas o *trends*. Tienen, por lo general, un número elevado de funciones y, generalmente, sacrifican la precisión en sus funcionalidades por este motivo. Excepto en casos contados, no se trata de dispositivos con grado médico, pero sí que ayudan a dar una idea del estado de salud global, o de si se está cumpliendo un plan de deporte determinado.

En el caso concreto de la práctica de deporte, el uso de bandas, parches y camisetas inteligentes cada día es más común. Ofrecen una doble función: por un lado, ayudan a adecuar el entrenamiento de un deportista a su estado en tiempo real; y, por otro, permiten detectar irregularidades en el funcionamiento del cuerpo derivadas del exigente trabajo físico que ha de soportar. De este modo, tanto los deportistas como sus entrenadores pueden saber a ciencia cierta que están aprovechando al máximo las capacidades del atleta.

Por último, también se encuentran los biosensores portátiles o implantables. Estos suelen estar más especializados en realizar una tarea concreta, como medir la glucosa en sangre. Los usuarios los pueden llevar por tener una condición médica conocida, como la diabetes. Tanto los sensores como los dispositivos son distintos según el parámetro que tengan de detectar y la función que deban cumplir².

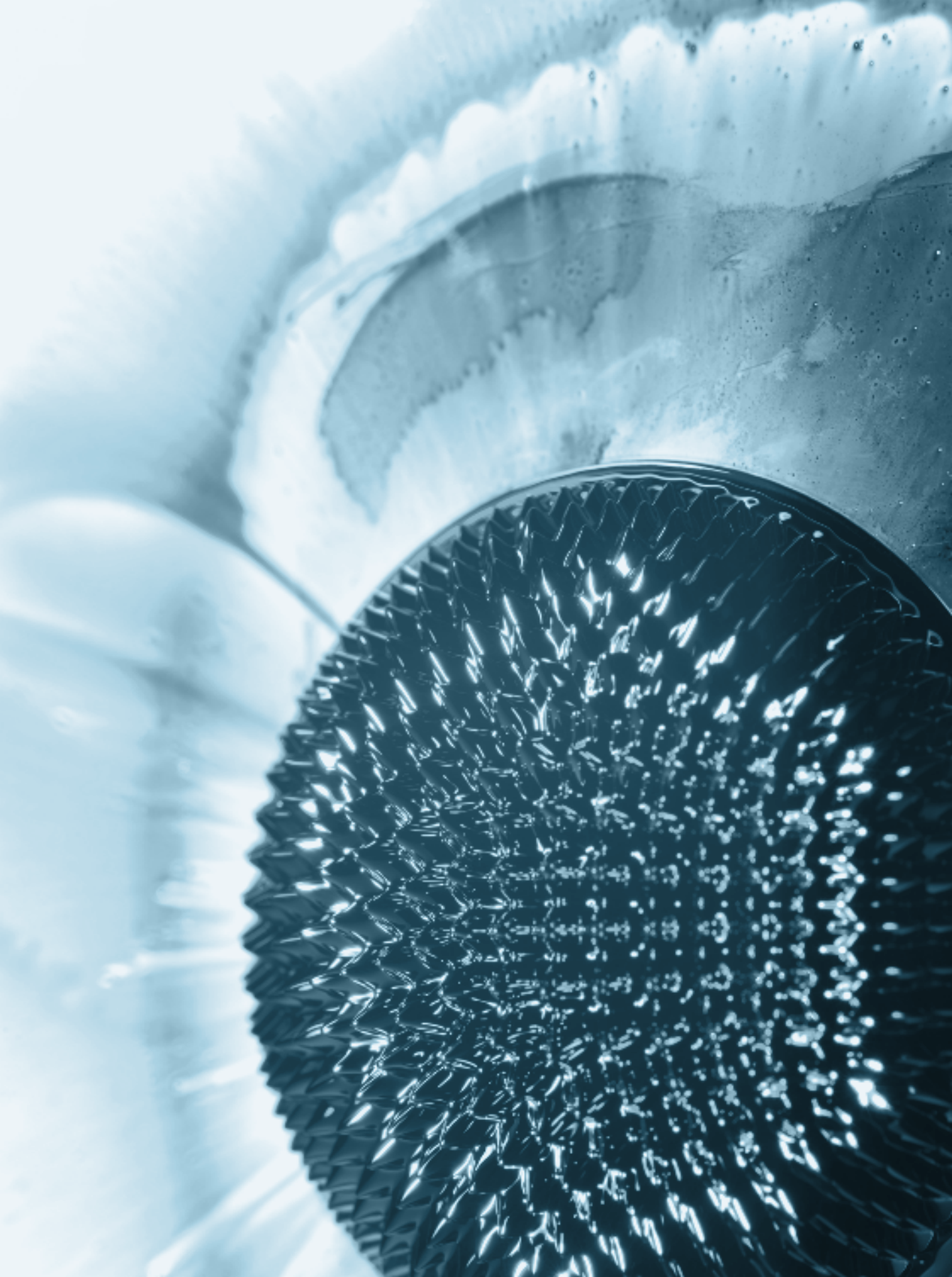
Para comunicarse con el dispositivo receptor, que analizará los datos, los wearables utilizan emisores bluetooth, ciertas radiofrecuencias, o la tecnología

NFC, similar a la que emplean las tarjetas *contactless*. De este modo, no necesitan almacenar y analizar la información que recogen, sino que el esfuerzo computacional recae sobre el dispositivo móvil, la tablet o el ordenador más cercano. En la actualidad, esta información normalmente se envía a la nube a través de internet, donde es analizada en los servidores centrales de cada compañía.

Se trata de los dispositivos más comunes y han ido ocupando paulatinamente el espacio de los relojes de muñeca de antaño por su diseño y su versatilidad. Además de ofrecer la hora, muchos de estos relojes inteligentes incluyen una tecnología óptica denominada fotoplethysmografía que permite detectar la cantidad de sangre que fluye bajo la piel. El mecanismo tras esta técnica es sencillo, pero a su vez muy ingenioso. Las personas más curiosas habrán notado que, cuando el reloj comienza a medir la frecuencia cardíaca enciende una luz verde dirigida hacia la piel. Esta luz incide en una región del dorso de la mano denominada anastomosis radiocarpiana dorsal, que une los vasos sanguíneos de la arteria radial y la arteria interósea dorsal. El gran número de conductos se traduce en un gran volumen de sangre recorriendo la zona y, por tanto, una oportunidad para medir parámetros relacionados con la salud, como la frecuencia del latido cardíaco o la cantidad de oxígeno en sangre.

Esta tecnología es posible porque la sangre es de color rojo, porque absorbe todas las longitudes de onda de la luz menos la roja. Por tanto, si enfocamos hacia la sangre una luz verde, la absorberá y, a mayor cantidad de sangre, mayor absorción de luz verde. Acompañando a los LEDs, unos fotodiodos son capaces de detectar la cantidad de luz que vuelve al reloj y, con ello, el volumen de sangre que hay en ese momento bajo la piel. La luz, que parpadea cientos de veces por segundo, realiza cientos de mediciones y, con ello revela las sutiles variaciones que se producen durante el latido del corazón y consiguen mostrarlo, en directo, en la pantalla. Para la concentración de oxígeno en la sangre, la fotoplethysmografía también detecta variaciones en la intensidad del color de la sangre. La sangre tiende a tener un color rojo más intenso en función de su nivel de oxigenación³.

Además de estos sensores, algunos *smartwatches* de empresas conocidas también incluyen electrodos capa-



"El desarrollo de biosensores vinculados a la salud es clave para lograr diagnósticos rápidos, precisos y accesibles, impulsando una medicina más preventiva, personalizada y cercana al paciente"

|

Laura Lechuga

ces de realizar un electrocardiograma. Estos sensores están aprobados por la FDA, por lo que tienen validez médica, y son muy útiles para llevar un control en personas con antecedentes cardíacos. Pueden detectar irregularidades en el latido (fibrilación auricular) o incluso situaciones previas a un infarto. No son tan sensibles como los electrocardiogramas convencionales, puesto que estos últimos realizan mediciones simultáneas de 12 o más áreas del corazón y el reloj sólo analiza una. Pero los ensayos clínicos que realizaron ambas compañías dieron unos resultados muy similares a los sanitarios. La ventaja es que este dispositivo lo podemos llevar encima cómodamente y no requiere electrodos.

Por último, los relojes inteligentes también incluyen otras funciones como el podómetro, termómetro y un registro de posición GPS y movimiento. Algunos de ellos tienen esta tecnología incorporada en la propia pulsera, mientras que otros delegan la función al teléfono móvil. Con todos estos datos, más los de la sangre, pueden hacer estimaciones acerca de la cantidad de los pasos y distancia recorrida, el nivel de estrés, las calorías quemadas, la calidad del sueño, o detectar caídas y avisar al sistema sanitario. La fiabilidad de los datos depende, en gran medida, de lo afinado que esté el software de análisis y de los algoritmos propios de cada aplicación utilizada para el dispositivo.

En la misma línea que los relojes y pulseras, los anillos inteligentes ofrecen una versión miniaturizada con prácticamente la misma funcionalidad. En este caso, el anillo únicamente contiene los detectores y un sistema bluetooth para comunicarse con el dispositivo móvil, que es el que aporta toda la capacidad de computación para analizar los datos de los detectores. Una de las mayores diferencias es que los anillos no tienen pantalla y, por tanto, dependen completamente del teléfono móvil. También ofrecen, de forma limitada, las mismas funciones que las pulseras, aunque su diseño minimalista puede atraer a más personas a la tecnología *wearable*, ya que al usuario puede resultarle más cómodo depender de un anillo que de una pulsera o reloj.

Recientemente, debido a la cantidad de datos que manejan estas tecnologías, varias empresas están empleando *machine learning* y otros tipos de inteligencia artificial para poder ordenar y dar sentido a la informa-

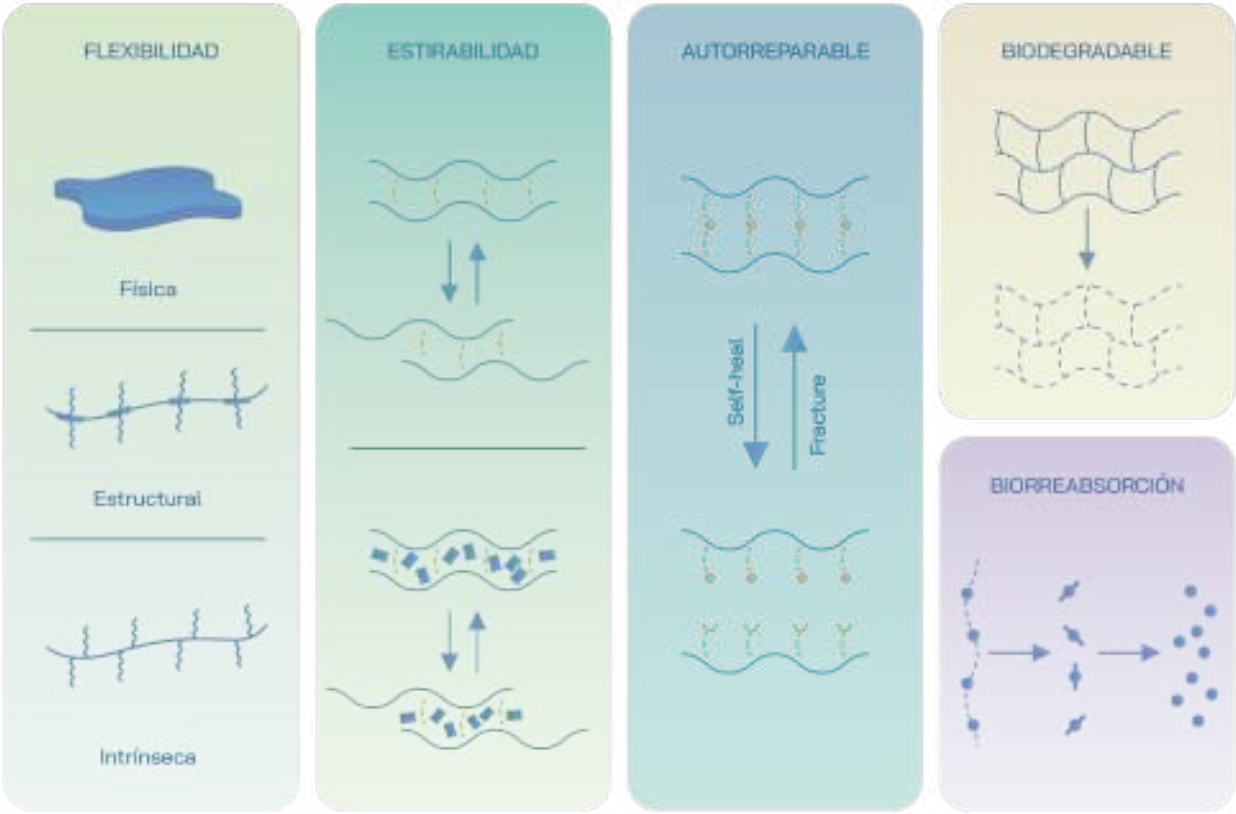
ción, o para mejorar la experiencia de usuario. De este modo, pueden ofrecer recomendaciones personalizadas tanto en materia de salud, como de estilo de vida, y comunicarlás con un lenguaje natural. La implementación de la IA es, todavía, parcial y ofrece un mundo de oportunidades para que se puedan obtener todavía más utilidades a partir de los sensores.

La Universidad de Washington St. Louise y la de Texas ofrecen, respectivamente una ventana a este mundo, ya que, en la actualidad, están llevando a cabo dos proyectos que podrían beneficiar a miles de personas. En la primera, un equipo que aúna ingeniería, ciencia de datos y ginecología está creando un sistema para averiguar el riesgo existente de que se adelante un embarazo a partir de cambios en los patrones del sueño de la futura madre⁴. En Texas, en cambio, utilizan estos mismos datos para advertir de las sutiles diferencias entre una persona enferma que todavía no ha empezado a mostrar síntomas. De este modo, podrían prevenir de forma más eficaz la posible transmisión de epidemias⁵. Se trata de dos claros ejemplos de la unión entre IA y los datos de los dispositivos *wearables*, y no son los únicos. Otras universidades también están encontrando correlaciones entre sutiles cambios de la postura y el ritmo de caminar con enfermedades neurodegenerativas como alzhéimer o párkinson⁶, ofreciendo así un posible diagnóstico y tratamiento temprano.

Ahora bien, con estos sistemas también existe cierto riesgo, porque en ocasiones puede ser complejo diferenciar entre un usuario sufriendo una crisis o un usuario que está en su estado normal. Debido al potencial de falsos positivos de los *wearables* sin grado médico, los hospitales pueden malgastar recursos médicos en atender falsas emergencias. Los datos recogidos por estos dispositivos son altamente sensibles, ya que recogen información médica importante, así que es vital que estén adecuadamente cifrados y anonimizados para que no acaben expuestos y vendidos en portales.

Además de los *wearables* más populares, también ha llegado recientemente al mercado todo un mundo de dispositivos electrónicos centrados en la monitorización constante de datos médicos. Estos dispositivos, pensados para pacientes que requieren monitorización durante un período de tiempo o para personas con enfermedades crónicas, han de cumplir tres condiciones: comodidad y discreción para el usuario, y precisión en la toma de datos para el personal sanitario. El Gráfico 1 repasa las principales propiedades que se buscan en los materiales con los que se fabrican y el Gráfico 2 recopila algunos ejemplos de biosensores en medicina. La opción más común son los parches, que adhieren los sensores a la piel y proporcionan datos en tiempo real sobre ciertos parámetros útiles, como los ya mencionados. También se están desarrollando sistemas más avanzados, como las pieles o tatuajes electrónicos, en los que los sensores flexibles pueden adaptarse mejor a las imperfecciones del cuerpo humano y cubrir áreas en las que se generan grandes tensiones, como las articulaciones.

Propiedades deseadas en materiales destinados a aplicaciones de implantación.



Fuente: Applied Sciences.

Hasta ahora, hemos tratado métodos de detección ópticos (como la fotople-tismografía) o mecánicos (como los sensores de movimiento), pero muchos de los dispositivos centrados en salud se basan en el análisis de biomarca-dores, es decir, análisis químicos o biológicos de sustancias que expulsa el cuerpo. Entre ellos destaca el análisis de los solutos presentes en el sudor ya que este contiene metabolitos, como lactato o urea, y minerales, que pro-porcionan una visión no invasiva del estado de salud fisiológico del cuerpo⁷. No obstante, todavía existe una gran incertidumbre para el análisis de datos, ya que la composición y cantidad de sudor dependen de un gran número de variables y, por tanto, es posible que la información analizada no sea con-clusiva. Por ello, los expertos todavía piden prudencia a la hora de tratar de obtener datos deportivos o médicos a partir de este fluido.

Entre las posibles soluciones a estos problemas destacan la creación de sensores que son capaces de medir de forma simultánea los solutos del sudor y otros parámetros físicos, como la impedancia de la piel. También se está investigando el uso de la microfluídica para monitorizar varios marca-dores presentes en la sudoración a tiempo real, mientras se recoge fluido de forma rápida y continua. De este modo, se sortearían los problemas de imprecisión y la fiabilidad que ocurren en los métodos tradicionales.

Los biosensores no sólo pueden medir sustancias o los parámetros físicos, sino que también pueden recoger datos de la propia composición de la piel. Recientemente se ha demostrado que un biosensor tipo venda puede detec-tar la tirosinasa, una enzima necesaria para la producción del pigmento mela-tonina en la superficie de la piel. Para ello, se detecta el producto de la reac-ción enzimática, la benzoquinona, con el que es posible averiguar la actividad de la reacción⁸. Este tipo de sensor puede ser muy útil para distinguir los primeros estadios de un melanoma, ya que, en ese caso, se produce un gran aumento de dicha actividad enzimática. En este (y prácticamente en cual-quier) tipo de cáncer, la detección temprana es vital para que los tratamien-tos sean efectivos, por ello, poder monitorizar de forma constante una zona sospechosa podría ayudar en el tratamiento y la recuperación del paciente.

Además de los parches, los textiles inteligentes también se erigen como una de las plataformas más prometedoras en el ámbito deportivo y de la salud. Debido a sus métodos de fabricación adaptables y su amplio potencial de aplicación se trata de dispositivos con una gran flexibilidad tanto en sus pro-piedades como en su diseño. En los textiles inteligentes, las propias fibras pueden incluir dispositivos electrónicos y circuitos integrados que detecten parámetros médicos en todo el organismo, para así medir desde la tempera-tura en distintas zonas del cuerpo, hasta hormonas, como el cortisol⁹.

Otro tipo de tecnología son los *wearables* implantables, que son aquellos dispositivos que se introducen en el interior del organismo. Requieren de una intervención quirúrgica mayor y son, en la actualidad, un último recurso para tratar una dolencia o una enfermedad. Un claro ejemplo son los marcapasos,

con millones de usuarios en todo el mundo y que se encargan de controlar el ritmo cardíaco. En la actualidad, también se están desarrollando implantes neuronales, que detectan las corrientes cerebrales y, mediante una interfaz cerebro-ordenador, conectan el mundo biológico y el computacional. De este modo, se ha logrado que personas que habían perdido una extremidad, recuperen parte de su funcionalidad, o personas que habían perdido la voz debido a la ELA, puedan volver a comunicarse con el mundo exterior.

Es el caso de Casey Harrel, que perdió la capacidad del habla por culpa de la ELA con 42 años. Según dijo en una entrevista al portal de noticias de la UC Davis, no poder comunicarse era frustrante y desmoralizador. «Es como estar atrapado», sentenciaba. Por ello se apuntó a un estudio pionero para probar un neuroimplante capaz de transformar sus pensamientos en palabras¹⁰. De forma similar, describía su experiencia Noland Arbaugh, que quedó completamente paralizado tras un problema en una inmersión. Arbaugh fue la primera persona en recibir un implante neural de Neuralink, la empresa de transhumanista fundada por Elon Musk. Ambos, en la actualidad, pueden comunicarse a través de la interfaz cerebro computador. Lamentablemente, en el caso de Arbaugh una serie de problemas relacionados con la cicatrización del tejido cerebral alrededor del implante han puesto en riesgo el sistema, y puede que sea necesario repetir la cirugía en los meses venideros.

Estas tecnologías han de enfrentarse a grandes obstáculos, ya que, por un lado, los materiales han de ser resistentes y biocompatibles para adherirse al tejido sin provocar daños. Pero a su vez han de evitar el *biofouling*, es decir, la adhesión de proteínas a los sensores que puedan bloquear las señales (como está sucediendo en el caso de Neuralink). Además, los problemas no son sólo técnicos, sino que también plantean interrogantes éticos acerca del tratamiento de los datos facilitados por el dispositivo.

El futuro de la monitorización personal, en definitiva, parece avanzar hacia una integración cada vez mayor de la tecnología en la vida cotidiana. Las pulseras, anillos, y dispositivos más especializados están adentrándose en el sistema sanitario y ofreciendo a sus usuarios una visión novedosa acerca de su estado de salud. De forma

paralela, la colaboración entre ingenierías y ciencias biomédicas es una tierra fértil para la aparición de nuevas tecnologías y la mejora de las existentes. Dichos avances auguran un futuro prometedor en la detección de enfermedades, la medicina personalizada y, en definitiva, la mejora de la calidad de vida.

Ejemplos de sensores implantables en medicina

Fuente: AIP Bioengineering

Campo de la medicina	Sensor(es) dominante(s)
CARDIOLOGÍA	Monitores cardíacos mecánicos y electrofisiológicos
NEUMOLOGÍA	Sensores de presión y gases
NEUROLOGÍA	Electrodos para monitoreo electrofisiológico
ONCOLOGÍA	Sensores bioquímicos
DIABETES	Sensores amperométricos y ópticos de glucosa
GASTROENTEROLOGÍA	Sensores mecánicos y bioquímicos
OTORRINOLARINGOLOGÍA	Sensores de presión (sonido)
OFTALMOLOGÍA	Sensores de presión
UROLOGÍA	Sensores de presión y movimiento
ORTOPEDIA	Sensores de presión y deformación

Beneficios y aplicaciones
Monitorización de la actividad cardíaca, incluida la variabilidad de la frecuencia cardíaca y el gasto cardíaco; detección de fibrilación auricular, arritmias, insuficiencia cardíaca e isquemia silenciosa.
Monitorización de la permeabilidad de las vías respiratorias superiores, frecuencia respiratoria y niveles de oxígeno/dióxido de carbono; optimización de la terapia en pacientes con apnea obstructiva del sueño.
Monitorización de la actividad neuronal, detección de cambios en la función cerebral, medición de señales ECG y guía para el funcionamiento de implantes de estimulación o prótesis.
Seguimiento de la respuesta tumoral a quimio y radioterapia, detección de recurrencias tumorales, y monitorización de marcadores tumorales.
Monitorización continua de glucosa, incluyendo variabilidad y predicción de niveles de glucosa para ayudar en el ajuste de dosis de insulina.
Monitorización de la motilidad gastrointestinal, ingesta de alimentos o medicamentos; detección de sangrado gastrointestinal o desequilibrio gástrico/bacteriano.
Tratamiento de la pérdida auditiva neurosensorial severa a profunda, percepción y comprensión del habla, localización del sonido.
Monitorización directa y prolongada de los cambios de presión intraocular para la predicción y prevención del glaucoma y otras enfermedades oftálmicas.
Detección de micromovimientos autónomos en la vejiga relacionados con su fisiología, con potencial para mejorar el diagnóstico y tratamiento de condiciones urológicas.
Monitorización de fuerzas mecánicas para hacer seguimiento a la recuperación de tendones tras cirugía, con potencial para diagnósticos más precisos y tratamientos personalizados.

Colaboración a gran escala para impulsar los biosensores

EN ACCIÓN

Las interacciones entre todos los sistemas fisiológicos, en particular entre el sistema neuroendocrino y el hipotálamo, controlan variables fisiológicas como el crecimiento y el desarrollo, las vitaminas, la termorregulación, el equilibrio energético, la oxigenación, la desintoxicación, el equilibrio ácido-base y la osmorregulación. Los biosensores para el diagnóstico de enfermedades¹¹ buscan detectar y monitorizar los cambios en estos factores, pero todavía deben superar diferentes desafíos. En Estados Unidos, la FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos) sólo había autorizado 96 dispositivos con sensores totalmente implantables entre 1982 y 2023¹². El Parlamento Europeo ha abordado las medidas posibles para mejorar la vida de las hasta 36 millones de personas de la UE viven con una enfermedad rara, según la Agencia Europea de Medicamentos. En más del 90% de los casos, carecen de suficientes herramientas de diagnóstico y tratamiento, por el alto coste de la investigación y el desarrollo (I+D) y la baja tasa de éxito, que crea fallos de mercado conocidos como “necesidades médicas insatisfechas”¹³.

La mayoría de los sistemas de monitorización de las constantes vitales existentes en todo el mundo solo proporcionan información global y no consiguen monitorizar tejidos profundos ni trabajar en tiempo real. Asimismo, no es fácil obtener una cantidad suficiente de objetivos de prueba y la contaminación del entorno puede afectar los resultados, de modo que resulta imprescindible estudiar las correlaciones entre las pruebas y los objetivos de detección buscados.

Su papel puede resultar clave, no obstante, en el segui-

miento y tratamiento de enfermedades con impacto crítico en el bienestar de la población. Alrededor de 1,5 millones de personas mueren cada año directamente a causa de la diabetes, la mitad de ellas antes de cumplir los 70 años. Dicha dolencia provoca también complicaciones como enfermedades renales y cardiovasculares e hipoglucemia, que pueden producir daño cerebral y cardíaco agudo. La enfermedad renal crónica (ERC) se ha identificado como una enfermedad epidémica mundial en las últimas tres décadas¹⁴. Alcanza a más de 800 millones de personas, aproximadamente al 10% de la población mundial, y en 2040 podría haber pasado de ser la decimosexta causa principal de muerte a la quinta.

Las enfermedades cardiovasculares, siguen siendo la principal causa de mortalidad a nivel mundial, en el 85% de las ocasiones por accidentes cerebrovasculares y ataques cardíacos¹⁵, y la hipertensión afecta aproximadamente al 30%-45% de la población adulta mundial, según la OMS. Los tratamientos actuales, en el primer caso, siguen basándose en *stents* vasculares e injertos implantables sintéticos para tratar los vasos sanguíneos cuando se bloquean. Los beneficios económicos pueden ser enormes si se encuentran soluciones alternativas, porque el mercado de *stents* se estima en 12.730 millones de dólares y el de injertos en 5.400 millones¹⁶.

La carrera de la innovación propone, como vía alternativa, en ambos casos, la introducción de biosensores para la monitorización vascular en tiempo real, capaces de simular las funciones de un electrocardiograma en el propio hogar¹⁷. No hay que olvidar que, gracias a los avances en microfabricación, por ejemplo, un marcapasos moderno puede medir tan solo 2,5 cm y pesar menos de 15 gramos. Sin embargo, el único dispositivo que había recibido la autorización de la FDA para monitorizar a pacientes con insuficiencia cardíaca hasta 2023 era el *CardioMEMS* intraarterial¹⁸.

En el ámbito neurológico, entre 150.000 y 200.000 personas en todo el mundo tienen implantes de estimulación cerebral profunda (ECP) para tratar diversas afecciones neurológicas, como el parkinson, el temblor esencial, la distonía y el trastorno obsesivo-compulsivo (TOC). Se trabaja en píldoras inteligentes ingeribles para el seguimiento preciso de medicamentos, e incluso en herramientas implantables diseñadas para restaurar nervios dañados.

No sólo se trata de factores intrínsecos los que movilizan la innovación en este campo. Hay que considerar otros externos como el aumento de las temperaturas, uno de los fenómenos extremos asociados al cambio climático. La tecnología de monitorización constante puede contribuir a prevenir los golpes de calor, tanto para el público en general como para los trabajadores de alta intensidad, como los empleados de la construcción y los bomberos¹⁹.

Si se identifica la predisposición genética de un paciente a un estado de salud particular y se combina con datos en tiempo real de biosensores portátiles, los sistemas de salud pueden predecir, prevenir o controlar enfermedades

con una precisión sin precedentes²⁰. Se habla, en ese sentido, de una Salud 5.0 que incorpora el control y la detección y se refuerza con la atención virtual y la gestión sanitaria inteligente²¹. Lo que hoy se conoce como computación ubicua (*pervasive computing*) podría elevar la aplicación y el rendimiento de los biosensores²², en un contexto de atención médica personalizada.

Los avances en inteligencia artificial (IA) y en el internet de las cosas médicas (IoMT) están imponiendo un cambio de paradigma. Cada vez resulta más asumible disponer de grandes cantidades de datos y eso hace que los servicios de salud se estén alejando gradualmente de los sistemas centralizados tradicionales. Las plataformas sanitarias integradas combinarán datos de biosensores portátiles e implantables con la información de los historiales médicos electrónicos para proporcionar a los profesionales sanitarios una visión integral de la salud del paciente.

En esa tarea, podrían recibir la ayuda de los algoritmos de aprendizaje automático diseñados para identificar patrones, predecir la evolución de las enfermedades y optimizar los planes de tratamiento. A medida que la tecnología evolucione, se incrementará el potencial para empoderar a las personas y animarlas a participar activamente en su atención médica, fomentando la alfabetización en salud y la autogestión. Además, las interacciones de nuevos fármacos y tratamientos podrán comprenderse y monitorizarse mejor mediante el uso de estos dispositivos, tanto en ensayos clínicos con personas como con animales, lo que introducirá mejoras en los procedimientos de prueba actuales.

El camino para el desarrollo de estas nuevas soluciones resulta, no obstante, complejo y está repleto de dificultades, más allá del ya de por sí intrincado proceso de innovación, que implica múltiples etapas, como la investigación, la creación de prototipos, las pruebas y la validación. Uno de los problemas de partida es que los sensores implantables no se suelen utilizar en la práctica clínica de forma generalizada, principalmente debido a su disponibilidad limitada. Muchos centros médicos carecen de la infraestructura, los recursos y la experiencia necesarios para ofrecer estos dispositivos a sus pacientes. Como consecuencia de ello, la prevalencia de los sensores implantables no es homogénea, y varía aún entre países²³.

Esta circunstancia se traslada inevitablemente al coste de los sensores implantables, que puede hacerlos inasequibles para muchos pacientes y sistemas de salud. Se estima que los costes de I+D, regulatorios, de fabricación, de marketing y ventas, y legales y de patentes superan los 100 millones de dólares en algunos casos. De hecho, el coste de desarrollo capitalizado medio esperado por dispositivo médico terapéutico complejo en Estados Unidos es de 522 millones de dólares²⁴, la mayor parte de los cuales se destina a la etapa de desarrollo no clínico. Como se puede observar en el Gráfico 3, este país lidera las publicaciones médicas que incluyen los términos implantación y sensor.



A la limitación de su mercado, se une que estos biosensores tienden a ser más caros también debido a la naturaleza invasiva de su implantación en algunos casos. Y para los pacientes con enfermedades crónicas, que requieren de monitorización a largo plazo, el inconveniente de los costes no deja de acumularse con el tiempo. Solo las grandes empresas de dispositivos médicos con considerables recursos financieros suelen poder comercializar estas tecnologías. La evidencia es que la tecnología de sensores implantables aún no está ampliamente disponible en los países en desarrollo, pese a que, paradójicamente, acaban resultando más rentables a largo plazo.

Otra categoría de problemas para los sensores implantables, cuyas aplicaciones se pueden ver en el Gráfico 4, tiene que ver con los aspectos éticos y legales, que se abordan en muchos países aplicando la Declaración de Helsinki para la investigación médica en seres humanos. En algunos casos, los médicos son reacios a utilizar estos dispositivos porque son partidarios de una sanidad que fomente los pacientes “libres de dispositivos” y evite las recetas innecesarias. Cada vez más voces defienden un marco regulatorio estricto que garantice la seguridad de los biosensores, así como su correcto funcionamiento y uso.

La realidad demuestra que esto último no está resulta sencillo para los legisladores. La UE, que cuenta con 24 redes de referencia (RER) para reforzar la coordinación en I+D, regula los biosensores generalmente como productos sanitarios (biosensores independientes y biosensores en combinación con productos sanitarios)²⁵, aunque también aparecen mencionados en leyes no estrictamente dirigidas a ellos²⁶. La FDA norteamericana ha establecido clasificaciones para aproximadamente 1.700 tipos genéricos diferentes de dispositivos médicos, agrupados en 16 especialidades médicas, y los ha repartido en tres clases regulatorias. Los dispositivos de Clase I representan el menor riesgo, y a los dispositivos de Clase III, entre los que se encuentran los biosensores implantables, se les atribuye el mayor riesgo.

En ambos casos, el proceso de revisión y aprobación de estos dispositivos antes de su uso en entornos clínicos es largo y costoso, como en otros ámbitos de la salud, y acaba convirtiéndose en un obstáculo para las peque-

ñas empresas y los investigadores. Además, las directrices para estos dispositivos cambian con frecuencia, lo que dificulta que las empresas se adapten al proceso regulatorio. Ciertas tecnologías médicas modernas, de hecho, están tratando de sortear este entorno legal intrincado con soluciones de código abierto o DIY (*do it yourself*), con el apoyo de comunidades *online*.

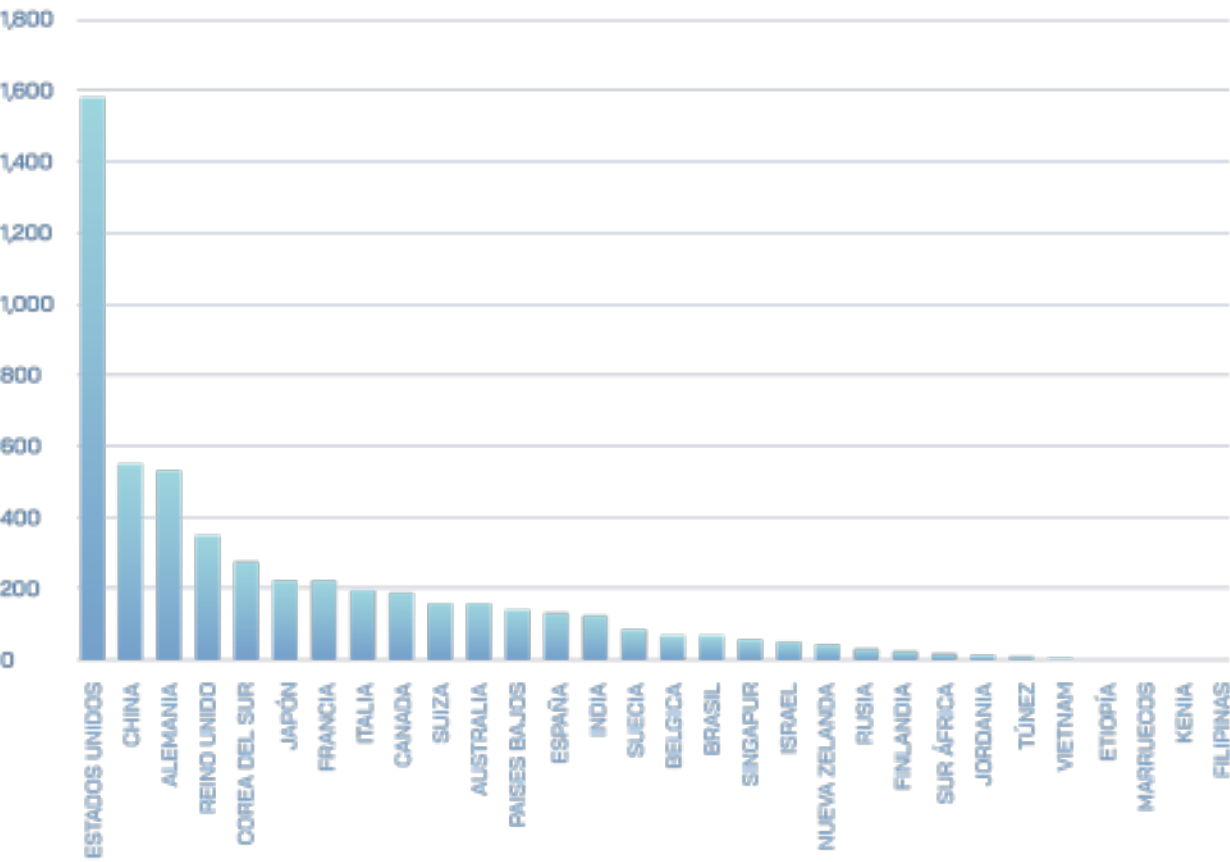
Uno de los efectos de todo lo anterior es que existe una falta de datos del mundo real sobre la aplicación de sensores implantables en medicina y eso constituye, en sí mismo, otro grave obstáculo para su proliferación. Por ejemplo, los implantes ortopédicos inteligentes, con propiedades de detección, se han utilizado exclusivamente como herramientas de investigación. Esto puede dificultar la toma de decisiones informadas por parte de médicos y organizaciones de atención médica, y acaba dificultando la obtención de financiación para estos dispositivos, lo que limita su aplicación en el contexto clínico. Es el problema del pez que se muerde la cola.

Los datos deben integrarse, además, como parte de un flujo de trabajo clínico normal para ser efectivos. La UE trabaja en un Espacio Europeo de Datos Sanitarios (EHDS) para apoyar la salud pública y para su uso en la regulación de medicamentos²⁷. Es consciente de que, si no actúa en este ámbito, podría convertirse en una región poco atractiva para la industria global de las ciencias de la vida, y las terapias y tecnologías innovadoras no llegarían a los pacientes europeos con la misma agilidad que en otras regiones. Pero el campo es relativamente nuevo y evoluciona rápidamente, no existen estándares establecidos para la implantación, calibración o monitorización de los dispositivos de monitorización más sofisticados, de modo que la práctica clínica puede experimentar variaciones significativas y dificultar la comparación de resultados entre diferentes estudios o instituciones.

Por si todo esto fuera poco, la ausencia de materiales útiles limita también la creación de dispositivos de alto rendimiento para biosensores biodegradables implantables. Los componentes y el formato de los biosensores tradicionales son incompatibles con los biodegradables implantables. Aquéllos son pesados y voluminosos, éstos deben ser pequeños y ligeros para una integración perfecta en el cuerpo. Los sensores convencionales diseñados para superficies rígidas no son adecuados para tejidos humanos blandos y curvilíneos. Se requieren materiales sensores suaves y elásticos, con propiedades mecánicas idénticas a las de los tejidos y capaces de adaptarse a la forma no plana de la anatomía humana sin desencadenar ninguna respuesta somatosensorial²⁸.

El caso es que el auge de los biosensores ha desatado una apasionante carrera para descubrir los materiales de la salud personalizada del futuro. La estructura química de la seda, por ejemplo, la hace interesante como base para transistores y una amplia gama de dispositivos fotónicos y, de hecho, científicos de todo el mundo están creando una amplia gama de patrones de sensores portátiles sobre sustratos flexibles y textiles²⁹. De igual forma, la

Distribución de publicaciones PubMed por país que incluyen los términos implantación y sensor.



Fuente: America

gelatina y la goma laca se han aplicado en diversos ámbitos relacionados con los biosensores implantables, como la creación de fibras coaxiales y los recubrimientos de electrodos, un aspecto especialmente sensible por el riesgo de infección debido a un fenómeno conocido como “bioincrustación”³⁰. Para evitarla, se ha estudiado una variedad de recubrimientos y antimicrobianos alternativos, incluidos iones de plata, óxido nítrico, anticuerpos bioactivos y otros compuestos bactericidas³¹.

Los polímeros sintéticos están cobrando importancia también para crear plataformas electrónicas compatibles con organismos vivos y como sustrato o recubrimiento para dispositivos implantables, fotodetectores, transistores, diodos emisores de luz y sensores. En la misma línea, la innovación ha dirigido la mirada hacia los semiconductores orgánicos. Se utilizan como capas activas para reemplazar los dispositivos tradicionales, aunque los transistores de silicio siguen siendo fundamentales en aplicaciones como los sensores de presión, para amplificar los cambios en las señales fisiológicas³².

Los avances en la secuenciación del ADN están ayudando en el desarrollo de moduladores optoelectrónicos, capaces de manipular las propiedades de la luz. Aparecen también nuevos candidatos interesantes a materiales dieléctricos, que funcionan como aislantes gracias a su baja conductividad eléctrica. Una opción notable de estos últimos es la albúmina, que se encuentra en las claras de huevo de gallina, útil en el proceso de construcción de microláseres. La melanina, por último, puede utilizarse eficazmente como capa activa para la detección de pH. Se considera ventajosa para aplicaciones bioelectrónicas debido a su biocompatibilidad, entre ellas los dispositivos electrónicos que interactúan con sistemas biológicos, como las neuronas cerebrales.

Encontrar los materiales adecuados, en cualquier caso, no resolverá todos los desafíos asociados al impulso de los biosensores. Las técnicas de microfabricación convencionales tampoco son aplicables a la mayoría de los materiales biodegradables debido a su solubilidad y sensibilidad a altas temperaturas. Se ha avanzado en campos como la litografía suave, la serigrafía y la impresión por transferencia. Sin embargo, las técnicas basadas en la litografía no pueden producir microestructuras finas ni interconexiones complejas en los sensores, y los métodos basados en la impresión son costosos y su fabricación requiere mucho tiempo. Hacen falta, por consiguiente, mejoras en las técnicas de impresión 3D y 4D que faciliten en el futuro la fabricación de bajo coste, escalable, confiable y reproducible. Esto allanará el camino para la comercialización de sensores biodegradables.

La impresión por inyección, con una formulación optimizada de tinta de nanopartículas, permite hoy la producción en masa de biosensores robustos y flexibles que se han demostrado válidos para monitorizar el impacto de fármacos terapéuticos en pacientes con cáncer³³. En el campo de la impresión de biosensores, la serigrafía tiene un coste relativamente bajo y resulta

Un diagnóstico clínico preciso y rápido es esencial para mejorar la gestión de las enfermedades, optimizar sus tratamientos y reducir los altos costes sanitarios. Los métodos de diagnóstico actuales, aunque altamente fiables, dependen de laboratorios centralizados, procesos complejos y personal especializado, lo que genera significativos retrasos, aumenta los riesgos de la degradación de las muestras y limita el acceso, especialmente en entornos rurales o con recursos restringidos. Esta situación retrasa considerablemente el diagnóstico precoz de las enfermedades y su intervención terapéutica, afectando negativamente a la salud de los pacientes. Estas limitaciones resultan especialmente problemáticas frente a los retos actuales de la atención sanitaria, como las infecciones bacterianas resistentes a los fármacos o las enfermedades complejas como el cáncer.

(...)
|
Laura Lechuga

más fácil de usar que los métodos de deposición más avanzados, lo que la convierte en una opción mucho más escalable y comercialmente viable para su uso en dispositivos de monitorización sanitaria³⁴. Un enfoque novedoso, en este sentido, propone la creación de una red de sensores producida mediante impresión por inyección de tintas nanofuncionales sobre un sustrato semipermeable, con tecnología de comunicación de campo cercano (NFC) inalámbrica y sin batería, para la lectura de datos a través de *smartphones*. Los sensores se pueden integrar en una membrana bioinspirada en los mejillones con adhesivo natural que se fija fácilmente a la piel, garantizando una recopilación de datos fiable y continua.

En cuanto al paciente, la innovación debe tomar en consideración la forma en la que percibe y se adapta al uso de sensores implantados, un terreno al que se han dedicado un creciente número de investigaciones psicológicas. Por ejemplo, se ha demostrado que los pacientes pueden experimentar distintos niveles de ansiedad e incomodidad antes y después de la implantación, y que su aceptación puede verse influida por los beneficios percibidos y el control que tienen sobre su uso. Hay aspectos relacionados con la visión subjetiva del paciente como la calibración continua de los sensores biodegradables implantables para que proporcionen información fiable, una tarea compleja³⁵. Las infecciones, la inflamación y la contaminación post-implante constituyen un riesgo a vigilar, y el rendimiento de los sensores disminuye debido al envejecimiento del material, el desgaste mecánico y la encapsulación tisular.

La conectividad se presenta como otra de las líneas clave para la innovación en el campo de los biosensores. En algunos casos, utilizan tecnología bluetooth como sistema de transmisión de datos inalámbrico vinculado a aplicaciones para smartphones. La comunicación bluetooth utiliza claves a largo plazo, claves de resolución de firma de conexión y claves de resolución de identidad durante el proceso de emparejamiento, pero no todo el hardware permite su lectura y decodificación, de modo que se necesita avanzar este ámbito.

El desarrollo de la comunicación de datos de alta velocidad también es crucial para los nuevos dispositivos médicos, pero hay que garantizar la seguridad y la privacidad en las redes inalámbricas de área corporal (WBAN),

prestando especial atención al almacenamiento seguro de datos y a un control de acceso preciso. La compañía WiTricity está explorando la transferencia de potencia inalámbrica y la comunicación mediante para sensores e implantes biomédicos. Toda la información intercambiada entre el biosensor y el mundo exterior debe estar cifrada para que los implantes sean seguros para el uso diario. Si eso se garantiza, la versatilidad y el potencial transformador de los sensores implantables serán enormes y sentarán las bases de una nueva era en la atención médica personalizada y proactiva³⁶.

Otro desafío fundamental tiene que ver con la carga eléctrica de estos dispositivos. Los biosensores implantables sin batería desempeñarán un papel importante en el futuro de la atención médica y la investigación biomédica, pero para los que todavía la necesitan la recolección de energía por radiofrecuencia (RFEH) es una vía de innovación prometedora debido a su naturaleza no invasiva y al uso de energía ambiental. Aunque persisten los interrogantes acerca de su eficiencia e integración del dispositivo.

Surgen también técnicas como el aprovechamiento de campos magnéticos cerca de líneas eléctricas y generadores termoeléctricos (TEG), que pueden transformar el calor corporal en electricidad³⁷. Sin embargo, como sucede en otros casos, también aquí hay que considerar el escenario de dispositivos biodegradables implantables, que requieren fuentes de alimentación bio-reabsorbibles, como baterías, recolectores de energía o circuitos flexibles.

Un avance notable, en este sentido, es el uso de sudor o soluciones equivalentes al sudor como electrolitos³⁸. Tanto en ese caso como en el de los generadores eléctricos a partir del movimiento mecánico del cuerpo³⁹, tienen diversas desventajas: son voluminosos en comparación con el propio sensor, pierden su funcionalidad rápidamente al colocarse en biofluidos y carecen de la flexibilidad necesaria. Otras líneas de investigación se dirigen a crear sistemas flexibles de recolección y almacenamiento de energía, como células de biocombustible epidérmicas, baterías basadas en tatuajes, supercondensadores, microrredes de energía basadas en textiles y sistemas de energía híbridos multimodales.

La convergencia de líneas multidisciplinares de investigación científico-tecnológica en el campo de los biosensores implantables es actualmente sensacional. Desde ciencias de los materiales a comunicación inalámbrica, transferencia de energía inalámbrica, ingeniería biomédica, electrónica y atención médica, el desarrollo de sistemas electrónicos implantables inalámbricos se está acelerando⁴⁰. De esa ola de transformación se están beneficiando los biosensores dérmicos para tatuajes.

Se trata de plataformas prometedoras para la monitorización de biomarcadores en tiempo real. Son una evolución de las soluciones tradicionales basadas en el uso de pequeñas moléculas como biosensores y eliminan la necesidad de extraer fluidos corporales para la medición. Los tatuajes

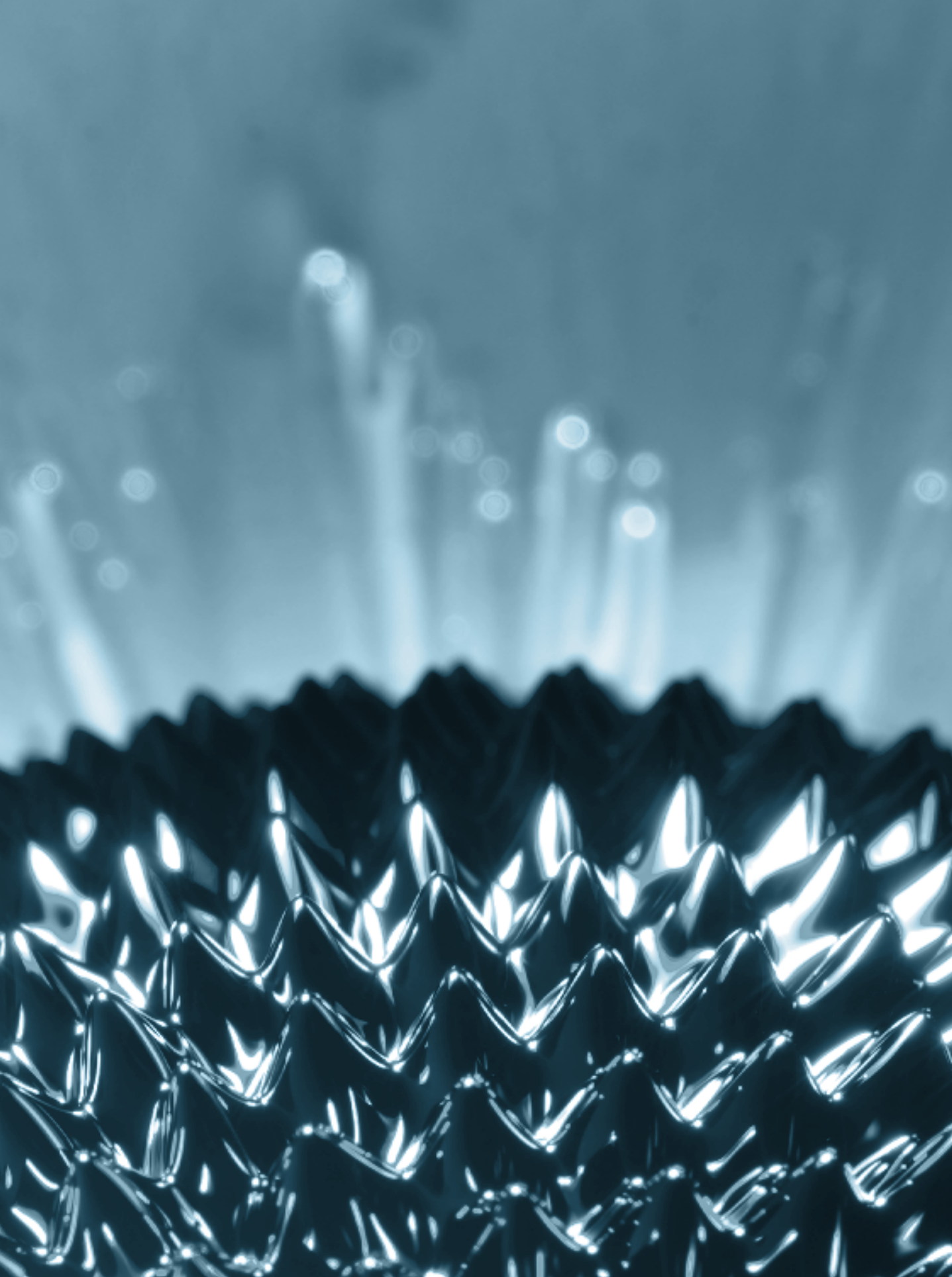
(...)
Los dispositivos biosensores representan una solución clave para superar estas limitaciones, ya que permiten diagnósticos rápidos, precisos y portátiles, acercando las pruebas al paciente en cualquier entorno. Integrados en plataformas de diagnóstico portátiles, proporcionan la sensibilidad, especificidad, accesibilidad y facilidad de uso necesarias. Su desarrollo es crucial para avanzar hacia una medicina más personalizada y preventiva, mejorando la detección temprana, el diagnóstico en tiempo real y el acceso a una atención sanitaria de calidad en cualquier lugar y en cualquier momento donde se necesite.

|
Laura Lechuga

suelen estar presentes a una profundidad de 0,4 a 2,2 mm en la dermis, una capa de piel que contiene una variedad de células, vasos sanguíneos y nervios rodeados de líquido intersticial (ISF). El auge de la biología sintética permite ahora el empleo de bacterias modificadas genéticamente como herramientas analíticas vivas⁴¹. Las bacterias modificadas genéticamente se encapsulan en microesferas de hidrogel a escala micrométrica preparadas mediante microfluídica escalable. Estos biosensores pueden detectar tanto señales bioquímicas (biomarcadores modelo) como biofísicas (cambios de temperatura mediante termómetros de ARN), con lecturas fluorescentes⁴².

El tatuaje es naturalmente degradable, porque incorpora enzimas de degradación de hidrogeles, y para alterar los biosensores en aras de una mayor personalización basta cambiar el circuito genético de las bacterias, incorporando nuevas puertas lógicas y elementos biocomputacionales más avanzados, así como sistemas que permiten un control más estricto de la expresión genética. Un dispositivo microfluídico montado en la piel, desarrollado en la UC San Diego y comercializado por Innovosens, permite la medición de metabolitos del sudor para el deporte y el fitness. Las yemas de los dedos son uno de los puntos más sudorosos del cuerpo y ya es posible la detección rápida de la concentración de cortisol en el sudor natural en ese punto del cuerpo⁴³.

Las “tintas” son biocompatibles y pueden detectar una gama más amplia de estímulos durante períodos de tiempo más largos en comparación con los biosensores basados en moléculas pequeñas⁴⁴. Incorporando enzimas de degradación de hidrogeles en microgeles, se obtiene un tatuaje naturalmente degradable. Todos estos métodos permiten una mayor personalización de la plataforma de tatuaje, lo cual es vital para crear un sistema de biosensor ampliamente utilizado.



Un país de componentes e I+D+i

ESPAÑA

España es sede de compañías que producen componentes clave para la fabricación de biosensores. La planta madrileña de Sigma-Aldrich, del grupo Merck, trabaja en biosensores y tecnologías de bioimagen para detectar patógenos, toxinas y biomarcadores en diferentes contextos biomédicos y medioambientales al nivel molecular. Ha proporcionado reactivos para proyectos de I+D en colaboración como el destinado a producir biosensores destinados a prevenir los golpes de calor en los empleados de la construcción. En ese mismo proyecto se utilizaron disolventes procedentes de la planta de Scharlab, también en Madrid.

En el ámbito de la investigación, opera desde 2015 la red temática ELECTROBIONET, especializada en sensores y biosensores electroquímicos. La integran grupos de investigación españoles que cubren desde la investigación fundamental al diseño y desarrollo de aplicaciones en dispositivos. En ese sentido, por ejemplo, la Fundación PKU OTM, junto al laboratorio de Enfermedades Metabólicas Hereditarias del Hospital Sant Joan de Déu y la Universitat Autònoma de Barcelona, trabajan en un biosensor de amonio para mejorar la atención domiciliaria de los pacientes detectando con más rapidez los episodios de hiperamonemia e hiperfenilalaninemia.

Un equipo multidisciplinar de cuatro países europeos, entre ellos España a través del centro tecnológico Tecnalia, ha desarrollado una plataforma de biosensores de alta sensibilidad en el marco del proyecto DeDNAed⁴⁵. Se utilizará para detectar biomoléculas y se espera que detecte toxinas alimentarias y biomarcadores de enfermedades con mayor sensibilidad, versatilidad

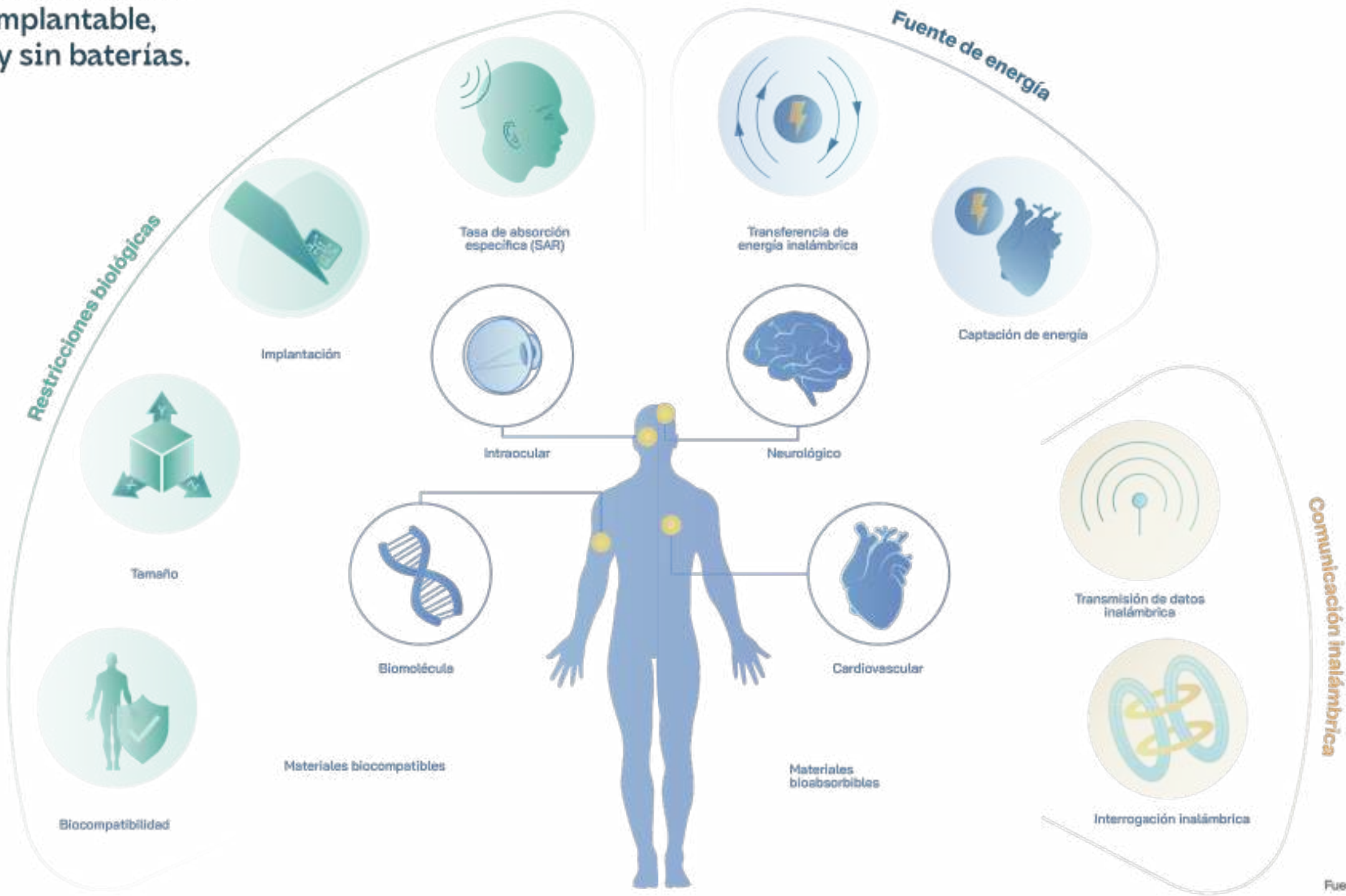
y un enfoque óptico ultrarrápido. La estructura del sensor DeDNAed cuenta con varios componentes que se ensamblan con precisión nanométrica gracias al origami de ADN, plegable como el del papel, pero compuesto de una sola hebra de ADN y dispuesto en 2D o 3D. DeDNAed colocar con precisión en sus “extremos pegajosos” un elemento de biorreconocimiento, como los anticuerpos con nanoclústeres atómicos desarrollados por Tecnalia y eso permite disponer de un sensor muy sensible, capaz de detectar concentraciones muy bajas del analito.

El proyecto H2Train, financiado por la Unión Europea, se centra en tecnologías digitales habilitadoras para la salud, el estilo de vida, la motivación y la asistencia a la supervisión, apoyadas por redes de IA⁴⁶. Está coordinado por España a través del Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada (IUMA) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Participan 35 instituciones públicas y privadas en el consorcio, entre ellas pymes y grandes empresas de seis Estados miembros de la Unión Europea (Austria, Alemania, España, Finlandia, Francia, Italia, Polonia).

Entre los principales objetivos de H2TRAIN, el mayor proyecto de este tipo financiado por la Ley de Chips de la UE, se encuentra el desarrollo de nuevos prototipos de biosensores inteligentes fabricados en grafeno que puedan estar adheridos, como una pegatina a la piel, o formar parte del tejido en la ropa. Su destino será la monitorización continua de deportistas, así como de pacientes crónicos o de personas en procesos de rehabilitación. Se quiere medir, entre otras cuestiones, las señales fisiológicas de su cuerpo, así como biomarcadores relacionados con el estrés, a través del sudor, controlando el cortisol, el lactato y la proteína C reactiva). Los electrodos adheridos a las prendas captarán parámetros eléctricos propios de la fisiología humana, y deberán ser capaces de recuperar de energía mediante la termoelectricidad y piezoelectricidad. En su caso, se utilizarán para monitorizar a la población de personas mayores que precisan atención médica de manera periódica.

Por último, el CIC biomaGUNE, la Universidad Complutense de Madrid, el BCMaterials, la Universidad del País Vasco, y el grupo NanoSelf del CICA Universidade da Coruña participan en el proyecto internacional ECLectic⁴⁷. Una de las líneas de trabajo es la detección de biomarcadores de sepsis mediante mediciones de electroquimioluminiscencia (ECL). Para este fin, se desarrollarán nanopartículas basadas en carbono (carbon-dots) en el centro de San Sebastián, mientras que en la UDC se evaluarán distintos materiales de grafeno modificados químicamente para la construcción de los electrodos. ECLectic aborda el problema mundial de la sepsis y la infección bacteriana desde paradigmas de diagnóstico totalmente nuevos. Según sus impulsores, cerrará la brecha entre la investigación innovadora en el campo de los materiales nanoestructurados y su aplicación en la tecnología de biosensores nanoestructurados.

Diseño y aplicaciones de la electrónica implantable, inalámbrica y sin baterías.



Relación de notas

¹ (2016) El Primer Reloj de Pulsera, El País. Disponible en: https://elpais.com/elpais/2016/10/22/eps/1477087542_147708.html (Accedido el 30/06/2025)

² Smith, A.A., Li, R. & Tse, Z.T.H. (2023) Reshaping healthcare with wearable biosensors. Sci Rep 13, 4998. doi: 10.1038/s41598-022-26951-z (Accedido el 30/06/2025)

³ Abay, T.Y. and Kyriacou, P.A. (2022) ‘Photoplethysmography in oxygenation and blood volume measurements’, Photoplethysmography, pp. 147–188. doi:10.1016/b978-0-12-823374-0.00003-7. (Accedido el 30/06/2025)

⁴ Warner, B.C. et al. (2025) ‘Validation of sleep-based actigraphy machine learning models for prediction of preterm birth’, npj Women’s Health, 3(1). doi:10.1038/s44294-025-00082-y.

⁵ Vesinurm, M. et al. (2025) ‘Terminating pandemics with Smartwatches’, PNAS Nexus, 4(3). doi:10.1093/pnasnexus/pgaf044. (Accedido el 30/06/2025)

⁶ Wang, Q. et al. (2025) ‘A wireless, self-powered smart insole for gait monitoring and recognition via nonlinear synergistic pressure sensing’, Science Advances, 11(16). doi:10.1126/sciadv.adu1598. (Accedido el 30/06/2025)

⁷ Smith, A.A., Li, R. and Tse, Z.T. (2023) ‘Reshaping healthcare with wearable biosensors’, Scientific Reports, 13(1). doi:10.1038/s41598-022-26951-z. (Accedido el 30/06/2025)

⁸ Ciui, B. et al. (2018) ‘Wearable wireless tyrosinase bandage and microneedle sensors: Toward melanoma screening’, Advanced Healthcare Materials, 7(7). doi:10.1002/adhm.201701264.

⁹ Libanori, A. et al. (2022) ‘Smart textiles for personalized healthcare’, Nature Electronics, 5(3), pp. 142–156. doi:10.1038/s41928-022-00723-z

¹⁰ Pellicer Roig, D. (2025) Científicos Han logrado Devolver La Voz a UN Paciente de Ela Mediante UN Neuroimplante, National Geographic España. Disponible en: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/cientificos-estadounidenses-han-logrado-devolver-voz-a-paciente-ela-mediante-neuroimplante_25264 (Accedido el 30/06/2025)

¹¹ Yameng Xu et al. Implantable and Semi-Implantable Biosensors for Minimally Invasive Disease Diagnosis, Processes, 21 de julio de 2024, doi.org/10.3390/pr12071535

¹² David Yogev et al. Current state of the art and future directions for implantable sensors in medical technology: Clinical needs and engineering challenges, Scilight, 27 de septiembre de 2023, doi.org/10.1063/5.0152290

¹³ [www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/747441/EPRS_ATA\(2023\)747441_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/747441/EPRS_ATA(2023)747441_EN.pdf)

¹⁴ Sen A., Raghavan R. “What Is Chronic Kidney Disease?”, Springer, 2023

¹⁵ “Cardiovascular diseases (CVDs)

fact sheet, WORLD HEALTH ORGANIZATION, 17 Mayo 2017

¹⁶ Ali Mana Alyami, Implantable Biosensors for Vascular Diseases: Directions for the Next Generation of Active Diagnostic and Therapeutic Medical Device Technologies, Biosensors (Basel), 25 de febrero de 2025, 10.3390/bios15030147

¹⁷ Molloy A. et al. Challenges to the Development of the Next Generation of Self-Reporting Cardiovascular Implantable Medical Devices, IEEE Rev. Biomed. Eng., 20 de enero de 2020, doi: 10.1109/RBME.2021.3110084

¹⁸ Fezzi, S., M. Lunardi, F. Sharif. “Implantable sensors for hemodynamic monitoring.” Card. Interventions Today, 2022

¹⁹ Gabriel Maroli, Wearable, battery-free, wireless multiplexed printed sensors for heat stroke prevention with mussel-inspired bio-adhesive membranes, Biosensors and Bioelectronics, 15 de septiembre de 2024, doi.org/10.1016/j.bios.2024.116421

²⁰ Pires, IM et al. Editorial: wearable and mobile data analysis methodologies for personalized medicine, Front Digit Health, 20 de septiembre de 2023, doi: 10.3389/fdgth.2023.1271659

²¹ V. V. Popov et al. “Industry 4.0 and digitalisation in healthcare”, Materials, 14 de marzo de 2022, doi.org/10.3390/ma15062140

²² Ghorbanizamani, Faezeh et al. Material Design in Implantable

Biosensors toward Future Personalized Diagnostics and Treatments, Applied Sciences, 6 de abril de 2023, doi.org/10.3390/app13074630

²³ A. P. Baumann et al., FDA public workshop: Orthopaedic sensing, measuring, and advanced reporting technology (SMART) devices, J. Orthop. Res., enero de 2021

²⁴ A. Sertkaya, R. DeVries, A. Jessup, T. Beleche, Estimated cost of developing a therapeutic complex medical device in the US, JAMA Network Open, 14 de septiembre de 2022, doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2022.31609

²⁵ Vaishnavi Pawnikar, Mital Patel, Biosensors in wearable medical devices: Regulatory framework and compliance across US, EU, and Indian markets, Ann Pharm Fr., 26 de febrero de 2025, DOI: 10.1016/j.pharma.2025.02.007

²⁶ [www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/747441/EPRS_ATA\(2023\)747441_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/747441/EPRS_ATA(2023)747441_EN.pdf)

²⁷ “European medicines agencies network strategy to 2025”, EMA, 2020

²⁸ Ghorbanizamani, F. et al. Material Design in Implantable Biosensors toward Future Personalized Diagnostics and Treatments, Appl. Sci, 6 de abril de 2023, doi.org/10.3390/app13074630

²⁹ Khosravi, S et al. Screen-printed textile-based electrochemical biosensor for noninvasive monitoring of glucose in sweat, Biosensors,

27 de junio de 2023, doi: 10.3390/bios13070684

³⁰ Benjamin Boettner, “Implantable biosensors get a major longevity boost”, Wyss Institute, 13 de marzo de 2025, revisado el 11/06/2025

³¹ Hartl, H. et al. Antimicrobial adhesive films by plasma-enabled polymerisation of m-cresol. Sci. Rep., 9 de mayo de 2022, doi.org/10.1038/s41598-022-11400-8

³² Lixia Cheng et al. A Flexible Pressure Sensor Based on Silicon Nanomembrane, Biosensors, 12 de enero de 2023, doi.org/10.3390/bios13010131

³³ Wang, Minqiang et al. Printable molecule-selective core–shell nanoparticles for wearable and implantable sensing, Nature Materials, 3 de febrero de 2025, doi.org/10.1038/s41563-024-02096-4

³⁴ Liam Critchley, “Printable Sensors: A Key Technology for Health Wearables?”, Wevolver, 5 de febrero de 2025, consultado el 11/06/2025

³⁵ Fahmida Alam et al. Recent Progress and Challenges of Implantable Biodegradable Biosensors, Micromachines, 30 de marzo de 2024, doi.org/10.3390/mi15040475

³⁶ Fahmida Alam et al. Recent Progress and Challenges of Implantable Biodegradable Biosensors, Micromachines, 30 de marzo de 2024, doi.org/10.3390/mi15040475

³⁷ Ijamaru, G.K., Ang, K.L.-M. Seng, J.K. Wireless power transfer and energy harvesting in distributed

sensor networks: Survey, opportunities, and challenges. Int. J. Distrib. Sens. Netw., 26 de marzo de 2022, doi.org/10.1177/15501477211067740

³⁸ Manjakkal, L. et al. A Wearable Supercapacitor Based on Conductive PEDOT:PSS-Coated Cloth and a Sweat Electrolyte, Adv. Mater., 11 de mayo de 2020, doi.org/10.1002/adma.201907254

³⁹ Yu, Y. et al. Biofuel-powered soft electronic skin with multiplexed and wireless sensing for human-machine interfaces, Sci. Robot., 15 de abril de 2020, DOI: 10.1126/scirobotics.aaz7946

⁴⁰ Kim, H. et al. Advances in Wireless, Batteryless, Implantable Electronics for Real-Time, Continuous Physiological Monitoring. Nano-Micro Lett., 15 de diciembre de 2023, doi.org/10.1007/s40820-023-01272-6

⁴¹ Matthew E Allen et al. Engineered Bacteria as Living Biosensors in Dermal Tattoos, Adv Sci (Weinh), 17 de junio de 2024, 10.1002/advs.202309509

⁴² Matthew E Allen et al. Engineered Bacteria as Living Biosensors in Dermal Tattoos, Adv Sci (Weinh), 17 de junio de 2024, 10.1002/advs.202309509

⁴³ Tang, W et al. Touch-based stressless cortisol sensing, Adv Mater, 30 de marzo de 2021, doi: 10.1002/adma.202008465

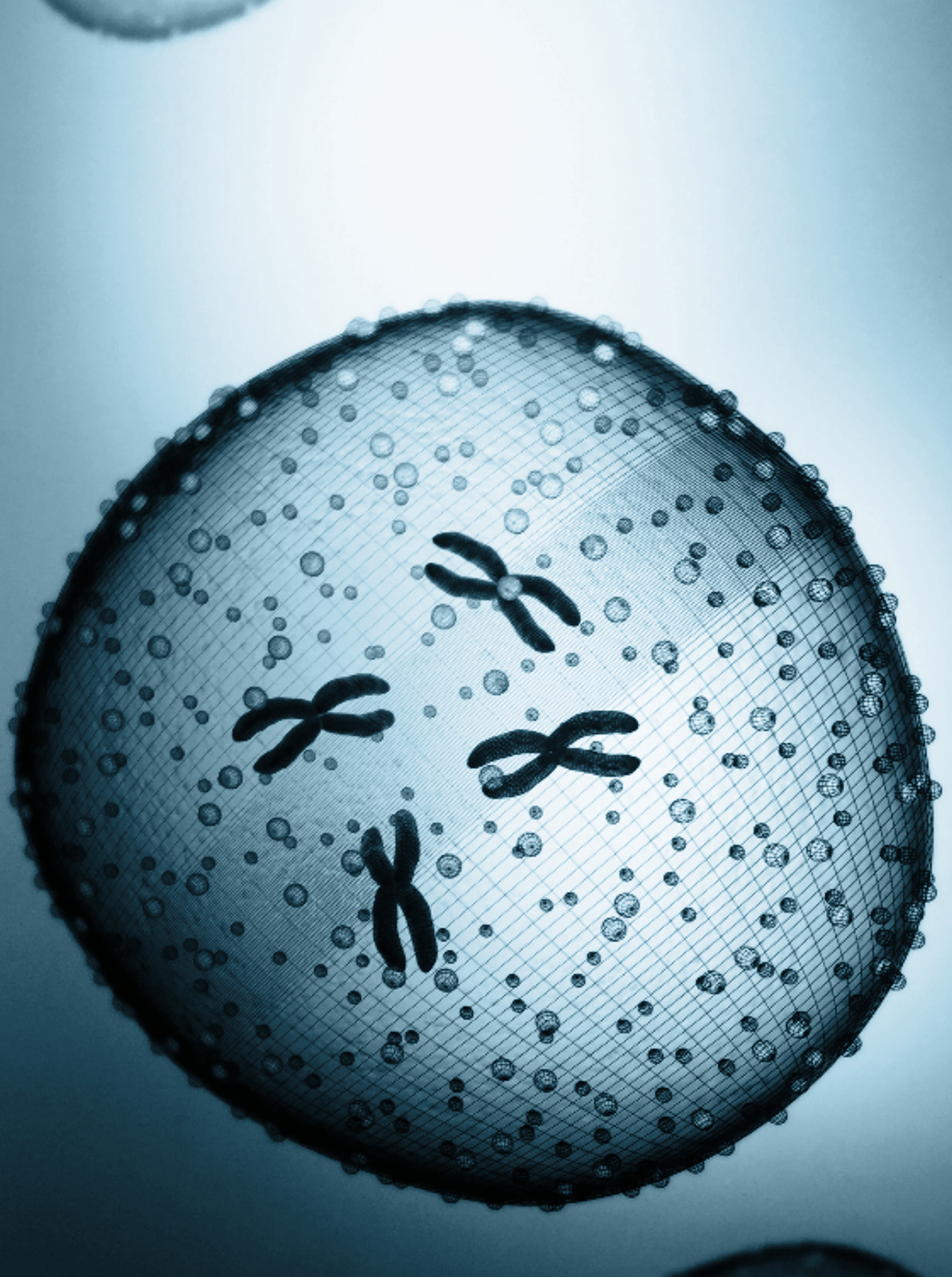
⁴⁴ Rabia Omer et al. Engineered Bacteria-Based Living Materials for Biotherapeutic Applications.

Front. Bioeng. Biotechnol., 28 de abril de 2022, doi.org/10.3389/fbioe.2022.870675

⁴⁵ “Investigadores europeos combinan física y biología para desarrollar nuevos biosensores”, Asebio, 3 de septiembre de 2024

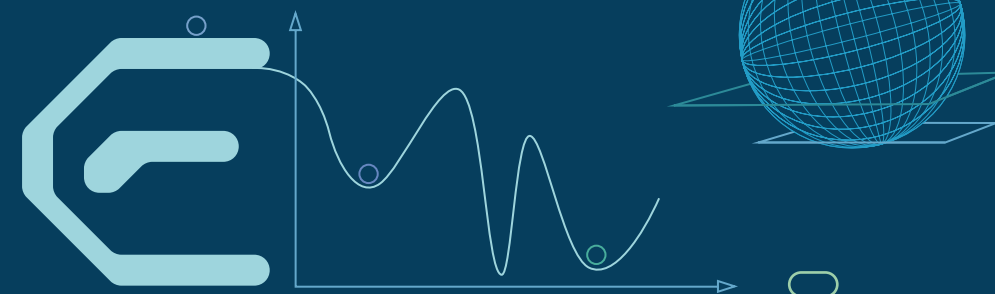
⁴⁶ “La ULPGC lidera un proyecto internacional de biosensores textiles para la monitorización inteligente de pacientes y deportistas”, ULPGC, 5 de julio de 2024

⁴⁷ “La red EClectic aborda el diseño de nuevos biosensores rápidos y fiables para luchar contra las infecciones hospitalarias”, UDC, 6 de junio de 2023



05

La 'tercera vía' de la algoritmia cuántica



Introducción

La informática tal y como la conocemos puede estar a punto de cambiar para siempre. Afortunadamente no hablamos de la informática doméstica o de nuestros ordenadores, sino de aquellos centros que procesan cantidades ingentes de información. La carrera de los ordenadores cuánticos ha comenzado y estos tienen el potencial de revolucionar el modo en el que nos enfrentamos a los problemas actuales. Con los gigantes de la informática como IBM, Google y Microsoft apostando por una tecnología que parece sacada de la ciencia ficción, este futuro cuántico cada vez está más cerca.

Los ordenadores cuánticos están basados en los qubits y nos prometen que, aplicando los principios de la física cuántica, será posible resolver problemas muy complejos de forma más rápida. Ahora bien, un ordenador cuántico no funciona por sí solo, sino que necesita de algoritmos, una suerte de programas que le indiquen cómo enfrentarse a los desafíos que les van a proponer. Esta rama que aúna informática, física experimental y física teórica se denomina algoritmia cuántica, y es un campo relativamente nuevo y fascinante por sus posibilidades.

Gracias a la algoritmia cuántica, se podrá reducir el tiempo de computación de ciertas operaciones desde cientos o miles de años a unos pocos minutos, proporcionando así respuestas a problemas que actualmente son irresolubles por limitaciones de nuestra maquinaria. Pero esta capacidad también supone ciertos retos. Gran parte del sistema criptográfico actual, es decir, de la base que permite que nuestras contraseñas informáticas sean seguras, depende de estas limitaciones. Con esta enorme capacidad para la computación del futuro, la carrera por la algoritmia cuántica está servida.

El beneficio de la probabilidad para optimizar decisiones

POR DENTRO

La palabra algoritmo está cada vez más presente en nuestro día a día. Se habla de algoritmos que controlan lo que vemos y lo que oímos en las plataformas sociales, así como de algoritmos que aprenden con base en nuestras preferencias. El algoritmo se asemeja a aquellos oráculos de la antigüedad que ofrecían respuestas ante cualquier pregunta, pero a su vez infundían temor y un proceso nada claro. Por ello, entre todo este ruido algorítmico, en ocasiones conviene tratar de andar antes de correr y comenzar por plantearnos las preguntas más básicas. Por tanto, ¿qué es un algoritmo?

Un algoritmo no es más que un conjunto de instrucciones para llegar a un resultado¹. En la vida real encontramos algoritmos en todo lo que hacemos. Por ejemplo, accionar el interruptor para encender una luz es un algoritmo, seguir una receta de cocina es un algoritmo, o apretar ciertos botones en el mando a distancia para ver la serie del momento también es otro algoritmo. Por tanto, los algoritmos son una parte intrínseca de nuestra vida, aquellos pasos que seguimos para llegar a un fin.

Cuando hablamos de algoritmos en computación² la idea es la misma: seguir una serie de pasos para hallar el resultado de un problema. Aunque en estos casos, el algoritmo requiere de cientos o miles de operaciones matemáticas que el ordenador resuelve a una velocidad pasmosa. Estas operaciones ocurren mediante el denominado “código binario”, es decir, largas secuencias de dígitos que únicamente pueden presentarse como 0 o 1. Las largas secuencias de código binario resultante son traducidas posteriormente mediante los distintos lenguajes de programación a mensajes que los humanos podemos entender.

Así, algoritmos computacionales son los que, por ejemplo, permiten escribir este texto. De forma simplificada, cada vez que apretamos una tecla se genera una corriente eléctrica en un circuito. Dependiendo de la tecla que haya sido pulsada, un microcontrolador transformará esta información eléctrica en un número binario único, que enviará al ordenador. El ordenador interpretará la secuencia de 0 y 1 y, gracias a su sistema operativo y al programa de edición de texto, mostrará en la pantalla la letra indicada encendiendo o apagando ciertos píxeles. Con los ordenadores modernos, este proceso ocurre de forma prácticamente instantánea, ya que son capaces de operar a una velocidad colosal. Cuanta más potencia, pueden realizar operaciones más rápidamente, lo que se traduce en unas mayores capacidades de análisis de datos.

Con estos mismos principios, supercomputadores como el MareNostrum de Barcelona³ pueden manejar 314.000 millones de operaciones por segundo, una potencia equivalente a 380.000 ordenadores portátiles caseros. Así, los científicos analizan millones de operaciones con las que hacen descubrimientos en temas tan variados como el descubrimiento de exoplanetas o la lucha contra el cáncer.

Pero en la computación cuántica esta propiedad fundamental de la informática cambia. Los ordenadores cuánticos no funcionan con bits, sino mediante qubits. Estas piezas de información pueden actuar como bits normales y tener un valor de 0 o 1, pero gracias a la mecánica cuántica también pueden encontrarse en un estado de superposición. Es decir, pueden valer tanto 0 como 1 hasta que se mida su estado.

Esta idea parte de los años 80. Pioneros de la mecánica cuántica como el físico estadounidense Richard Feynman predijeron que los ordenadores basados en la física cuántica podrían ser clave para simular otros sistemas cuánticos, una tarea muy compleja para la computación clásica. Por ello, en 1985, David Deutsch formuló el concepto de máquina de Turing cuántica universal⁴, lo que supuso una nueva base de trabajo para los algoritmos cuánticos.

Para comprender esto, imaginemos una cinta que está dividida en celdas y cada una tiene un símbolo. Algo similar a las cintas de negativos de las antiguas cámaras fotográficas. En una máquina de Turing, en vez de fotografías, cada celda tiene un símbolo, como un 1 o un 0. Un cabezal lee esa cinta y, según lo que lee, se le da una instrucción u otra. Esta instrucción puede ser cambiar el 1 por un 0 o viceversa, no tocar nada, moverse a una sección, o pasar a una nueva instrucción. Con esta máquina hipotética, Turing demostró que se pueden realizar cálculos matemáticos mediante un conjunto simple de reglas. La máquina de Turing cuántica universal de Deutsch se rige por los mismos principios, pero las reglas básicas están sustituidas por ecuaciones de Schrödinger, los símbolos por una secuencia de estados cuánticos simples y el cabezal por una interacción cuántica capaz de leer o restablecer el valor del espín del estado cuántico.

Los algoritmos cuánticos son una apuesta estratégica porque atacan problemas donde la computación clásica escala mal: simulación de moléculas y materiales, optimización compleja y aprendizaje en espacios de alta dimensión. Para España, su impacto potencial se concentra en campos como la farma y biotecnología (diseño de fármacos), energía y materiales (baterías, catalizadores), finanzas y logística. Aunque la ventaja cuántica será selectiva y progresiva, puede abrir grandes saltos de productividad y dar lugar a nuevas cadenas de valor.

(...)

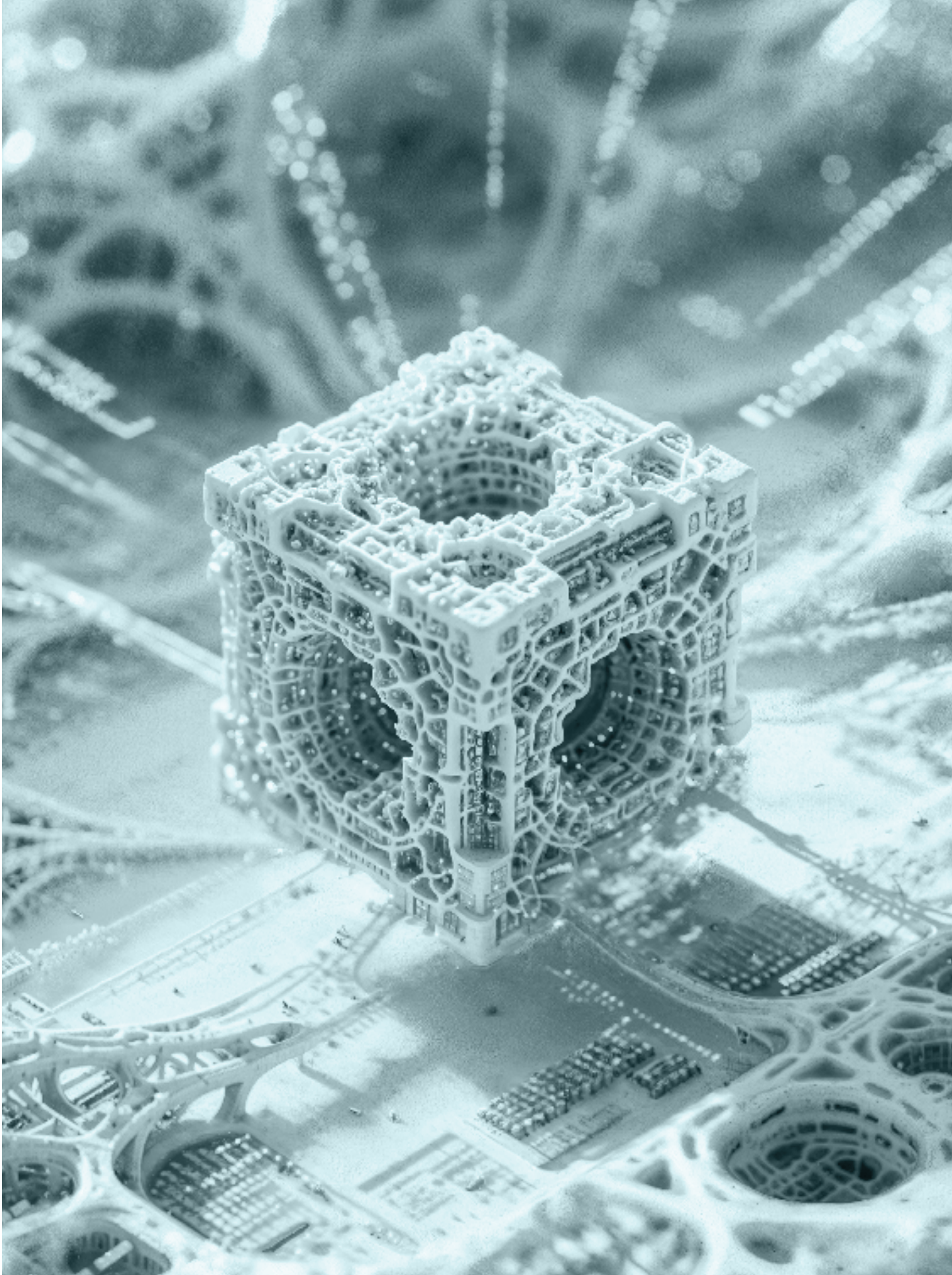
|
Andrés Pedreño

El problema de este mecanismo es que no aprovecha todo el potencial de la mecánica cuántica ya que, al medir el valor del espín, el estado de superposición colapsa y queda fijado como 0 o como 1. Como estos conceptos son extremadamente complejos y poco intuitivos, pensemos que lo importante de la teoría de Deutsch es que, al igual que la máquina de Turing permitía sentar las bases de la algoritmia (y por tanto la computación) clásica, la máquina de Turing cuántica allanaba el camino a la hora de formular algoritmos cuánticos. Gracias a este avance, en los años 90 comenzaron a aparecer los primeros algoritmos cuánticos. En ellos, se demostraba que un ordenador cuántico podría ser más eficiente que los clásicos en resolver ciertos problemas. Pero ¿por qué?

Como los algoritmos cuánticos parten de una base fundamentalmente diferente, tienen otras formas de llegar a una solución de un problema. Como veíamos con la máquina de Turing, un algoritmo clásico es una secuencia que seguirá una serie de pautas y siempre que el estado inicial y las órdenes sean las mismas, producirá el mismo resultado. Es decir, en un ordenador normal, siempre que hagamos una operación matemática nos dará el resultado de forma consistente. En cambio, en un algoritmo cuántico, el estado de los qubits interfiere en el resultado y, por tanto, suele ser probabilístico. Por ello, hay que ejecutar el algoritmo varias veces para que la confianza del resultado sea mayor.

Con esto en mente, el matemático Peter Shor desarrolló el Algoritmo de Shor en 1994. Este algoritmo es capaz de resolver la factorización de números enteros, es decir, de encontrar si se puede descomponer en números más pequeños o si se trata de un número primo. En caso de números pequeños, como puede ser el 10 (2x5) esta tarea es sencilla, pero en números primos con millones de dígitos los cálculos se complican y en un ordenador clásico se eternizan. Debido al sistema criptográfico RSA, de esta dificultad de cálculo depende la seguridad de las contraseñas que utilizamos en nuestros ordenadores.

Cuando enviamos un mensaje cifrado, como sucede con las apps de mensajería instantánea, tenemos dos claves: una pública y una privada. Cuando enviamos un mensaje a una persona, el emisor busca la clave del receptor, que suele ser un número primo grande, y cifra el



mensaje empleando esa clave. Una vez el mensaje llega a la persona de interés, esta puede descifrar el mensaje empleando su clave privada, otro número primo grande. En el caso de que el mensaje llegase a otra persona, al no disponer de la clave privada únicamente podría leer un galimatías sin sentido. Para descifrar el sistema, el hacker en cuestión tendría que saber qué dos números primos se han utilizado para encriptar el mensaje y para ello, necesitaría realizar operaciones que podrían durar miles de años. Pero con el Algoritmo de Shor, el tiempo se reduce de forma sustancial. Por tanto, de aplicarse en un ordenador cuántico implicaría que este sistema criptográfico se volvería inseguro.

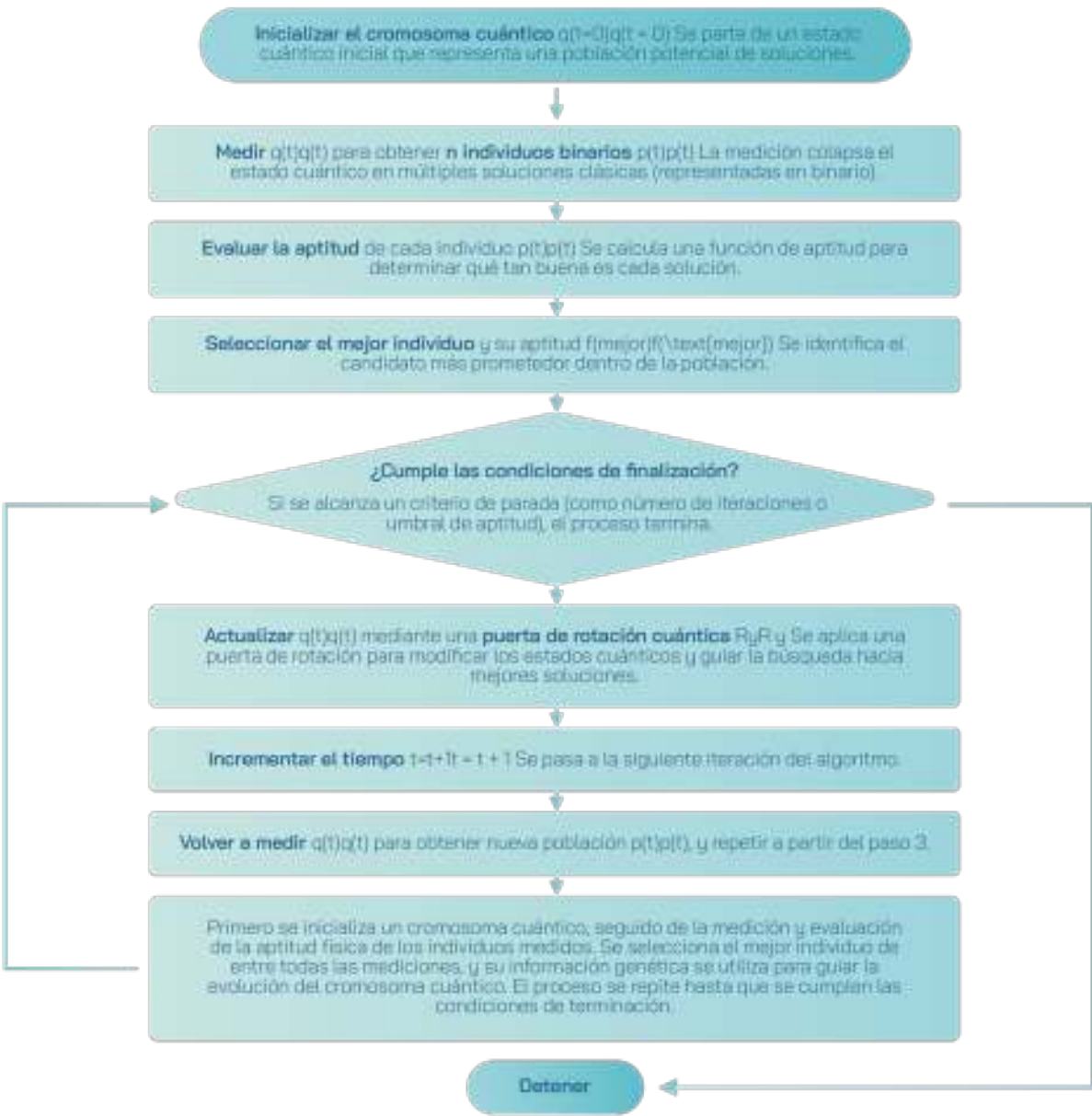
Sin embargo, los ordenadores cuánticos todavía no se encuentran suficientemente avanzados como para resolver este tipo de ecuaciones de forma que vuelvan el sistema RSA obsoleto. Ahora bien, es un riesgo que vale la pena tener en cuenta para un futuro, porque la computación cuántica está avanzando rápidamente durante esta última década.

Más adelante, en 1996, Lov Grover desarrolló un algoritmo⁵ que era capaz de buscar en una base de datos de forma cuadráticamente más rápida que los algoritmos tradicionales. De aplicar su método, las inteligencias artificiales basadas en *machine learning* podrían volverse más eficientes. Por poner un ejemplo, empleando este algoritmo cuántico se podría avanzar enormemente en el área de la Inteligencia artificial para la salud. Gracias a este algoritmo, los sistemas automáticos de reconocimiento de patologías en escáneres o rayos X podrían mejorar sustancialmente.

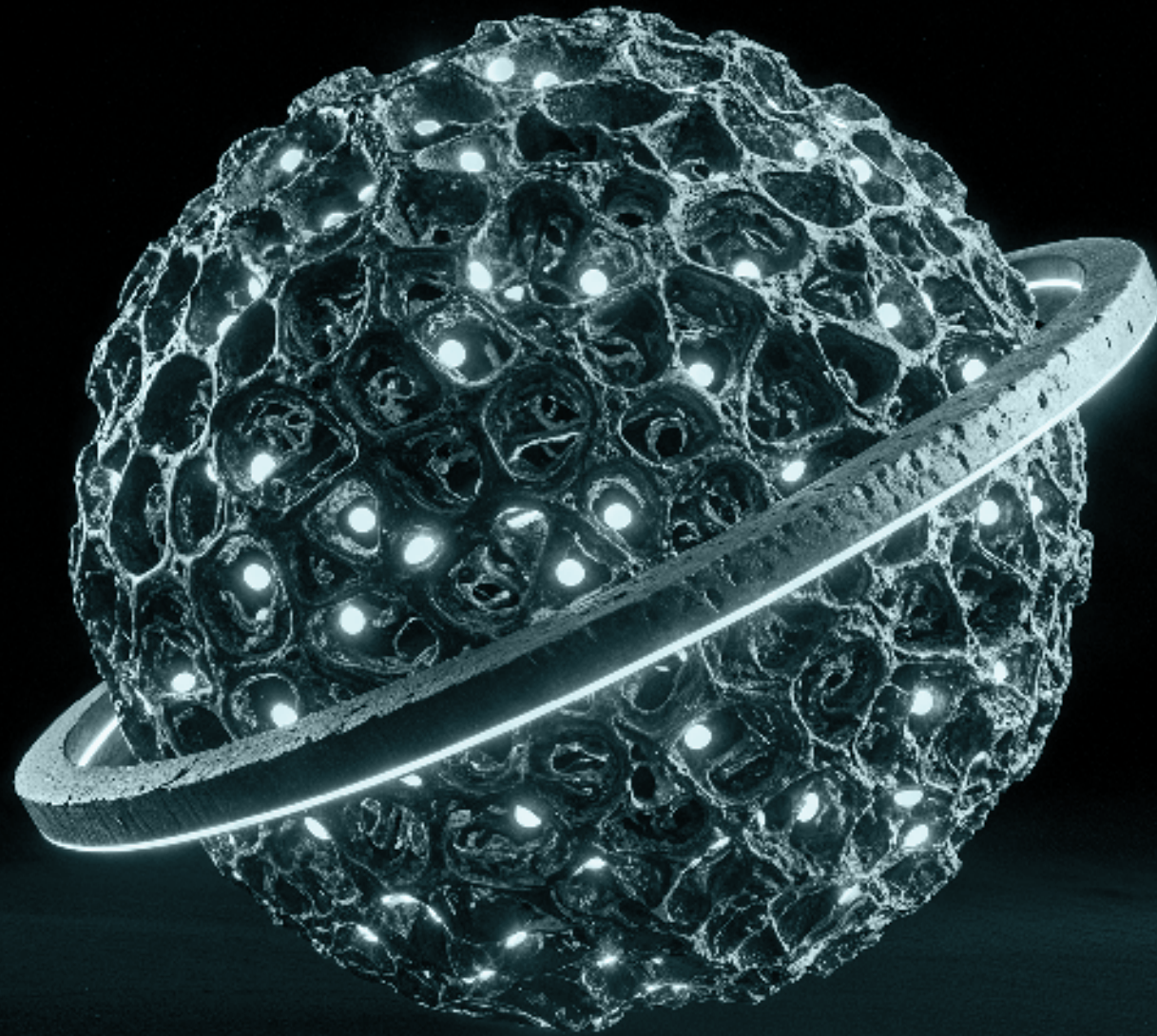
Más adelante se han desarrollado otros algoritmos tanto puramente cuánticos, como híbridos, que permiten llevar a cabo ciertas tareas importantes para la ciencia, como el cálculo de la energía mínima de moléculas, o problemas combinatorios para hallar la ruta más rápida entre dos puntos. Sin embargo, todo esto se realizaba de forma teórica, sin llegar a materializarlo en un ordenador cuántico real.

No fue hasta 2019 cuando Google anunció la supremacía cuántica. Es decir, logró utilizar un algoritmo cuántico en un ordenador cuántico de 53 qubits para resolver un problema. Se estima que un superordenador prome-

El flujo de trabajo de un Algoritmo Cuántico Genético (GQA)



Fuente: npj Computational Materials



dio habría tardado miles de años en llevar a cabo el cálculo, pero a este pequeño ordenador le costó únicamente 200 segundos. Desde entonces, otras compañías han desarrollado o simulado ordenadores cuánticos para resolver problemas.

En la actualidad, varias compañías están invirtiendo importantes sumas de dinero y recursos en la creación de ordenadores cuánticos con un mayor número de qubits. Los gigantes de la tecnología, como IBM, Microsoft y Google se encuentran en una auténtica carrera para lograr el ordenador cuántico más potente hasta la fecha, y están explorando los límites físicos para lograrlo.

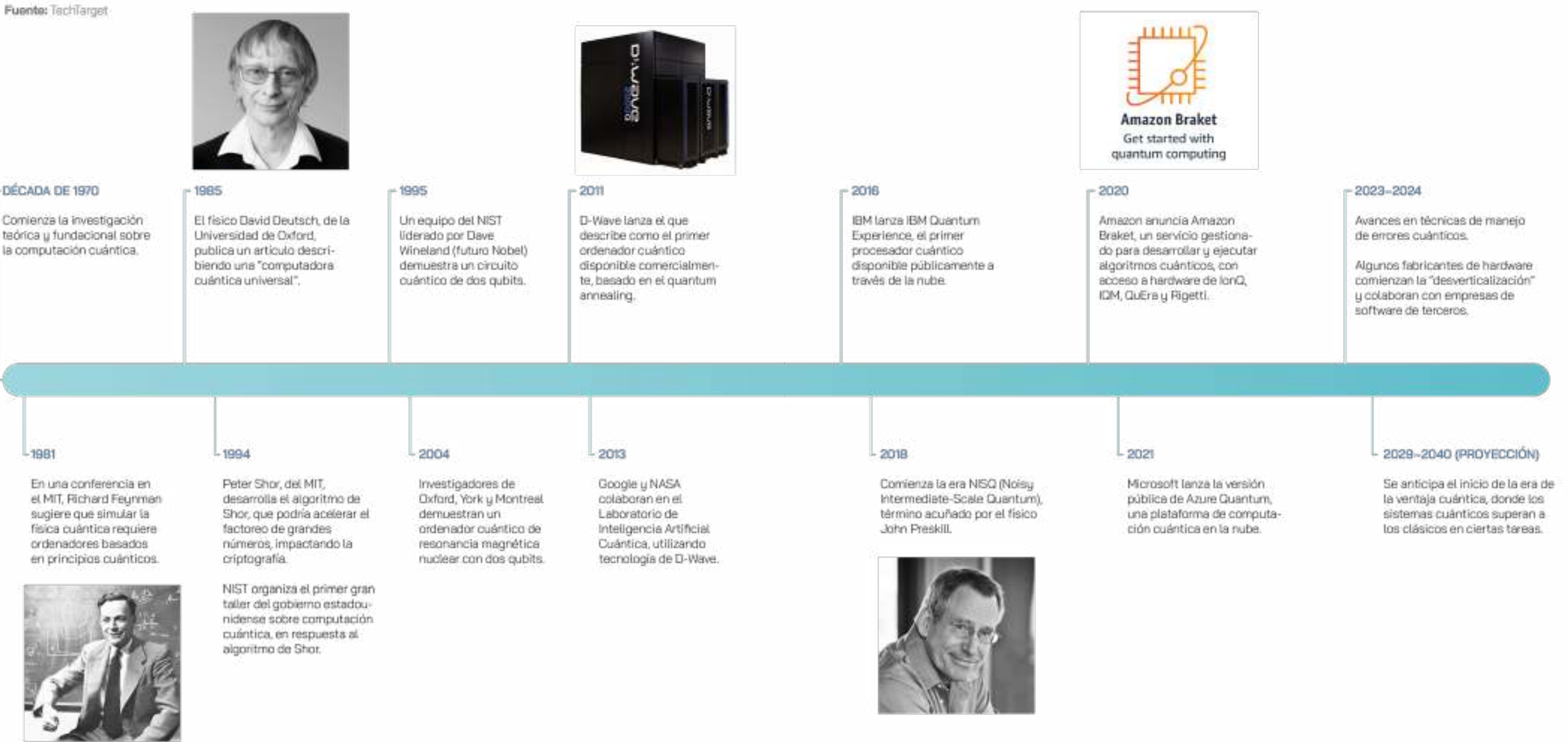
Los mayores problemas que están encontrando surgen a la hora de asegurar que los resultados que se extraen al aplicar los algoritmos son correctos, ya que la fundamentación probabilística de la computación cuántica tiene ese problema intrínseco. Por ello, gran parte de los qubits físicos que tiene un ordenador cuántico han de ser utilizados para proteger de errores y ofrecer estabilidad y consistencia a aquellos que están haciendo el cálculo. Según uno de los últimos métodos de corrección de errores, llamado código Gröss, para cada qubit lógico estable se necesitan decenas de qubits físicos. Concretamente, para proteger 12 qubits lógicos durante 1 millón de operaciones se necesitan 288 qubits físicos⁶.

Esto puede suponer un gran problema en el escalado de los ordenadores cuánticos, pero se espera que, con el desarrollo de nuevos algoritmos, se vayan encontrando soluciones más prácticas.

La algoritmia cuántica es un área de investigación que puede revolucionar la capacidad de computación actual y sus posibilidades. Con una creciente necesidad de análisis masivo de datos, la algoritmia cuántica es un salvoconducto para lograr obtener resultados de forma prácticamente instantánea. De este modo, se espera que la algoritmia cuántica revolucione sectores como la salud, la ciencia climática, la física, y las ciencias informáticas. Aunque tiene ciertas limitaciones, puesto que se ha demostrado que, por mucho que se consiga avanzar, no podrá resolver problemas irresolubles, su estudio es muy interesante para lograr analizar datos de forma más eficiente.

En la actualidad, el desarrollo de esta tecnología sólo está al alcance de las mayores empresas tecnológicas, puesto que requieren de enormes recursos para su puesta a punto. Pero el talento capaz de comprender cómo materializar el mundo cuántico y emplear sus capacidades en el mundo real se encuentra repartido por todo el globo.

Recorrido histórico de la tecnología cuántica



La cuántica llega primero en forma de algoritmos

EN ACCIÓN

Si bien el hardware cuántico es el que suele acaparar más titulares en los medios de comunicación, es el software cuántico el que ha avanzado notablemente en tan solo unos años. El volumen de información susceptible de ser procesada aumenta a ritmo exponencial y la presión para que la forma de operar en todos los ámbitos, públicos y privados, sea sostenible desde todos los puntos de vista, incluidos el medioambiental y el social⁷, es cada vez mayor.

El reciente Pacto Climático de Glasgow podría considerarse una fuente de infinidad de problemas de optimización para la informática, por ejemplo. Impulsa la expansión continua de parques de generación eléctrica fotovoltaica y eólica y eso incrementa el número de variables en la red energética. Conforme aumenta el nivel de complejidad del suministro energético, en plena confluencia de distintas revoluciones tecnológicas, crece el desafío para los ordenadores actuales en materia de sostenibilidad. La sociedad les pide soluciones a corto plazo, pero los recursos energéticos son limitados y en algún momento pueden no escalar. Las tecnologías de la segunda revolución cuántica están apareciendo como una tercera vía para resolver este aparente conflicto entre desarrollo tecnológico, respeto al medio ambiente y lucha contra el cambio climático.

En el ámbito del hardware, la era actual de la computación cuántica se conoce por las siglas NISQ (computación cuántica de escala intermedia ruidosa) y se caracteriza por dispositivos con un número todavía limitado de qubits y sujetos a altos niveles de ruido y de errores. Los sistemas cuánticos no pueden manejar conjuntos de da-

tos muy grandes y de alta dimensión, y tienen que superar desafíos técnicos y científicos enormemente complicados aún. No hay que olvidar que el campo de la computación cuántica propiamente dicha es todavía emergente, su literatura es escasa y aún no está clasificada sistemáticamente.

Eso se traduce en unas posibilidades limitadas del software cuántico existente. Los casos de uso más valiosos requerirían entre 10.000 y 20.000 operaciones de qubits y una fidelidad cercana al 100%. Sin embargo, los circuitos de más de 30 qubits sólo habían alcanzado, como máximo, una tasa de fidelidad del 99,5% hasta que la colaboración de Microsoft y Quantinuum logró superarla parcialmente en abril de 2024, cuando en sus sistemas H1 alcanzaron una tasa de “tres nueves” para puertas de dos qubits. Ese sigue siendo, no obstante, un registro poco competitivo. Los algoritmos más útiles necesitan millones de operaciones de puerta, incluso miles de millones en el caso del algoritmo de Shor, por lo que las máquinas cuánticas aún necesitan mejorar en muchos órdenes de magnitud.

Estos factores han impedido que la computación cuántica alcance una ventaja definitiva sobre los sistemas clásicos, al menos mediante el enfoque basado en puertas digitales, y está impulsando nuevas vías para la aplicación de algoritmos cuánticos o inspirados en ellos. Las perspectivas, en ese sentido, resultan mucho más alentadoras. Se estima que la computación híbrida mejorada cuánticamente podría convertirse en el estándar en 2030⁸, especialmente en ámbitos que van desde la salud y las finanzas hasta los sistemas autónomos⁹.

Incluso antes de que se fabricara el primer ordenador cuántico, los investigadores ya habían comenzado a desarrollar algoritmos clásicos inspirados en la teoría de la computación cuántica. Estos algoritmos aprovechan ciertas de sus propiedades para lograr un mayor rendimiento y capacidad en la resolución de problemas. Es cierto que el desarrollo de nuevos algoritmos se ha retrasado. De hecho, la mayoría de los avances significativos se formalizaron entre las décadas de 1980 y 2010, y en los últimos diez años se ha avanzado poco. Pero hoy cada vez son más las empresas que invierten en aplicaciones comerciales basadas en software de inspiración cuántica.

Empresas como D-Wave, Pasqal, Kipu Quantum y la española Qilimanjaro han optado por la computación cuántica analógica e híbrida (analógica combinada con pocas puertas). Servicios de nube cuántica como IBM Quantum y AWS Braket ayudan a integrar algoritmos cuánticos en los flujos de trabajo empresariales, al tiempo que surgen marcos de código abierto como Qiskit de IBM, Cirq de Google, TKET de Quantinuum y PennyLane de Xanadu que reducen las barreras de entrada, y permiten a los desarrolladores escribir programas cuánticos en abstracciones de alto nivel que se asemejan a los paradigmas de programación clásicos. Multiverse Computing, que llegó a liderar en nuestro país el listado de empresas por solicitudes de patente europea en 2022, es una de las más avanzadas del mundo en algoritmos de inspiración cuántica.



Esta estrategia híbrida podría ofrecer beneficios prácticos a corto plazo para casos de uso específicos en simulación molecular, criptografía y optimización a pequeña escala. En general, para las industrias que dependen de la optimización y las simulaciones complejas: se prevé una adopción temprana de los algoritmos cuánticos y de inspiración cuántica en el sector financiero y farmacéutico durante los tres a cinco años próximos, orientados a la optimización de carteras, el modelado de riesgos y el descubrimiento de fármacos. Seguirán la industria aeroespacial, de defensa y de energía (5-10 años), que se beneficiará de las simulaciones cuánticas para la ciencia de los materiales, la eficiencia del combustible y la fusión nuclear. Por su parte, la robótica y la inteligencia artificial (IA) podrían requerir más de 10 años antes de experimentar de forma generalizada el impacto de la nueva tecnología, ya que el procesamiento cuántico en tiempo real y los avances en IA aún se encuentran en etapas iniciales de investigación.

Los algoritmos cuánticos forman parte de una industria de computación cuántica que creció en 2024 a una tasa anual del 5,24% y cuenta con más de 360 startups entre las más de 13.000 empresas que contribuyen a su expansión global. El sector emplea a más de un millón de personas en todo el mundo y sumó más de 59.000 nuevos empleados en 2024, un año en el que más de 65.000 solicitantes superaron las 296.000 patentes¹⁰. El valor de inversión combinado de los principales inversores, como Google, Quantum Capital Group, National Growth y otros, estuvo por encima de los 6.000 millones de dólares.

De los 26 tipos diferentes de algoritmos de inspiración cuántica identificados a finales de 2024, seis de ellos están recibiendo una atención especial por parte de los investigadores. El algoritmo Quantum Particle Swarm Optimization (QPSO) aparece en alrededor del 43% de publicaciones y es dominante en el ámbito de suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado. Le sigue el Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO), al que se dedican casi el 17% de los estudios y lidera en el ámbito de transporte y almacenamiento, aunque su ritmo de crecimiento le podría poner en cabeza en poco tiempo. Otros algoritmos prometedores son el Quantum Genetic Algorithm (QGA), cuya forma de actuación se ha podido ver en el Gráfico 1, el Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm (QIEA) y el Quantum Bat Algorithm (QBA).

Entre los sectores en los que el volumen de investigación sobre algoritmos de inspiración cuántica resulta elevado destacan administración pública y defensa; seguridad social; arquitectura e ingeniería; consultoría de gestión; captación, tratamiento y suministro de agua; servicios de información; y reparación e instalación de maquinaria y equipo.

La Unión Europea está centrada en la carrera de las tecnologías cuánticas sin que las actuaciones dirigidas a promover la industria del software cuenten con un espacio específico. Dos años después del Manifiesto Cuántico¹¹ de 2016, lanzó la Quantum Technologies Flagship¹² cuyo objetivo debía ser apoyar el trabajo de cientos de investigadores durante 10 años. En la fase de

puesta en marcha del Flagship (2018-2022), destinó 152 millones de euros y se beneficiaron 24 proyectos, con más de 1.600 investigadores involucrados. La siguiente fase, que forma parte ya del programa Horizonte Europa, dispone inicialmente de 400 millones y quiere impulsar también más de veinte nuevos proyectos. Los objetivos de investigación del Flagship se basan en la Agenda Estratégica de Investigación sobre Tecnologías Cuánticas, a cuya redacción contribuyeron más de 2.000 expertos europeos. Su visión a largo plazo es desarrollar en Europa el denominado internet cuántico, que conectará ordenadores, simuladores y sensores cuánticos mediante redes de comunicación cuántica.

La Empresa Común Europea de Computación de Alto Rendimiento (EuroHPC JU) trabaja precisamente en ello. En octubre de 2022, anunció la selección de seis emplazamientos en la UE para albergar los primeros ordenadores cuánticos europeos, que se integrarán en los superordenadores EuroHPC de Chequia, Alemania, España, Francia, Italia y Polonia. Aquella decisión supuso el inicio del despliegue de una infraestructura de computación cuántica, accesible para usuarios europeos de los sectores científico e industrial a través de la nube, y sin fines comerciales¹³. Esta infraestructura está pensada para abordar problemas complejos de simulación y optimización, especialmente en el desarrollo de materiales, el descubrimiento de fármacos, la predicción meteorológica y el transporte, entre otros.

Finalmente, en diciembre de 2023, la “Declaración Europea sobre Tecnologías Cuánticas” afirmó que constituyen una alta prioridad para la soberanía de la UE¹⁴, y citó la Estrategia Europea de Seguridad Económica, así como en la Recomendación de la Comisión, de 3 de octubre de 2023, que las incluye entre las áreas tecnológicas críticas para la seguridad económica. En ella se puede leer que, desde 2018, la UE y los Estados miembros han comprometido más de 8.000 millones de euros en tecnologías cuánticas.

La realidad es que pocas instituciones europeas se sitúan entre los principales centros de investigación cuántica del mundo. En el caso de las universidades, destacan los centros de Copenhague, París, Múnich y Delft, pero siguen lejos de instituciones estadounidenses como Caltech, MIT y Harvard, y de universidades de

países no pertenecientes a la UE, como el Reino Unido y Suiza. También la financiación pública y privada en la UE está por detrás de la de Estados Unidos y China. Este último país se ha comprometido a invertir alrededor de 15.000 millones de dólares, mientras que EEUU ha anunciado 5.000 millones de dólares en la próxima década, aunque se beneficia de un sólido capital de riesgo e inversión¹⁵ que superará ampliamente las aportaciones del sector público.

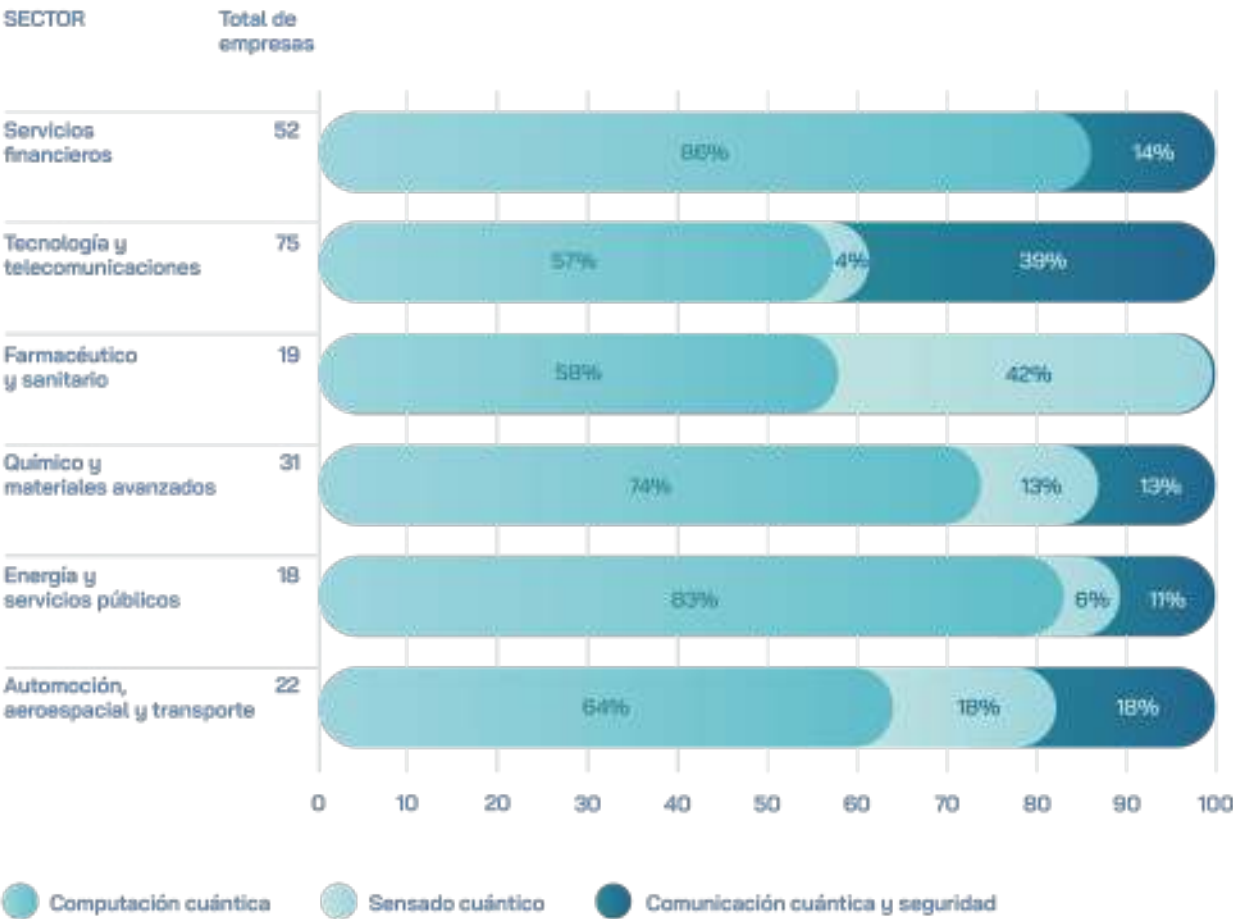
El Informe Draghi instó, con razón, a impulsar la inversión en tecnología cuántica y facilitar el acceso al capital privado europeo para startups y empresas en expansión. Los expertos creen que la UE carece de una comprensión integral de las cadenas de suministro críticas de la tecnología cuántica, de sus posibles cuellos de botella y de sus propias fortalezas y debilidades. Pese a que la Ley Europea de Chips incluye medidas para fomentar la fabricación a bajo coste y en grandes volúmenes de chips cuánticos en la UE, el sector se compone principalmente de ecosistemas relativamente pequeños repartidos por los Estados miembros que han formulado estrategias nacionales integrales de tecnología cuántica: Dinamarca, Francia, Alemania, Irlanda y Países Bajos, a los que acaba de sumarse España.

La fragmentación se reproduce en el sector privado: en lugar de grandes corporaciones, la UE cuenta fundamentalmente con empresas emergentes y algunas compañías en expansión. El software basado en algoritmos de inspiración cuántica reclama más atención en todo este despliegue de esfuerzos nacionales y europeos. El reto es encontrar aplicaciones concretas en sectores productivos que puedan mejorar la eficiencia de las empresas y abrir la puerta a nuevos modelos de negocio, como se puede observar en el Gráfico 3. Un prometedor campo denominado aprendizaje automático inspirado en lo cuántico (QiML) permite, por ejemplo, simular los sistemas cuánticos digitalmente, sin necesidad de recurrir a ordenadores cuánticos. La clave para marcar la diferencia, en este caso, consistirá en identificar qué efectos pueden simularse eficientemente para lograr una ventaja computacional¹⁶.

Los ejemplos actuales de dinamismo en el caso de la algoritmia de inspiración cuántica confirman su potencial de crecimiento y su capacidad para transformar sectores enteros. El caso de la industria financiera y el *trading* es de los más evidentes. Aparecen ya sistemas de recomendación de cartera de inspiración cuántica, basados en la tasa de tendencia y optimización, diseñados específicamente para mercados globales de valores cruzados. En algún caso¹⁷, el modelo identifica ya tendencias alcistas sólidas y estables, evalúa las relaciones complejas del mercado y analiza las conexiones bursátiles entre países. Y lo hace priorizando la explicabilidad y la transparencia, para que los inversores comprendan los resultados generados por la IA, una capacidad cada vez más importante para usuarios empresariales y organismos reguladores.

ICOSA y NEC han desarrollado Vector Annealing (VA), un método informático de inspiración cuántica, que acelera significativamente la búsqueda de soluciones en la optimización de carteras financieras. Y la tecnología de

Adopción temprana por sector industrial



Fuente: World Economic Forum

inspiración cuántica SQBM+ de Toshiba ayuda a encontrar en tiempo real oportunidades de arbitraje rentables y de corta duración en el mercado de divisas gracias a una solución de transacciones de alta frecuencia (HFT). El sistema puede capturar oportunidades de corta duración en menos de un milisegundo sin errores, aumenta la tasa de éxito al 98% y en última instancia, soluciona un cuello de botella de la industria financiera.

Casi el 80% de los 50 bancos más grandes del mundo están participando activamente en la tecnología cuántica¹⁸. JPMorgan Chase concentra dos tercios de todas las ofertas de trabajo y publica más de la mitad de todos los artículos de investigación en este ámbito, y ya ha implementado algoritmos de inspiración cuántica para mejorar la optimización de la cartera y la ciberseguridad. La italiana Intesa Sanpaolo está explorando aplicaciones cuánticas en la calificación crediticia, la detección de fraudes y la fijación de precios de derivados. Desde mediados de 2024, el número de profesionales cuánticos en la banca ha aumentado un 10%, y las investigaciones de expertos cuánticos afiliados a la banca han sido citadas más de 3.000 veces. McKinsey¹⁹ estima que, en 2035, los casos de uso de computación cuántica en finanzas podrían generar hasta 622.000 millones de dólares en valor.

Una de las líneas de investigación para modelar la distribución de rentabilidades financieras²⁰ y seguir la dinámica de los precios de los activos es la de las denominadas caminatas cuánticas, aunque deben manejarse con precaución, porque pueden introducir pequeños sesgos, por ejemplo, reflejar optimismo por parte del comprador. La teoría de juegos, un concepto fundamental en economía, también se podría abordar desde esa perspectiva, ya que el modelo podría reflejar factores subjetivos, frente a los modelos clásicos que representan al vendedor.

Un número cada vez mayor de administradores de activos financieros y fondos de cobertura están explorando también las posibilidades de las redes tensoriales, los algoritmos de inspiración cuántica y el hardware especializado. En el Gráfico 4 se recopilan las categorías de soluciones inspiradas en lo cuántico. Se trata de encontrar aceleraciones para los algoritmos clásicos más conocidos, en lugar de sustituirlos por nuevos, para evitar así el uso de los algoritmos cuánticos que aún no poseen la escala para casos comerciales del mundo real²¹. El software de inspiración cuántica se puede utilizar, por ejemplo, en la fijación de precios de opciones, ya que los modelos anteriores, dan por supuesta una volatilidad constante y eso acaba convirtiéndose en una limitación. Google ha desarrollado²² una biblioteca de código abierto llamada TensorNetwork para implementar algoritmos de redes tensoriales.

Las posibilidades de convergencia tecnológica con el nuevo ciclo de la inteligencia artificial (IA) son amplísimas. Investigadores de la española Multiverse Computing y CounterCraft han desarrollado un nuevo modelo de IA cuántica, entrenado con conjuntos de datos de tráfico de red real y registros del sistema, que identifica el 100% de los ciberataques. Para ello, emplea

(...)
La clave quizás no es “poseer” hardware, sino construir capacidades en algoritmos y casos de uso, integrados con nuestro supercomputing y la nube. Un programa país de workflows híbridos HPC cuántico con industria tractora, métricas de valor económico, repositorios abiertos y formación de talento especializado (compilación, reducción de errores, métodos híbridos) nos permitiría acelerar aprendizaje y transferencia. Posicionarse ahora reduciría la curva de adopción y nos situaría en la frontera cuando la madurez tecnológica se acelere.

Andrés Pedreño

inteligencia de amenazas generada por el adversario en lugar de los sistemas tradicionales²³. Investigadores de la Universidad Tecnológica del Sur de China y Huawei Technologies, por su parte, han desarrollado un método de aprendizaje automático de inspiración cuántica para el acoplamiento molecular, una herramienta clave en el diseño de fármacos²⁴. Su método supera a los algoritmos de acoplamiento tradicionales y a los algoritmos basados en aprendizaje profundo en más de un 10%. Los algoritmos de aprendizaje automático (un tipo de IA) de inspiración cuántica, incorporados en dispositivos periféricos, pueden optimizar la toma de decisiones en tiempo real en aplicaciones relacionadas con vehículos autónomos o sistemas de internet de las cosas (IoT).

En el ámbito de la medicina personalizada, el aprendizaje automático basado en la computación cuántica supone una auténtica revolución para la toma de decisiones sofisticada en tiempo real. Toray²⁵ colaboró con Fujitsu para utilizar un *annealer digital* y predecir las conformaciones óptimas de las cadenas laterales de las proteínas. Moderna está explorando la computación cuántica y la GenAI para avanzar y agilizar su investigación sobre el ARN mensajero (ARNm) y así desarrollar vacunas con mayor rapidez. Los científicos pueden crear datos genéticos sintéticos muy similares a los del mundo real que podrían alimentar algoritmos cuánticos para desarrollar modelos moleculares más precisos, acelerando así todo el proceso de descubrimiento de fármacos.

Las ciudades sostenibles también tienen mucho que ganar con la combinación de la computación cuántica y la IA²⁶. Los urbanistas podrían crear datos sintéticos de tráfico que simulen los patrones de tráfico del mundo real para entrenar algoritmos cuánticos que mejoren la gestión de la congestión y optimicen rutas, lo que conduciría a ciudades más sostenibles con sistemas de transporte eficientes, tiempos de viaje reducidos y una mejor calidad del aire.

Actualmente, la IA generativa (GenAI) tiene dificultades en algunas tareas matemáticas complejas, en particular al convertir algoritmos clásicos en cuánticos. Sin embargo, a medida que la IA continúe desarrollando y mejorando su comprensión de las bibliotecas y los solucionadores matemáticos, su potencial para superar esta brecha²⁷ no dejará de crecer. Los líderes empresa-

riales deberán considerar el valor estratégico de los grandes modelos cuantitativos (LQM), que se ejecutan en ordenadores clásicos, no en cuánticos, pero pueden simular comportamientos de la mecánica cuántica y otros factores cuantitativos que los métodos tradicionales tienen dificultades para abordar. Son algoritmos capaces de abordar problemas multivariantes, lo que permitirá introducir modelos y estrategias eficientes y más precisos, que podrían potencialmente liberar hasta 700.000 millones de dólares en valor, según McKinsey, y reducir los costes de atención médica.

El rendimiento de diferentes materiales funcionales (como materiales de aleación, materiales ópticos, etc.) depende de muchos factores de diseño, como las características geométricas, la composición, las condiciones de procesamiento y los factores ambientales. Los métodos tradicionales, incluidos los experimentos y las simulaciones, suelen consumir demasiado tiempo y ser demasiado costosos en espacios de trabajo que, en ocasiones, resultan extremadamente grandes. Un algoritmo QGA combina las ventajas de la computación cuántica y los algoritmos genéticos²⁸ para superar esos obstáculos.

El Jet Propulsion Laboratory de la NASA se asoció con Azure Quantum para desarrollar una solución de optimización que ayudó a reducir los tiempos de programación de horas a solo minutos. Ford también colaboró con Microsoft para utilizar tecnología de inspiración cuántica en una simulación de rutas de tráfico de 5.000 vehículos, que demostró reducir el tráfico en Seattle en un 73% y acortar los tiempos de viaje en un 8%. En la industria manufacturera, los algoritmos de inspiración cuántica ayudan a optimizar los cronogramas de producción. Esto minimiza el tiempo de inactividad y maximiza la producción y puede reducir un 30% los costes operativos de las empresas.

El 55% de las empresas que adoptaron algoritmos de inspiración cuántica han experimentado una mejora en su posicionamiento en el mercado, según Deloitte. A diferencia de la computación cuántica experimental, los algoritmos de inspiración cuántica aprovechan los principios de superposición y recocido (annealing) cuántico para diseñar soluciones clásicas de optimización de rutas, previsión de la demanda y gestión de inventarios. En el sector del transporte, IBM colaboró con un fabricante de vehículos comerciales para optimizar las entregas en 1.200 ubicaciones de la ciudad de Nueva York. Los métodos tradicionales presentaban dificultades debido a la interacción de variables dinámicas, como plazos de entrega de 30 minutos y el tráfico en tiempo real. Al integrar algoritmos de inspiración cuántica en un marco híbrido, el equipo procesó simultáneamente millones de rutas potenciales, y logró reducir drásticamente los costes operativos.

La cadena de restaurantes japonesa Toridoll Holdings se asoció con Fujitsu para predecir el tráfico de clientes mediante análisis de datos de ventas, patrones meteorológicos y promociones basados en IA. Este enfoque y solución de inspiración cuántica optimizó los niveles de inventario y las

operaciones de la cocina, redujo el consumo energético y el desperdicio de alimentos. Japan Post implementó el solucionador de Optimización Binaria Cuadrática Sin Restricciones (QUBO) de Fujitsu para reimaginar la logística de última milla de Tokio. El sistema evaluó millones de secuencias de entrega, redujo los tiempos de operación en aproximadamente un 30% y la flota de reparto de 52 a 48 camiones.

A pesar del impacto potencial de la computación cuántica y de inspiración cuántica, el 65% de los encuestados por Market Connections admite que sus organizaciones tardan en adoptar esta tecnología y, de hecho, el 58% la consideraba una prioridad media o baja para los próximos 12 a 24 meses. Pero el ámbito de aplicación de los algoritmos de inspiración cuántica va, no obstante, más allá de la búsqueda de eficiencia puramente económica. En el ámbito de las redes sociales de internet y la gestión de grandes volúmenes de población, se utiliza el concepto de “maximización de la influencia” que ayuda a seleccionar los nodos óptimos para conseguir un objetivo. Las aplicaciones prácticas de las técnicas de maximización de la influencia abarcan desde la epidemiología hasta el marketing, lo que la convierte en un tema de investigación popular debido a sus diversos usos en el mundo real.

Volviendo a la complejidad de los problemas asociados al cambio climático, incluso con la tecnología informática moderna, la simulación directa y precisa de todos los flujos turbulentos de fluidos, salvo los más simples, sigue siendo imposible, y de forma particular en el caso de la atmósfera. Esto se debe a que la turbulencia se caracteriza por incluir remolinos y torbellinos de diversas formas y tamaños que interactúan de forma caótica e impredecible.

En lugar de simular directamente las fluctuaciones problemáticas, un grupo de investigadores decidió modelarlas como variables aleatorias distribuidas, según una función de distribución de probabilidad. De ese modo, pudieron extraer todas las magnitudes significativas del flujo, como la sustentación y la resistencia, sin tener que preocuparse por el caos de las fluctuaciones turbulentas, algo inviable con métodos clásicos. Para solucionar esto, el equipo aplicó una tecnología de computación de inspiración cuántica²⁹ desarrollada en

la Universidad de Oxford que se ejecuta en un solo núcleo de CPU (unidad central de procesamiento). En solo unas pocas horas pudo calcular lo que un algoritmo clásico equivalente necesitaría resolver en varios días utilizando un superordenador.

Para desplegar todo su potencial en el sector privado, como en otros ámbitos, habrá que resolver el problema de la disponibilidad de talento. El 60% de los líderes tecnológicos consultados por IBM citó la falta de profesionales cualificados como el principal obstáculo. La mayoría (77%) de ellos cree que contar con el talento adecuado e identificar las carencias de habilidades son obstáculos importantes para que su organización pueda adoptar la computación cuántica. La brecha de talento y habilidades— podría poner en peligro la creación de valor potencial, que McKinsey estima en hasta 1,3 billones de dólares.

Un estudio de McKinsey ha descubierto que solo hay un candidato cualificado en el campo de la computación cuántica por cada tres vacantes. Se preveía que menos del 50% de los empleos en el campo de la computación cuántica iban a ser cubiertos en 2025 a menos que se produjeran cambios significativos en la bolsa de talento disponible o en la tasa prevista de creación de empleos en el campo de la computación cuántica. Curiosamente, las pequeñas startup que trabajan en el sector cuántico suelen surgir de laboratorios de investigación universitarios y suelen tener acceso directo a candidatos cualificados. Las empresas más grandes podrían tener menos conexión con estas reservas de talento³⁰.

Una estrategia por contratar y startups que cambian el mundo

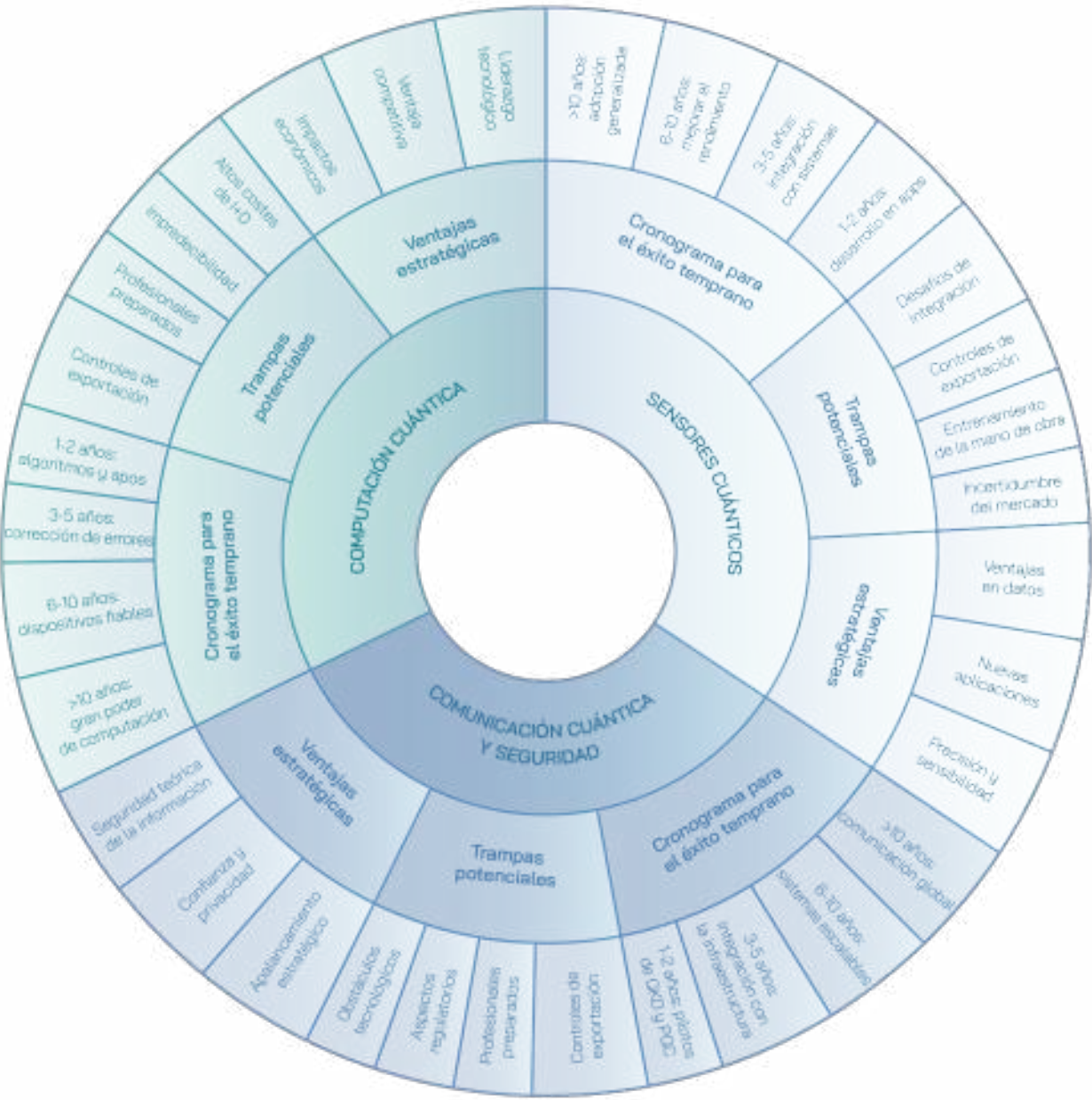
ESPAÑA

La estrategia Quantum Spain, integrada en la Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial (ENIA) y en la Estrategia de Tecnologías Cuánticas 2025-2030³¹, ha visto la luz con el objetivo de promover un ecosistema que busque sinergias y unifique los objetivos de la actividad empresarial y la investigadora. Está coordinada por el BSC-CNS, con una inversión de 22 millones de euros que van destinados a adquirir capacidades de computación cuántica sobre la base de superconductores para apoyar la investigación y la innovación. En el consorcio Quantum Spain participan 27 instituciones de investigación de 14 comunidades autónomas y 15 universidades públicas. El proyecto ha logrado poner en marcha el primer ordenador cuántico construido con tecnología 100% europea y tres emuladores cuánticos.

Al abordar las posibilidades de los algoritmos cuánticos, Quantum Spain destaca que varios grupos de institutos del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) participan activamente en su desarrollo dentro de su Plataforma Temática Interdisciplinar sobre Tecnologías Cuánticas³². Uno de ellos, el grupo QUIN-FOG, del Instituto de Física Fundamental, desarrolla algoritmos de optimización cuántica y aprendizaje automático cuántico. Junto a él, en el CSIC se investigan nuevos métodos de simulación numérica basados en redes tensoriales y un grupo del Instituto de Física Teórica, explora los algoritmos cuánticos aplicados a procesos de física de la materia condensada y física de altas energías. El grupo del Centro de Investigación en Nanomateriales y Nanotecnología, experimenta con el uso de átomos fríos para simular procesos cuánticos, y promueve la construcción de un simulador y un orde-



Cuatro categorías de soluciones inspiradas en lo cuántico



Fuente: World Economic Forum

nador basado en átomos de Rydberg en Asturias. Por su parte, el Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos se ha centrado en nuevos modelos de computación cuántica e inteligencia artificial para su aplicación a sistemas complejos.

La red de colaboración integra también a universidades, organismos públicos de investigación y empresas. Por ejemplo, se ha creado un laboratorio de computación cuántica en Oviedo (CINN), un laboratorio de comunicación cuántica en Madrid (ITEFI-CSIC) y se ha lanzado un máster interuniversitario en tecnologías cuánticas de España a través de la Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIMP), en colaboración con otras nueve universidades. El Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO), el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), que investiga sobre la compensación de los efectos adversos de la turbulencia atmosférica, son también referentes a nivel internacional en cuántica. El interés por las tecnologías cuánticas está presente en la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa del Gobierno español, con un enfoque en su potencial para la ciberseguridad, el procesamiento avanzado de datos y las comunicaciones seguras. El proyecto Quantum Spain.

Resulta interesante seguir el proceso de amerizaje de este nuevo campo tecnológico, en buena medida todavía pendiente del desarrollo de los principios fundamentales sobre los que se va a expandir, en la economía real en nuestro país. La multinacional energética Iberdrola, por ejemplo, ha impulsado un proyecto junto a Multiverse Computing, Premio Future Unicorn de Digital Europe en 2024, por su tecnología para la compresión de los modelos de lenguaje extenso (LLM), sobre los que se construye la inteligencia artificial generativa, mediante algoritmos cuánticos³³. La colaboración entre ambas compañías se ha desarrollado en el norte de España con el objetivo de optimizar la instalación de baterías a escala de red, que serán cada vez más importantes a medida que avance la transición energética. La solución de Multiverse utiliza algoritmos cuánticos y de inspiración cuántica para seleccionar el número, el tipo y la ubicación óptimos de las baterías. Contribuye así a reducir los costes derivados de añadir baterías a la red y aumenta su rendimiento.

Cada vez es mayor la inversión de capital riesgo español que se dirige al software de inspiración cuántica. Bullnet Capital ha liderado una ronda de inversión en Inspiration-Q³⁴, *spin-off* del CSIC fundada en 2021 que trabaja en el desarrollo de este tipo de algoritmos de forma que sean capaces de funcionar en computadoras convencionales. El objetivo es también que puedan implementarse de manera rápida y segura en ordenadores cuánticos comerciales a medida que estos estén disponibles en el mercado. El software de Inspiration-Q se centra en problemas de optimización difíciles de resolver fundamentalmente para el sector financiero.

Relación de notas

¹ Algorithm (Sin fecha) NNLM. Disponible en: <https://www.nnlm.gov/guides/data-glossary/algorithm> (Consultado el: 11/07/2025).

² Understanding algorithms in Computer Science (Sin fecha) Algorithm & computer science: definition and understanding. Disponible en: <https://www.iig.ch/en-en/blog/computer-science/algorithm-computer-science-definition-and-understanding> (Consultado el: 11/07/2025).

³ Mateu, P. (2024) De Marenostrium 4 a Marenostrium 5, La Evolución del Supercomputador Más Grande de España, National Geographic España. Disponible en: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/marenostrium4-5-evolucion-supercomputador-mas-grande-espana_21183 (Consultado el: 11/07/2025).

⁴ Deutsch, D. (1985) ‘Quantum theory, the church–turing principle and the Universal Quantum Computer’, Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 400(1818), pp. 97–117. doi:10.1098/rspa.1985.0070.

⁵ Grover, L (1996) A fast quantum mechanical algorithm for database search. doi: 10.48550/arXiv.quant-ph/9605043

⁶ Bravyi, S., Cross, A.W., Gambetta, J.M. et al. High-threshold and low-overhead fault-tolerant quantum memory. Nature 627, 778–782 (2024). doi: 10.1038/s41586-024-07107-7

⁷ Cláudio Gomes et al. A Systematic Mapping Study on Quantum and Quantum-inspired Algorithms in Operations Research, ACM Computing Surveys, 11 de noviembre de 2024, doi.org/10.1145/3700874

⁸ George Lawton, “The future of quantum computing: Near- and long-term outlook”, TechTarget, 27 de marzo de 2025, consultado el 18/06/2025

⁹ Krishna Kanagarla, Venkata Nagendra kundavaram, Quantum Computing-Inspired Machine Learning for Real Time Decision Making, IJMECE, 8 de mayo de 2025, doi.org/10.5281/zenodo.15236671

¹⁰ Adarsh R., “Quantum Computing Outlook 2025: Key Innovation and Insights”, StarUs, 28 de febrero de 2025, consultado el 19/06/2025

¹¹ <https://ec.europa.eu/futurium/en/content/quantum-manifesto-quantum-technologies>

¹² <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship>

¹³ <https://www.european-quantum-act.com/>

¹⁴ “Declaración Europea sobre Tecnologías Cuánticas”, Comisión Europea

¹⁵ Jennifer Baker, “Quantum needs more investment, better innovation recipe for growth”, Euractiv, 24 de septiembre de 2024, consultado el 18/06/2025

¹⁶ Jean Michel Sellier, “Why you

should be interested in quantum-inspired technologies?”, Ericsson, 5 de abril de 2024, consultado el 18/06/2025

¹⁷ Yao-Hsin Chou et al. An Investigation on Quantum-Inspired Algorithms for Portfolio Optimization Across Global Markets, IEEE, agosto de 2024, DOI: 10.1109/MNA-NO.2024.3402755

¹⁸ Ann-Marie Corvin, “JPMorgan and HSBC lead global banks in quantum technology race”, Tech Informed, 21 de marzo de 2025

¹⁹ Martina Gschwendtner, Nicole Morgan, Henning Soller, “Quantum technology use cases as fuel for value in finance”, McKinsey, 23 de octubre de 2023

²⁰ Stijn De Backer et al. On the potential of quantum walks for modeling financial return distributions, Physica A, 29 de noviembre de 2024, doi.org/10.1016/j.physa.2024.130215

²¹ Alexander Del Toro Barba, “How Quantum Computing could accelerate Finance and Economics”, Medium, 16 de julio de 2024, consultado el 18/06/2025

²² Chase Roberts et al. TensorNetwork: A Library for Physics and Machine Learning, physics.comp-ph, 3 de mayo de 2019, doi.org/10.48550/arXiv.1905.01330

²³ Borja Aizpurua, Samuel Palmer, Román Orús, Tensor Networks for Explainable Machine Learning in Cybersecurity, Neurocomputing, 28 de julio de 2025, doi.org/10.48550/

arXiv.2401.00867

²⁴ Runqiu Shu et al. Quantum-Inspired Machine Learning for Molecular Docking, physics.chem-ph, revisado 22 de febrero de 2024, doi.org/10.48550/arXiv.2401.12999

²⁵ <https://www.fujitsu.com/global/about/resources/case-studies/vision/toray/>

²⁶ “Quantum for Society: Meeting the Ambition of the SDGs”, World Economic Forum, septiembre de 2024

²⁷ “Embracing the Quantum Economy”, World Economic Forum / Accenture, enero de 2025

²⁸ Zhihao Xu et al. Quantum-inspired genetic algorithm for designing planar multilayer photonic structure, npj Comput Mater, 13 de noviembre de 2024

²⁹ N Gourianov et al, Tensor networks enable the calculation of turbulence probability distributions, Science Advances, 29 de enero de 2025, DOI: 10.1126/sciadv.ads5990

³⁰ Miklós Gábor Dietz et al., “What is quantum computing?”, McKinsey, 31 de marzo de 2025

³¹ “Estrategia de tecnologías cuánticas de España”, Gobierno de España, abril de 2025

³² quantumspain-project.es/en/quantum-and-quantum-inspired-algorithms-for-complex-mathematical-problems/

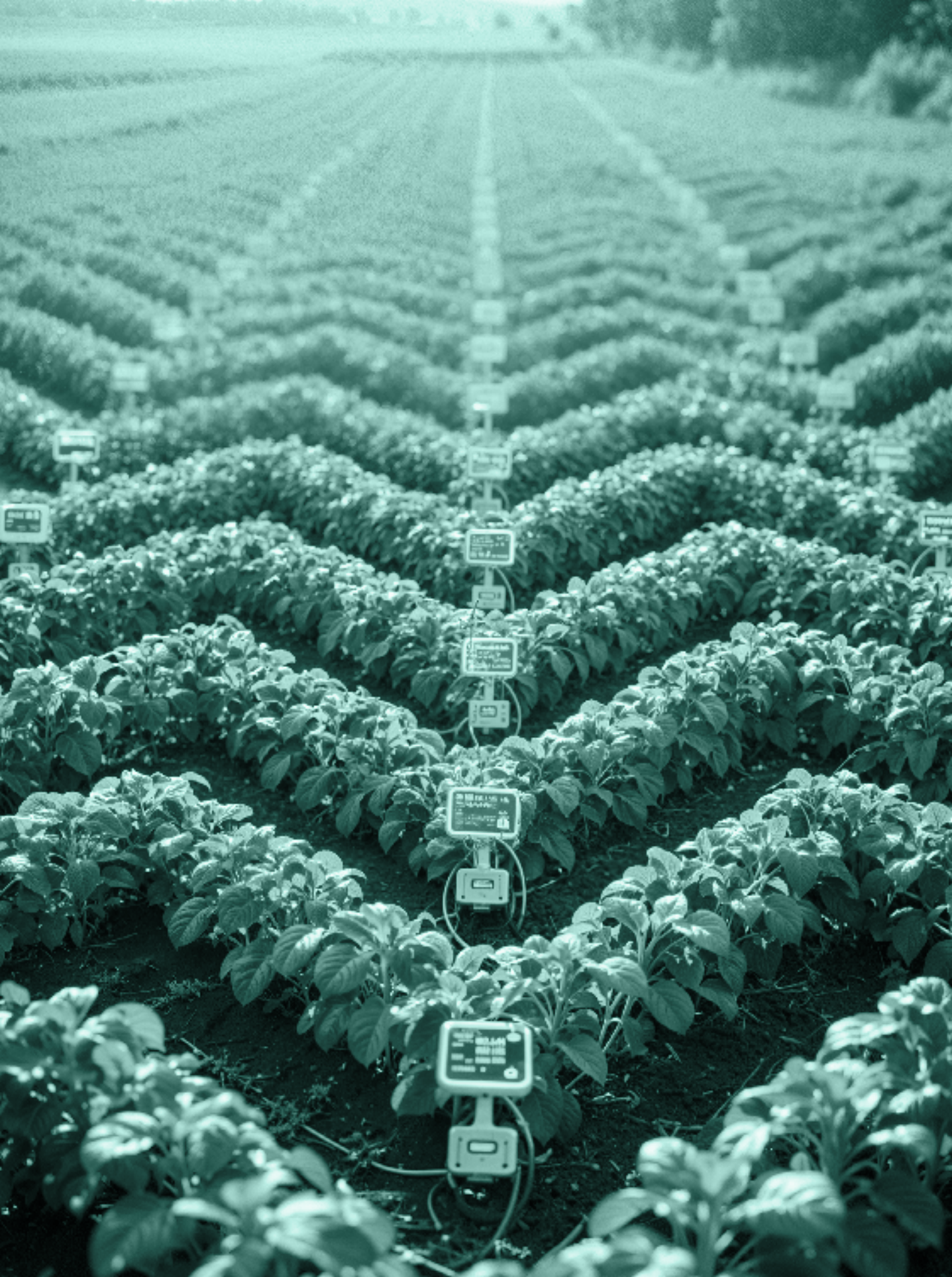
³³ “Iberdrola y Multiverse Computing

anuncian el éxito de un proyecto piloto para optimizar la instalación de baterías en la red eléctrica”, Iberdrola, nota de prensa, 12 de julio de 2024

³⁴ quantumcomputingreport.com/bullnet-capital-leads-investment-round-in-quantum-inspired-software-startup-inspiration-q/

06 La biotecnología en alimentación como sistema de defensa





Introducción

La población humana se ha duplicado en los últimos 50 años, de 4.000 millones de personas a 8.000. De seguir la tendencia, los modelos poblacionales indican que para 2060, es probable que la población alcance los 10.000 millones. Este aumento, sumado a las incertidumbres que provienen del cambio climático, el acceso a agua potable y el deterioro del medio ambiente, generan una gran inseguridad en el acceso a alimentos en varias regiones y países del mundo. Por ello, la agricultura del siglo XXI requiere de una actualización que culmine con un acceso a alimentos seguros y sostenibles.

En este clima enrarecido, la bioingeniería y la biotecnología ofrecen posibles soluciones a muchos de los problemas actuales. Desde la modificación genética de organismos para que sean más resilientes a las condiciones adversas, hasta su mejora en las propiedades nutricionales y organolépticas. En la actualidad, modificar un organismo es más sencillo y seguro que nunca, por lo que un número creciente de grupos de investigación se han centrado en lograr variedades de plantas que permitan prevenir y soportar los retos del futuro.

Pero además de la agricultura, cada vez se están explorando un mayor número de fuentes de proteínas alternativas más amables con el medio ambiente. En los laboratorios actuales se cultivan algas, hongos y levaduras que ofrecen unos valores nutricionales similares a la carne y con un potencial escalable para alimentar a miles de personas. Con estas propiedades sobre la mesa, prometen garantizar el consumo de proteínas de calidad a la población. Aunque entre ellas destaca el cultivo de carne de laboratorio, hecho con células iguales a las que contiene el ganado vacuno o porcino, pero que no se desarrollan en un animal, sino en un biorreactor. Esta alternativa, más ética y sostenible, es una idea interesante que, junto con las anteriores, permitiría reducir el consumo de recursos y la huella de carbono de la humanidad para garantizar un futuro sostenible.

La próxima fase de la evolución de los bionutrientes

POR DENTRO

Los humanos hemos modificado el genoma de plantas y animales de forma artificial al ir seleccionando sus rasgos más atractivos. Frutas cada vez más grandes y sabrosas, hortalizas con un mayor rendimiento, o animales más dóciles son el resultado de miles de años de la mano del ser humano amoldando la naturaleza a sus necesidades. Estas modificaciones eran lentas, pero poco a poco fueron dando lugar a la enorme variedad y clases de frutas, verduras y razas de los distintos animales que podemos encontrar en la actualidad.

Con el descubrimiento de los compuestos mutágenos y de la radiación, a principios del siglo XX, los investigadores de la época comprendieron que ya no hacía falta esperar a que la naturaleza generara las variaciones en las plantas de forma azarosa. Podían acelerar el proceso mediante procesos químicos y físicos y dar origen a miles de plantas distintas. Tras ello, comenzaba la laboriosa tarea de escoger aquellas variedades que eran más adecuadas para el cultivo.

Sin embargo, a finales del siglo XX, con un conocimiento cada vez más extenso de la naturaleza, de la fisiología vegetal y de la genética, se incrementó notablemente la capacidad de dirigir las modificaciones y se produjo un cambio de paradigma en nuestra comprensión de la agricultura. En el Gráfico 1 se repasan los desafíos para habilitar la investigación y la innovación en biología sintética.

Ahora ya no hacía falta buscar variaciones ocurridas de forma natural en las plantas, sino que se pueden generar estas modificaciones de forma artificial, suprimiendo o activando genes para crear organismos modificados ge-

néticamente (OMG). Dentro de los OMG hay un tipo concreto de modificaciones que se denominan transgénicos, los cuales se crean tomando un gen de un organismo e introduciéndolo introducen en otro. De este modo, se pueden incluir ciertas características ventajosas que pueden darle una nueva propiedad al alimento que no se habría podido conseguir de forma natural. El caso más conocido de organismo transgénico de las últimas décadas es el denominado Golden rice o arroz dorado, una variedad de arroz (*Oryza sativa*) que fue creada para que sus granos produjeran el precursor de la vitamina A, beta-caroteno. Para ello, se diseñó mediante ingeniería genética la cascada de reacciones que producen esta sustancia y se introdujo en la planta del arroz, cuyos granos mostraban un color amarillento.

La patente para su producción está liberada para situaciones humanitarias, ya que la idea inicial era combatir la deficiencia de la vitamina A. Esta condición, común en regiones pobres con acceso muy limitado a una comida variada, puede dar lugar a trastornos entre los que destaca la ceguera. Sin embargo, la acogida no fue buena por parte de agricultores y asociaciones, que quemaron cultivos piloto y provocaron un enorme retraso en su implementación. Entre los argumentos que enarbolan se encuentra que el arroz no contiene una cantidad suficiente de beta-caroteno como para que sea eficaz a la hora de combatir la ceguera por deficiencia de vitamina A y que éste se degrada con rapidez. Además, temen que se perderán variedades autóctonas y tradicionales por estos cultivos, ya que podrían cruzarse y transmitir su ADN en el medio. Por ello, abogan por otros métodos como la introducción de dietas más equilibradas. En el otro extremo, los científicos sostienen que el arroz dorado no trata de ser un remedio milagroso ni único, sino una herramienta útil para afrontar el problema desde varios ángulos.

Otros cultivos también han tratado de solucionar problemas nutricionales de ciertas poblaciones con difícil acceso a una variedad de alimentos adecuada. Así se han creado otras variedades de arroz modificado genéticamente, como el biofortificado con zinc y hierro¹, o el arroz púrpura, suplementado con antocianinas, (compuestos antioxidantes), que tienen el potencial de prevenir carencias y enfermedades como el cáncer². Ninguno de estos se ha llegado a comercializar hasta la fecha, aunque ello no ha impedido que hayan ido apareciendo más variedades, tanto de arroz, como de otras plantas, hongos y animales.

En la actualidad, las herramientas de edición genética derivadas de CRISPR han permitido la democratización de la ingeniería genética. Estas herramientas, descubiertas por el investigador alicantino Francis Mojica en arqueas halladas en Santa Pola fueron adaptadas para su uso en eucariotas por las ganadoras del Premio Nobel de Química de 2020 Jennifer A. Doudna y Emmanuelle Charpentier. El descubrimiento supuso un antes y un después en la modificación genética de organismos, ya que empleando CRISPR los costes necesarios para modificar un genoma se redujeron notablemente. Eso abrió las puertas a cientos de laboratorios en todo el mundo a emplear esta tecnología.

El desarrollo de terapias avanzadas y medicina de precisión es una oportunidad única para transformar hospitales y centros públicos en verdaderos motores de innovación, capaces de generar empleo cualificado y de impulsar un nuevo tejido industrial El impulso a terapias avanzadas y medicina de precisión puede convertir hospitales y centros públicos en fábricas de innovación, con empleo cualificado y tejido industrial.

Si España se suma con decisión a la nueva agenda europea de biotecnología, podrá liderar cadenas de valor clave, desde desde la biología sintética hasta la producción industrial basada en procesos biológicos sostenibles. La bioingeniería española cuenta con ecosistemas regionales muy activos —con centros punteros en bioprocesos, terapias avanzadas y biotecnología industrial—. El reto ya no es generar conocimiento, sino dotarles de la capacidad para escalar, producir y competir globalmente.

|
Javier García

Gracias al CRISPR se han podido desarrollar plantas más resistentes a sequías o inundaciones, variedades que requieren menor cantidad de fertilizantes y pesticidas, o alimentos que tardan más tiempo en perder propiedades organolépticas una vez recogidos. Y no sólo plantas, sino que también hongos, levaduras e incluso animales pueden beneficiarse de estas herramientas para ser más eficientes, sabrosos, o incluirles alguna propiedad con la que garantizar la seguridad alimentaria.

Además, el CRISPR presenta una ventaja con respecto a los métodos tradicionales de modificación genética: no deja rastro en el organismo. Es decir, no se puede distinguir una modificación genética realizada con CRISPR de una variedad de planta conseguida por selección artificial. Por ello, las regulaciones de este tipo de alimentos pueden ser mucho más sencillas que para los transgénicos.

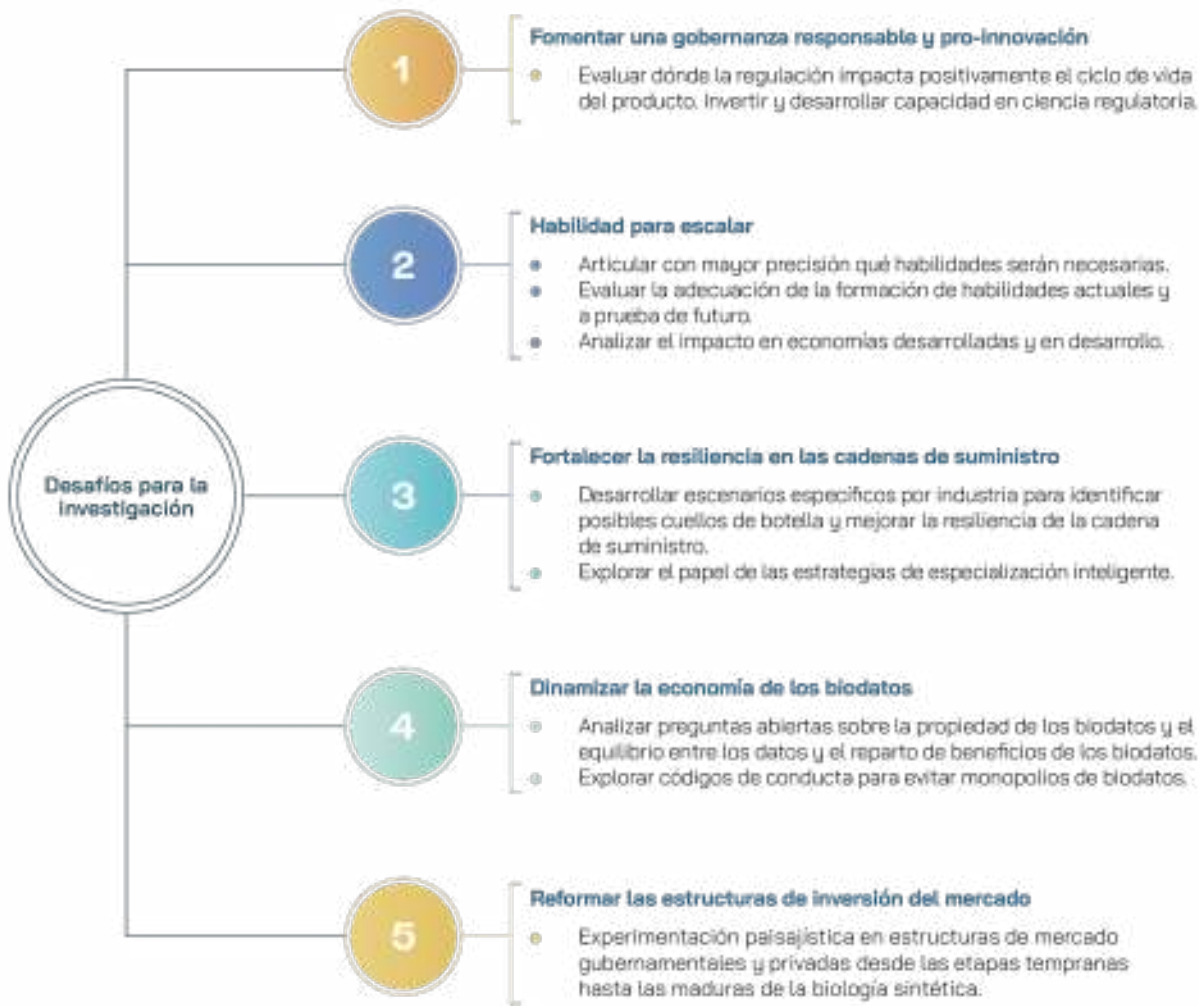
Como ejemplo de esta celeridad en las regulaciones tenemos el caso de los champiñones creados por el científico Yinong Yang en 2016. Yang utilizó CRISPR/Cas9 para desactivar el gen de la polifenol oxidasa, una enzima que provoca que el champiñón se vuelva marrón ante pequeños golpes o estreses. Debido a la técnica utilizada, los champiñones no se trataron como transgénicos (ya que no se había introducido ningún gen) y apenas cinco meses tras su creación ya estaban en el mercado. Gracias a estos champiñones no se desperdicia tanto alimento, ya que aumenta su vida útil³. Por hacernos una idea de la rapidez burocrática, el salmón genéticamente modificado por la empresa AquAdvantage, que incluía un gen de crecimiento más rápido, tardó 20 años en superar las regulaciones de la FDA⁴.

Como se puede ver en el Gráfico 2 la bioingeniería está cambiando nuestra relación con las plantas de una forma radical. Tras 10 años de CRISPR, se han desarrollado y comercializado un gran número de variedades de vegetales para consumo humano y animal. Algunos ejemplos son:

1. Plátano que no oscurece. El Departamento de Agricultura y Oficina de Industria Vegetal de Filipinas ha autorizado la creación de plantaciones de plátanos modificados para enlentecer su oscurecimiento una vez recogido. La empre-



Cinco desafíos para habilitar la investigación y la innovación en biología sintética



Fuente: OCDE

- sa que comercializa el plátano, Tropic Bioscience, en colaboración con Syngenta, espera su comercialización en los próximos años.
2. Sorgo resistente a la Striga. El sorgo es un cereal omnipresente en África. Se emplea tanto para consumo humano como para consumo animal. Pero su cultivo se puede ver afectado por una planta parasítica del género Striga que la debilita y reduce su rendimiento. Por ello, en Kenia se han generado variedades de sorgo resistente que actualmente están siendo probadas en campos controlados.
 3. Judía de careta para cultivo mecanizado. Uno de los problemas de las judías de careta (*Vigna unguiculata*) es que la planta desarrolla varias cosechas de forma simultánea en cada planta. Esto dificulta el cosechado automatizado ya que las máquinas recolectoras no pueden distinguir las vainas maduras como las inmaduras. Y su separación posterior es muy compleja. Viendo este problema, la compañía BetterSeeds ha desarrollado una variedad que únicamente genera una cosecha.
 4. Cerdos resistentes a enfermedades: En materia animal, la biotecnológica inglesa Genus ha desarrollado una raza porcina editada por CRISPR resistente al virus del síndrome respiratorio y reproductivo porcino. Estos animales no expresan en sus células la proteína que permite entrar al virus y, por tanto, no pueden infectarse ni desarrollar la enfermedad.

Existen muchos más ejemplos, como aguacates que no se oxidan, trigo sin gluten, tomates con vitamina D o patatas que no generan acrilamida aunque se guarden en frío, perfectas para freír sin que se produzcan carcinógenos, así como otras variedades resistentes que, en un futuro, podrían estar en los supermercados.

Pero no todo son buenas noticias. Los consumidores suelen repudiar este tipo de alimentos porque no los consideran naturales o porque creen que pueden ser perjudiciales para la salud. Los agricultores, por su parte, temen que se pierdan variedades tradicionales debido al cultivo de OMGs, y que la compraventa de semillas tienda a un oligopolio en el que las grandes biotecnológicas obtengan más beneficios y empobrezcan el sector. Además, el activismo en contra de los transgénicos ha realizado acciones muy contundentes (quema de campos pilotos, sabotaje de instalaciones...) por lo que se han llegado a abandonar varios proyectos de mejora vegetal.

El desarrollo de tecnologías para la aplicación de microorganismos es otro de los grandes agentes de cambio en el mundo de la nutrición. Los primeros indicios de la utilización de microorganismos datan de hace 13.000 años en un yacimiento arqueológico de la cueva de Haifa, en Israel. En esta cueva, asociada a la cultura natufiense, además de cerca de 30 restos de individuos enterrados sobre camas de flores, los arqueólogos encontraron una serie de morteros tallados en piedra con un contenido muy interesante. Adheridos a sus paredes, los recipientes contenían restos de almidón y fitolitos, parti-

culas vegetales microscópicas que concuerdan con la transformación de cereales en una bebida alcohólica.

La producción de alcohol supuso un antes y un después en la seguridad alimentaria, ya que el bajo contenido alcohólico destruía los patógenos presentes en las aguas. Posteriormente, el desarrollo del yogur y los quesos permitió que un alimento de alto valor nutricional, como son los lácteos, pudiese tener su lugar en la gastronomía, y el desarrollo del vinagre proporcionó un nuevo método de conservación. Estos alimentos se desarrollaron sin una comprensión de los mecanismos biológicos, y no fue hasta el siglo XIX, cuando científicos de renombre como Louis Pasteur identificaron los microorganismos implicados.

En un cultivo, cada bacteria o levadura actúa como una pequeña fábrica en la que se le ofrece un recurso y esta crea un producto de interés, como etanol, ácido láctico, o ácido acético. Sin embargo, conociendo exactamente los mecanismos moleculares y genéticos que dirigen estas conversiones, la biotecnología ha podido desarrollar un enorme abanico de microorganismos que pueden generar productos de alto valor añadido.

El proceso implica técnicas que ya hemos visto en este capítulo, pero en este caso, están completamente enfocadas a crear un producto de la forma más eficiente posible, sin tener que generar un organismo completo. La denominada *fermentación de precisión* permite generar enormes cantidades de proteínas y compuestos como colágeno, caseína, y un larguísimo etcétera, idénticos a los que producen los animales, pero todo dentro de un biorreactor. Así se producen proteínas como la albúmina, presente en el huevo, enzimas para panadería, lactasas que descomponen la lactosa en alimentos y los vuelven aptos para personas intolerantes, o mioglobina de origen bacteriana, sustituta de la que se encuentra en la carne.

El método presenta ciertas ventajas, como que la producción tiene un control mucho mayor y, por tanto, es más estable, o que la huella de carbono suele ser mucho menor. Además, también reduce los tiempos de espera para la obtención del producto y permite cambiar dicha producción según los procesos que sean de máximo interés. Sin embargo, también están sujetos a distintos riesgos, como posibles contaminaciones, que

significan la pérdida total del biorreactor, o la dependencia total del acceso estable a la electricidad y a los sistemas de control.

Respecto al marco normativo, varía dependiendo de la región, pero en general exige una exhaustiva evaluación de seguridad para garantizar que el producto sea seguro tanto para los consumidores como para el medio ambiente. En la Unión Europea, una normativa específica establece los criterios para evaluar la seguridad de los ingredientes alimentarios derivados de microorganismos modificados genéticamente. Esto incluye garantizar que las cepas de producción no sean detectables en los productos alimenticios finales.

Las proteínas unicelulares (PUC) son una masa de células secas que también se puede denominar bioproteína, proteína microbiana o biomasa. Para producir PUC se emplean microorganismos que crecen también en biorreactores, como algas, levaduras, hongos y bacterias, pero cuya función es únicamente la producción del mayor número de proteínas posible. Normalmente los hongos y las bacterias son los microorganismos de los que se obtiene un mayor rendimiento por la rapidez de su crecimiento. Las PUC también contienen otras sustancias, como carbohidratos, vitaminas y minerales, y se puede modificar su producción para favorecer la producción de ciertos aminoácidos esenciales como la lisina, metionina o treonina.

Incluyendo PUC como ingrediente a ciertos alimentos (bien añadido o como sustitutivo a otros ingredientes) se pueden mejorar sus propiedades nutricionales y realizar aportes proteicos extra que permitan garantizar una alimentación equilibrada. Por ello, se está estudiando su inclusión en piensos y en preparaciones pensadas para consumo humano⁵.

Otra ventaja es que la producción de PUC normalmente emplea residuos agrícolas. Aunque existe debate acerca de si esto se trata de una ventaja ya que, en cierto modo, también puede significar que su producción hereda la huella ecológica, hídrica y de carbono de la agricultura tradicional. Sin embargo, existen métodos con los que producir los microorganismos de forma independiente o mediante el reciclaje de otros residuos con los que volverlos más eficientes. De todos modos, la eficiencia de la agricultura celular es, por lo general, mucho mayor que la tradicional. Esto se muestra en estudios realizados por varios investigadores que han demostrado que la producción de proteína microbiana impulsada por energía fotovoltaica podría utilizar 10 veces menos tierra para una cantidad equivalente de proteína en comparación con el cultivo de soja⁶.

Sin embargo, además de la oportunidad, también emergen nuevos riesgos que hay que tener en cuenta ya que pueden poner en riesgo la salud humana. Pueden ser de dos tipos: contaminantes en el cultivo, e impurezas y riesgos específicos de las rutas metabólicas que se emplean. Por ello, se ha de realizar un control exhaustivo de todos los productos y subproductos que crean los microorganismos. En todos los casos, la innovación en la produc-

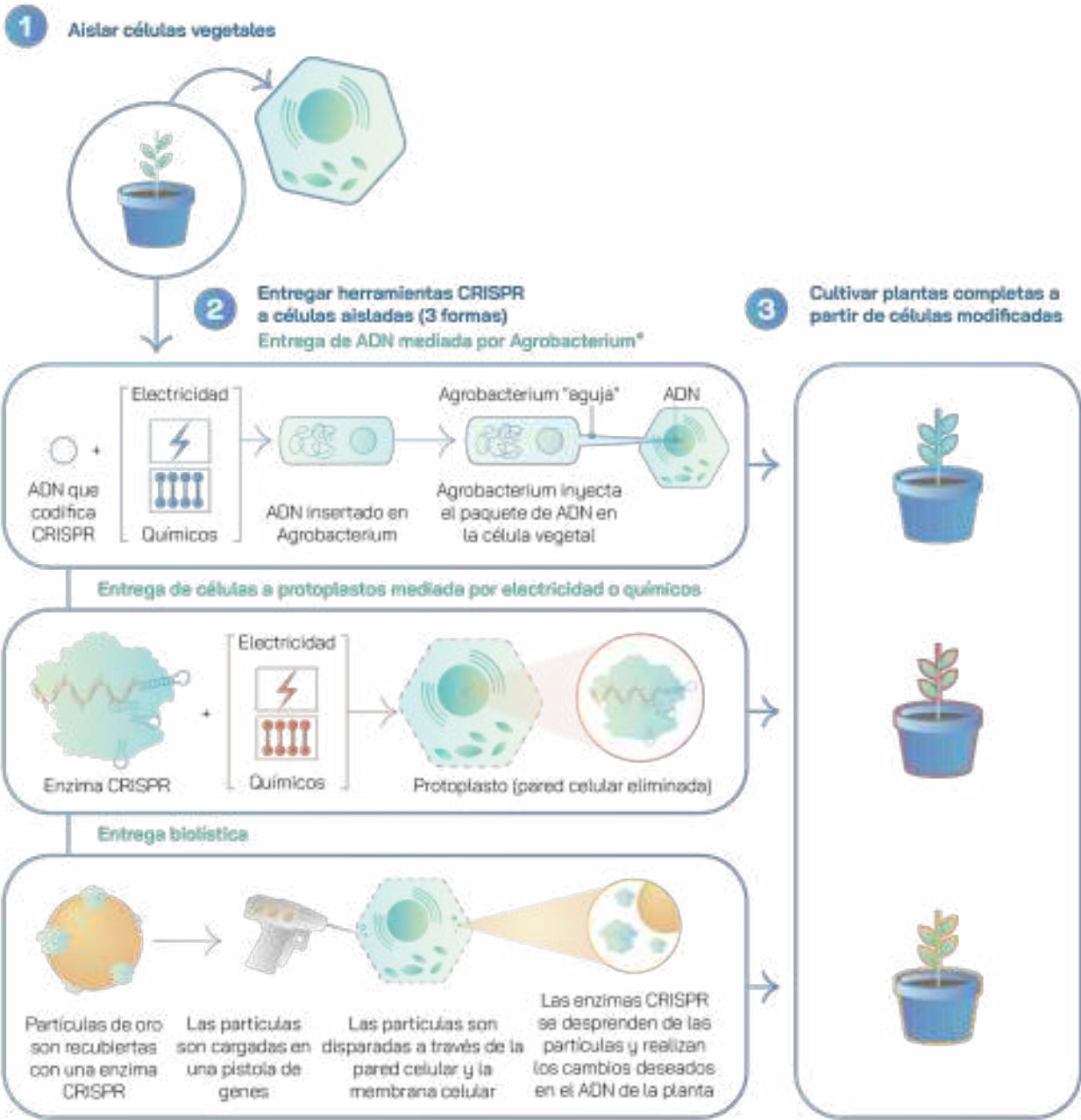
ción de alimentos debe ir acompañada de una evaluación exhaustiva de la seguridad alimentaria⁷.

En el mundo de los biorreactores hay un tipo muy especial que, en vez de bacterias o levaduras, cultiva células eucariotas como las que conforman los mamíferos. En ese caso, el producto son las propias células, que después se amalgaman en la llamada «carne de laboratorio». Es decir, se trata de las mismas células que conforman la carne, pero que no proceden de un animal vivo. Uno de los proyectos más interesantes acerca de la carne de laboratorio culminó su primera fase en agosto de 2013, cuando se presentó por primera vez una hamburguesa de carne de vacuno enteramente cultivada mediante este método. La hazaña tuvo lugar en la Universidad de Maastricht por un equipo dirigido por el investigador Mark Post, y en aquel momento se vendió como “la hamburguesa del cuarto de millón de euros” puesto que fue aproximadamente el precio que costó desarrollarla.

Para crear la carne, los investigadores introdujeron células madre de vacuno en un biorreactor. Estas células son capaces de reproducirse y transformarse en las células musculares, adiposas y tejido conectivo que conforma una hamburguesa normal. Una vez los investigadores tienen un número suficiente de células, las aplastan y las unen en una masa similar a la carne picada que conforma la hamburguesa. 10 años después de la hazaña, existen más de 60 empresas dedicadas a la producción de carne de laboratorio que tienen un mayor o menor éxito.⁸

Las carnes cultivadas en laboratorio reproducen cortes enteros como filetes, chuletas o sashimi. Sus propiedades organolépticas y nutricionales son razonablemente cercanas al producto original, aunque su adopción está todavía en sus primeras fases, y deben superar barreras regulatorias y de coste. Además, aunque se vendan como «carne 100% libre de animales» lo cierto es que durante su cultivo generalmente se ha de emplear una sustancia denominada «suero fetal bovino» que se extrae de la sangre de fetos bovinos durante su sacrificio. El cóctel de hormonas presente en esta mezcla garantiza que las células del biorreactor se dividan. En la actualidad, se están estudiando métodos para la sustitución de esta sustancia por otras de origen químico o vegetal.

Así funciona la bioingeniería para combatir enfermedades en plantas



Fuente: Innovative Genomics Institute | CRISPRreflects



Por último, diversas culturas de todo el mundo consumen insectos como parte de su dieta. Debido a su fisonomía, los insectos tienen una gran cantidad de proteínas en relación a su peso, lo que los convierte en alimentos muy interesantes a la hora de incluirlos en la alimentación del futuro. Sin embargo, la población, al menos en España, parece reticente a aceptar su presencia en los supermercados a pesar de sus muchos beneficios.

Entre estos beneficios destaca su cría, ya que producir una granja de insectos es muy eficiente tanto en lo que se refiere al espacio necesario como al uso de recursos hídricos y alimento. Otra ventaja es que, debido a su metabolismo, los insectos pueden convertir el alimento en biomasa de forma eficiente, lo que se traduce en una elevada producción. Además, de ellos se puede obtener una gran cantidad de productos, tanto para ganadería, como para consumo humano.

Aunque las nuevas formas de producción de alimento pueden resultar chocantes, ya que difieren en gran medida con lo que se entiende por la agricultura y la ganadería, son una evolución interesante a la hora de lograr un futuro más ético y sostenible. Estas tecnologías permiten crear productos de alta calidad en menor espacio y tiempo, en ocasiones empleando residuos como su fuente de alimento. Estos sistemas también garantizan un mayor control en la producción y, por ello, pueden ser claves para asegurar la seguridad alimentaria.

La confluencia de edición génica avanzada, los biorreactores, y los insectos, augura un futuro con unos perfiles nutricionales óptimos para garantizar que los alimentos vayan de la mano con la salud. Para lograr este futuro, será necesario que tanto científicos la industria y las agencias reguladoras también remen en la misma dirección para escalar estas soluciones y alcanzar un sistema alimentario resiliente ante un futuro que evoluciona hacia la incertidumbre.

Producir donde se consume y garantizar la cadena alimentaria

EN ACCIÓN

Los alimentos pueden usarse como arma militar y diplomática⁹. Las crisis recientes, el incremento de la incertidumbre en las cadenas de suministro y los episodios extremos asociados al cambio climático han demostrado que la garantía de alimentos se ha convertido en una cuestión geoestratégica clave. Se desperdicia hasta el 30% de la producción mundial de los principales cultivos básicos: trigo, arroz, maíz, papa y soja, y hasta el 70% de las pérdidas de rendimiento en los principales cultivos se deben a condiciones ambientales adversas. Y la dependencia de los productos de terceros países sigue siendo un factor condicionante de primer nivel. A mediados de 2025, Estados Unidos elevó su previsión de déficit comercial agrícola para el conjunto del año fiscal a 49.500 millones de dólares¹⁰. Europa se movía en enero de 2025 entre el superávit de 2.200 millones de euros en el comercio de alimentos y bebidas con terceros países y el déficit de 2.600 millones en materias primas, muchas de ellas vinculadas con la alimentación¹¹. Fortalecer la bioindustria constituye, en ambos casos, una de las vías para asegurar la independencia alimentaria.

En respuesta al crecimiento de la población mundial y a la demanda acelerada de alimentos y productos agrícolas, el campo ha conseguido incrementar su producción acentuando las estrategias de intensificación y adoptando medidas para diversificarse y globalizarse. El sector ha introducido prácticas de agricultura regenerativa y consigue extraer cada vez más provecho de los datos y las aplicaciones digitales para consolidar la agricultura de precisión. Pero no es suficiente.

Los productos de la nueva bioeconomía emergen como una alternativa fundamental en la carrera para garantizar la seguridad del suministro. Pueden contribuir a cubrir esta necesidad, introduciendo más flexibilidad y una mayor variedad de herramientas para el campo¹². La ingeniería de plantas, células de mamíferos y microorganismos abre la puerta a nuevos alimentos e ingredientes producidos de forma sostenible, respetuosa con el medio ambiente y sin animales. Junto a ellas, tecnologías cada vez más maduras, como la edición genómica y la producción de alimentos basada en microbios ocupan un puesto destacado ya en la exploración de sustitutos de la carne y los lácteos¹³. Se investiga el uso de la agricultura celular, es decir, la producción de alimentos mediante cultivos celulares, para obtener ingredientes nuevos y funcionales adaptados a las necesidades de los lactantes¹⁴ que no pueden ser amamantados, por ejemplo, pocos objetivos pueden ser más fundamentales y estratégicos para un país que ese. Por eso, los organismos públicos están cada vez más dispuestos a facilitar las cosas: el primer producto cárnico cultivado (pollo cultivado con células) fue aprobado en 2020 por la Agencia de Alimentos de Singapur y el aceite *Calyno* de Calyxt abrió el camino para el suministro de los productos de plantas con genoma editado en Estados Unidos.

La biotecnología y las tecnologías de mejora humana (BHE) no son en absoluto nuevas, pero sí el ritmo sin precedentes de la innovación en torno a ellas, impulsada por la convergencia con la inteligencia artificial (IA). Como se puede observar en el Gráfico 3, la inversión en este ámbito corrobora la percepción de potencial de crecimiento. La biorrevolución emergente transformará nuestra sociedad, desde la atención médica y la salud pública hasta la fabricación de procesos industriales, pasando por la seguridad y la defensa¹⁵. Esa es precisamente la visión de la OTAN, que imagina un mundo en el que la biofabricación y la biología sintética ofrezcan alternativas ecológicas a la dependencia de terceros países en la cadena de suministro. En febrero de 2024, los ministros de defensa aliados aprobaron la Estrategia BHE de la OTAN¹⁶, el primer acuerdo internacional que rige la biotecnología emergente en defensa y seguridad. Se comprometieron a impulsar el desarrollo y el uso de estas tecnologías con fines defensivos y pacíficos, y como una vía de protección frente a los riesgos de proliferación.

Un sistema alimentario robusto, seguro y adaptable será fundamental para la seguridad civil, la estabilidad global y los intereses estratégicos de las sociedades a largo plazo. Las biotecnologías para la producción de alimentos contribuirán a reforzar la resiliencia de la cadena de suministro y reducir los riesgos de bioterrorismo agrícola¹⁷, que amenaza a las prácticas tradicionales, ya sea mediante ataques a infraestructuras de producción o mediante la introducción de patógenos animales. Tras el anuncio del Departamento de Defensa (DoD) norteamericano de que invertirá 1.000 millones de dólares en biofabricación durante los próximos años, el Good Food Institute (GFI) le recomendó que priorizara la producción de alimentos basada en biotecnología e invirtiera en métodos seguros, eficientes y diversificados.



Frente a las vulnerabilidades de la cadena de suministro, la fermentación, la fabricación de alimentos a base de plantas y la agricultura celular requieren menos insumos y eslabones. Con más opciones alimenticias se reducirá el riesgo de conflictos futuros relacionados con los alimentos y se abrirá la vía para impulsar la producción local, ya sea en puntos desplegados sobre el terreno allí donde se precise, ya sea en el mar e incluso en el espacio. La ubicación de las instalaciones de producción será adaptable y no dependerá estrictamente de factores ambientales. Con ese enfoque de “diseñar en cualquier lugar, crecer en cualquier lugar”, la biofabricación distribuida permitirá a las regiones capitalizar sus fortalezas específicas, promover la autosuficiencia y reducir el desperdicio. Esto no solo impulsará el desarrollo económico de comunidades rurales, sino que permitirá una respuesta rápida y la producción de suministros durante emergencias o desastres naturales.

Para desarrollar ese nuevo modelo de suministro local, habrá que superar, no obstante, barreras técnicas, como la de replicar bioprocesos que actualmente se llevan a cabo en otros lugares y adaptarlos a las condiciones locales de clima y materias primas disponibles. También se requerirá la transición de instalaciones de propósito único a instalaciones capaces de ejecutar múltiples procesos de los que se obtenga una cartera de productos variada.

No se trata sólo de una cuestión geoestratégica, sino también económica, porque ampliar las opciones basadas en biotecnología podría ayudar a contrarrestar la creciente concentración del sector alimentario, y disminuir el impacto de posibles escaseces o interrupciones. Las proteínas alternativas, como las asociadas a la soja, los guisantes o las legumbres, por ejemplo, ofrecen soluciones sostenibles a la creciente demanda y permiten un uso más eficiente de los recursos terrestres y hídricos. Asimismo, la fabricación distribuida basada en biología sintética podrá aprovecharse para obtener productos que no requieren producción industrial, como el propano, la electricidad, el tratamiento de agua o la gestión de residuos.

Un informe de McKinsey¹⁸ de 2020 analizó una cartera de alrededor de 400 aplicaciones de biología sintética. Según sus estimaciones, podrían tener un impacto económico directo de entre dos y cuatro billones de dólares a nivel mundial por año a lo largo de los próximos 10 a 20 años. Para ello, será necesario cambiar su actual modelo de archipiélago y focos de investigación aislados, por un enfoque más conectado y coordinado. Uno de los impulsores clave de ese proceso debería ser la disponibilidad de financiación, aunque la búsqueda de rentabilidad a corto plazo por parte del capital de riesgo es a menudo incompatible con los plazos de la biología sintética, que requieren años para alcanzar la escala y ser financieramente viable. En 2021, tras la pandemia de COVID-19, la inversión global de capital de riesgo en biología sintética alcanzó un máximo de más de 20.000 millones de dólares; pero en 2023, esa cifra había descendido a poco más de 5.000 millones de dólares. Bancos y fondos de pensiones están empezando a estudiar cómo invertir en biología sintética, y en el Congreso de Estados Unidos está en estudio

una legislación que propone “BioBonds” (bonos gubernamentales para investigación biomédica)¹⁹.

La producción bioindustrial se ha convertido ya en un sector crucial para la bioeconomía estadounidense, con un peso superior al 5% del PIB y un valor de más de 950.000 millones de dólares, por encima del sector de la construcción y equivalente al sector TIC²⁰. Para mantener y ampliar el liderazgo en biotecnología y bio-fabricación, Estados Unidos ha tomado medidas como la reciente Orden Ejecutiva para el Impulso de la Bioeconomía²¹ y las disposiciones incluidas en la Ley de CHIPS y Ciencia, así como de la Ley de Reducción de la Inflación.

El país norteamericano ha sido históricamente líder en innovación, investigación y regulación en biotecnología alimentaria, tiene más patentes, empresas y ganadores del Premio Nobel en biotecnología que cualquier otro país, pero mantener y reforzar esa posición requerirá un aumento de la inversión pública²². Países como China, Israel y Singapur están priorizando crecientemente estas inversiones. Un dato significativo podría ser que, en 2022, los gobiernos invirtieron globalmente, 635 millones de dólares en tecnologías de proteínas alternativas a nivel mundial, mientras que la inversión acumulada de Estados Unidos solo alcanzó 45 millones. Para adaptarse a los nuevos tiempos, la National Security Commission on Emerging Biotechnology (NSCEB) del Senado de EEUU ha sugerido ya la creación de una Oficina Nacional de Coordinación de Biotecnología, una inversión de al menos 15.000 millones de dólares los próximos cinco años, una optimización del marco regulatorio y ha pedido que se lancen señales más claras al mercado, especialmente en la intersección de la IA y la biotecnología.

El presidente del Partido Comunista Chino (PCCh), Xi Jinping, ha identificado la biotecnología como un sector crítico en la apuesta de China por convertirse en una superpotencia científica mundial. Su estrategia Fusión Militar-Civil facilita la transferencia directa de datos y tecnologías de vanguardia al Ejército Popular de Liberación (EPL), y la biotecnología es fundamental en este sentido. Para respaldar sus ambiciones biotecnológicas, China ha construido un marco legal y regulatorio integral que garantiza el control total sobre la gestión de los recursos genéticos y biológicos. La Ley de Bioseguridad de 2020 permite un control estricto de sec-

tores críticos relacionados con la biotecnología y su alineación estratégica con las prioridades nacionales. En 2017, el FBI advirtió de que China había obtenido un acceso significativo a datos genómicos y muestras biológicas estadounidenses mediante colaboraciones de investigación, inversiones, fusiones y adquisiciones²³. La Academia Nacional de Ciencias de EEUU se hizo eco en 2022 de estas preocupaciones.

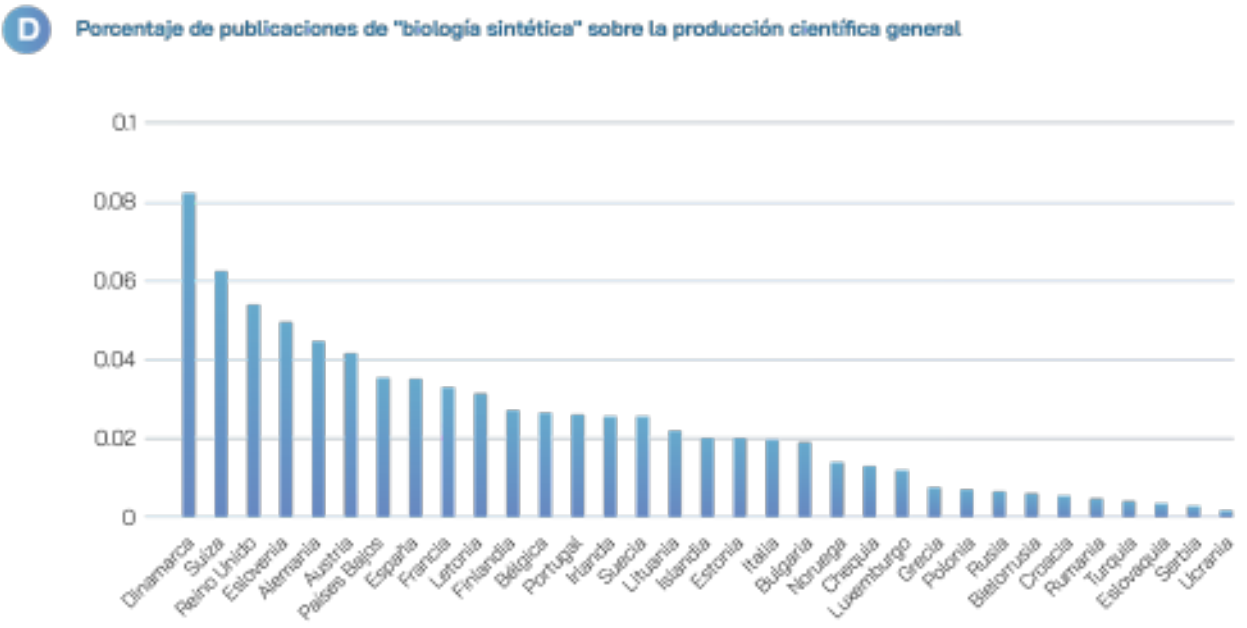
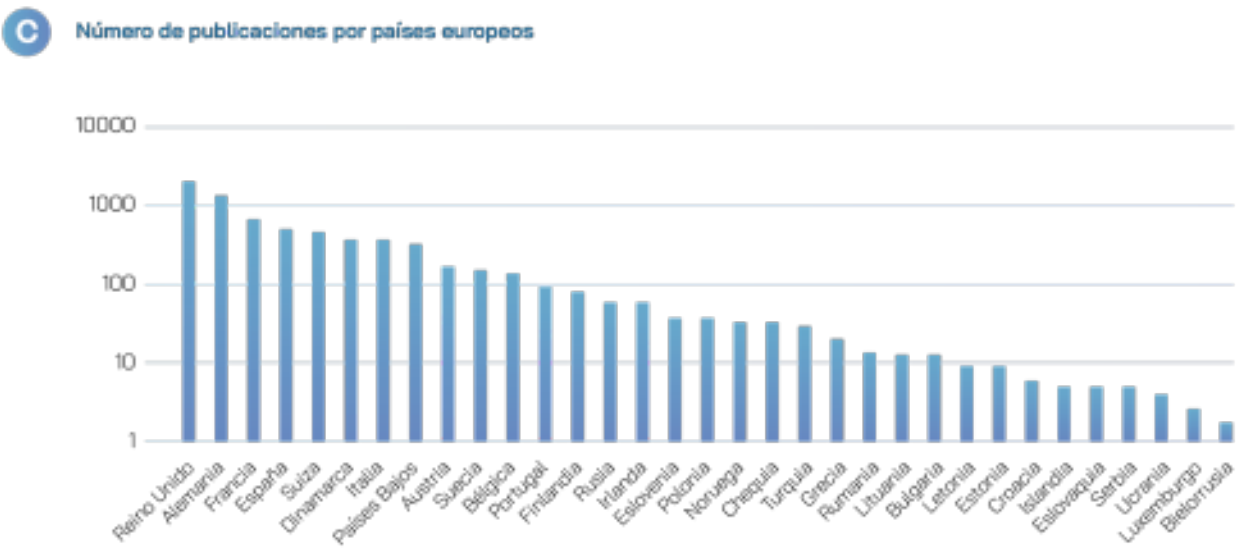
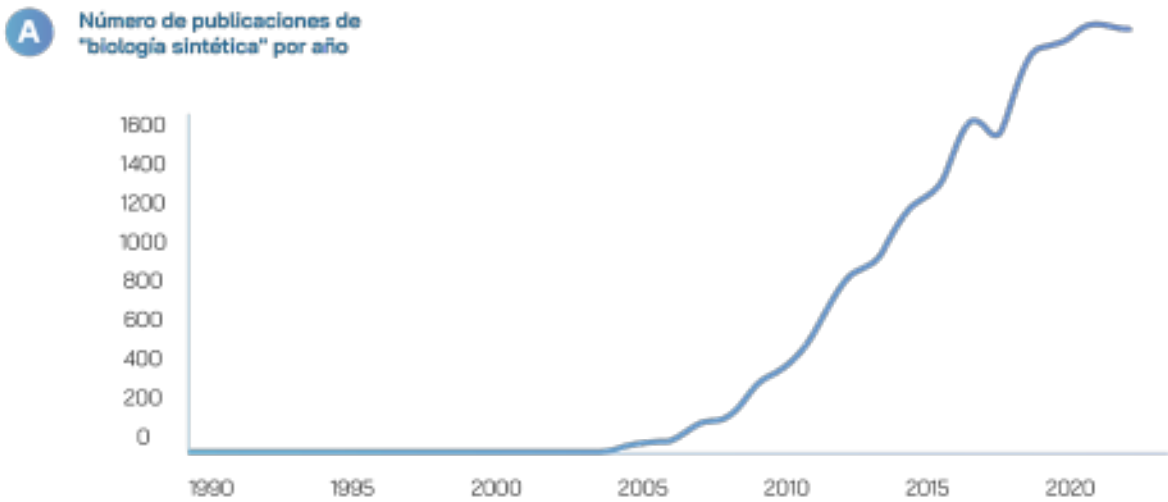
Según el CSIS norteamericano, el enfoque de China hacia la biotecnología es de carácter estratégico y vinculado a la defensa: si no es capaz de producir innovación en un determinado campo, adquiere la propiedad intelectual en el extranjero; a continuación, entidades estatales inyectan capital en empresas biotecnológicas nacionales para lanzar a las cadenas de suministro globales sus productos. Durante la última década, China ha incrementado drásticamente sus inversiones en biotecnología. La I+D biofarmacéutica se ha multiplicado por 400 y el valor de mercado de las empresas biotecnológicas se multiplicó por 100 entre 2016 y 2021, hasta el punto de alcanzar en la actualidad un valor colectivo de 300.000 millones de dólares. Preocupa que se extienda al ámbito de la alimentación la dependencia actual del 79% de las empresas farmacéuticas estadounidenses, que necesitan comprar a empresas chinas componentes esenciales para su fabricación.

El Gobierno de China apoya a su industria nacional biotecnológica mediante financiación, simplificación regulatoria y apoyo diplomático. La estrategia de Fusión Militar-Civil del PCCh pretende utilizar tropas impulsadas por biotecnología (lo llama “guerra inteligente”) para convertir al EPL en un “ejército de clase mundial” en 2049²⁴. Ha creado más de 100 parques de investigación biotecnológica y 17 clústeres industriales²⁵. El CEO del gigante tecnológico chino Baidu, Robin Li, fundó BioMap²⁶, una empresa de ciencias biológicas e IA con oficinas en Pekín, Suzhou, Hong Kong y Palo Alto que anunció el primer modelo fundacional de IA para ciencias biológicas capaz de alcanzar más de 100.000 millones de parámetros, el más grande del sector. En 2024, BioMap firmó un acuerdo con Hong Kong Investment Corporation, un fondo estatal, para lanzar un programa aceleración de innovación en bioinformática en Hong Kong.

En menor medida, podría decirse que la Unión Europea sigue los pasos de Estados Unidos. Su bioindustria se enfrenta a retos como los prolongados plazos de I+D necesarios para desarrollar el producto y el modelo de producción, los bajos márgenes de beneficio iniciales y la necesidad de escalar el volumen de producción rápidamente en medio de enormes barreras para ampliar la capacidad de fabricación²⁷. A las empresas les resulta todavía difícil intercambiar conocimiento, atraer inversores en las primeras etapas, así como acceder a infraestructura e instalaciones nacionales de bioproducción, biofabricación y bioprocesamiento a escala comercial.

Dentro de la UE, diferentes comités científicos han proporcionado evaluaciones y opiniones a la Comisión Europea²⁸, y organizaciones como EUSynBioS están mapeando todos los laboratorios, instituciones y organizaciones de

El estallido del interés por la biología sintética



Fuente: Biotechnology Notes

investigación en biología sintética. Pero el ecosistema es heterogéneo, disperso y está rezagado en número de patentes de “biología sintética” en comparación con EEUU, que a finales de la pasada década representaba casi la mitad del total aprobadas a nivel mundial, seguido de Japón. Los países europeos en conjunto sumaban aproximadamente una cuarta parte de las patentes mundiales, con Suiza en ascenso. Entre las empresas involucradas en la producción de bioproductos, tanto para fines industriales como alimentarios, se encuentran Biosyntia, AMSilk, Insempra, Mosa Meat, Meatable, Biocleave, EVbiotech o Gourmey.

El Gobierno de Reino Unido está siendo el más activo en Europa. Ha dotado 2.000 millones de libras para una estrategia que contempla la construcción de sistemas biológicos nuevos o rediseñados, como células o proteínas. Incluye, asimismo, una regulación propicia a la llegada al mercado de productos derivados de la biología de la ingeniería. El país ha proclamado su intención de ser líder mundial en innovación en biología basada en ingeniería responsable en 2030²⁹. Constituye, de hecho, una de sus cinco tecnologías críticas, al nivel de la inteligencia artificial, las telecomunicaciones futuras, los semiconductores y las tecnologías cuánticas³⁰.

Los enfoques de la biotecnología celular incluyen la biología sintética y la fermentación de precisión. En lo que se refiere a este último campo, las levaduras son uno de los espacios de innovación más dinámicos, impulsadas por los avances en ingeniería metabólica que han simplificado la transferencia desde la fuente natural a un huésped de producción. Se han desarrollado herramientas computacionales para facilitar esa transferencia; métodos para descubrir y modificar enzimas que pueden ser portadas desde plantas; bibliotecas de piezas de precisión; técnicas para ensamblar e integrar grandes vías multigénicas; y modelos de edición genómica para redirigir el flujo de carbono³¹.

La gama de aditivos alimentarios que se obtienen de la levadura diseñada está creciendo rápidamente, con productos emergentes que contienen vitamina E (DSM), stevia (Amyris y DSM) y suero de leche (Perfect Day). La transferencia mediante la fermentación facilita el acceso a sustancias químicas presentes en bajas cantidades en la naturaleza y sirve como plataforma para producir nue-

vas moléculas. La fermentación de biomasa permite producir alimentos ricos en proteínas, mientras que la fermentación de precisión genera proteínas específicas, enzimas, compuestos de sabor, vitaminas, pigmentos y grasas.

Son muchas las expectativas que se están levantando en torno a este campo tecnológico emergente. Se estima que, a partir de 2030, muchos productos podrían concebirse como sistemas con células diseñadas para trabajar juntas e integrarse en materiales no vivos o electrónica. La hamburguesa del futuro podría cultivarse utilizando consorcios de bacterias, hongos y células de ganado, similares al yogur o al queso, que trabajen juntas para construir estructuras táctiles y sintetizar moléculas que cumplan las funciones de nutrición, sabor y fragancia³².

Las tecnologías de IA han venido para dar una nueva escala a todo el proceso. Crean modelos predictivos para analizar el comportamiento y las interacciones de sistemas complejos, con la ventaja de que los algoritmos de aprendizaje automático (ML) pueden evaluar cada vez más las incertidumbres de sus predicciones y mejorar de ese modo el diseño de los experimentos³³. Varios laboratorios de biotecnología automatizada, como Emerald Cloud Lab, Recursion, Ginkgo BioWorks y OpenTrons están revolucionando la forma en que se lleva a cabo la investigación tradicional al ejecutar millones de experimentos automatizados a través de laboratorios en la nube, donde se generan cantidades masivas de datos.

El modelo admite el desarrollo de experimentos simultáneos y su integración en gemelos digitales de sistemas vivos para aumentar la productividad y reducir los costes. Toda esa actividad se puede controlar, además, de forma remota desde cualquier parte del mundo. La comunicación entre los laboratorios en la nube y la posibilidad de redirigir datos de una instalación a otra permite que centros de investigación con funciones especializadas puedan operar en conjunto dentro de una red.

No todo puede digitalizarse, sin embargo. Las biotecnologías requieren inevitablemente la creación de productos físicos, a diferencia de los análisis computacionales que se llevan a cabo en un entorno puramente electrónico, lo cual puede plantear desafíos significativos de recursos, datos, habilidades y conocimiento. Incluso así, la IA está demostrando una facilidad mejorada para la generación de hipótesis, la obtención de información, el diseño y la ejecución de experimentos digitales y en el mundo real, y la adaptación iterativa basada en los resultados.

Como sucede en otros ámbitos tecnológicos, como el de la salud, la limitación de los repositorios de datos abiertos disponibles está suponiendo, sin embargo, un obstáculo para el desarrollo de modelos biotecnológicos, al menos en Europa. Los criterios de anotación y clasificación no son homogéneos, los silos son abundantes, faltan metadatos y suelen producirse fenómenos de sobrerrepresentación de colectivos y de subrepresentación muchas diversi-

No podemos ignorar el papel transformador de la bioingeniería en la producción de nuevos nutrientes para asegurar la alimentación del futuro. Tecnologías como la fermentación de precisión, los cultivos celulares o las proteínas alternativas permiten diversificar nuestras fuentes de nutrientes, reforzar la resiliencia de las cadenas de suministro y reducir la presión sobre los ecosistemas. La industria alimentaria europea debe continuar innovando para garantizar la autonomía alimentaria en un contexto de crisis climática y tensiones globales, y así convertir la seguridad alimentaria en un vector de bienestar, sostenibilidad y competitividad.

|
Emma Fernández

dades genéticas dentro de las especies individuales, con los consiguientes sesgos. La experimentación automatizada y la curación de datos están ayudando a suplir este problema y aportan recursos de datos para la I+D biotecnológica³⁴. El siguiente paso será dar acceso a los laboratorios biológicos a recursos informáticos y datos como los que proporcionan los superordenadores, porque los conjuntos de datos requeridos para modelos predictivos crece rápidamente, a escalas de terabytes y petabytes, y acabarán sobrecargar los recursos existentes³⁵.

El Pacto Verde Europeo establece el objetivo político de lograr que al menos el 25% de las tierras agrícolas se dediquen a la agricultura ecológica en 2030. En 2022, ese porcentaje estaba en el 10,5%. Las investigaciones han demostrado que es poco probable que el objetivo del 25% de tierras orgánicas garantice una producción alimentaria sostenible en la UE si se excluye la biotecnología moderna³⁶. En Estados Unidos, la red BioCATALYST ha sido concebida para proporcionar recursos de IA y análisis de datos de alto rendimiento, así como para generar conjuntos de datos a gran escala y recursos experimentales. Se prevé que ayude a investigar en materiales de origen biológico y en sistemas vivos con nuevas funciones para aplicaciones de seguridad nacional y defensa.

Cuando se obtengan resultados fiables, llegará el momento de entidades como la Oficina de Tecnologías Biológicas (BTO)³⁷ de la DARPA de EEUU, cuya misión es facilitar la transición de investigaciones fundamentales en ámbitos como la biología, para responder a las necesidades urgentes y a largo plazo la defensa y la seguridad nacional. La BTO ha comunicado que estudiará, entre otras, las propuestas relacionadas con las amenazas emergentes al suministro mundial de alimentos y agua y con el desarrollo contramedidas que puedan implementarse a escala regional o mundial.

A medio plazo (5-10 años), la OCDE estima que una mayor reducción de los costes de síntesis de ADN podría acelerar y abaratar el proceso de investigación, que actualmente constituye un importante obstáculo para los innovadores en los países en desarrollo³⁸. A largo plazo (más de 10 años), las capacidades avanzadas en el diseño de nuevos genomas podrían permitir la construcción ascendente de células sintéticas e incluso de nuevos organismos sintéticos.

El auge de la biología sintética como tecnología de plataforma general podría tener un impacto tan drástico en la sociedad como la revolución digital. No obstante, es clave mantener siempre activas las posibles interrelaciones entre la seguridad alimentaria y la bioseguridad, que actúa como una salvaguardia de aquella, pese a que en muchas ocasiones acaba siendo la gran sacrificada³⁹. La definición de seguridad alimentaria citada con frecuencia por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) establece que la seguridad alimentaria es “el acceso físico y económico seguro a suficientes alimentos inocuos y nutritivos que satisfagan las necesidades dietéticas y las preferencias alimentarias para una vida activa y saludable para todas las personas, en todo momento”. La creciente adopción de especies no nativas que acompaña a la producción cada vez más distribuida, incluidos los organismos genéticamente modificados, puede exacerbar las presiones sobre la bioseguridad.

La iniciativa ‘Una Bioseguridad’⁴⁰ incluye una visión integrada de la producción de alimentos y del respeto a los propios límites del planeta. Según advierte, la biología sintética podría suponer nuevos riesgos para la naturaleza. Si se implementa o gestiona de forma deficiente, podría, por ejemplo, introducir rasgos genéticos indeseados en especies nativas, poniendo en peligro su persistencia. Otros riesgos podrían ser indirectos, como el uso de la biología sintética para abrir nuevas fronteras agrícolas, lo que amenaza la biodiversidad mediante la conversión de tierras. Pero, por otro lado, la biología sintética podría abrir nuevas oportunidades para la conservación de la naturaleza. Por ejemplo, podría ofrecer soluciones a amenazas a la biodiversidad que actualmente no tienen solución, como las causadas por especies exóticas invasoras y enfermedades. Estas oportunidades también podrían ser indirectas, tal vez al permitir la intensificación sostenible de la agricultura y, por lo tanto, reducir la presión sobre los ecosistemas naturales en otras zonas. La garantía del suministro alimentario, para dar estabilidad a las sociedades, exigirá la búsqueda de un equilibrio medioambiental nuevo, tendrá que hacerse de acuerdo con la Naturaleza.

Del campo a la mesa con un nuevo valor añadido

ESPAÑA

En España, la bioingeniería aplicada a los nutrientes es una línea de innovación habitual en la industria agroalimentaria que ha conseguido establecer una alianza sólida con los centros de investigación públicos y privados. Proyectos como SYNTHBIOMICS (Innovaciones disruptivas de Biología Sintética para impulsar la salud, la alimentación, la energía sostenible y la descarbonización industrial), impulsado en Navarra por el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) y el CNTA, exploran estas innovaciones biotecnológicas para abordar desafíos en salud y alimentación. El Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas (IBMCP), ha logrado desarrollar un método para aumentar hasta 30 veces el contenido de beta-caroteno en las hojas de las plantas, lo que permitirá incrementar su aporte de vitamina A. En el proyecto BOILÀ, el centro tecnológico AINIA ha desarrollado nuevas estructuras grasas más saludables y sostenibles, capaces de mantener las propiedades tecnológicas y sensoriales de las grasas sólidas tradicionales, para sustituir ingredientes como la mantequilla, el aceite de palma o las grasas hidrogenadas, por alternativas con mejor perfil nutricional y menor impacto ambiental.

En un sector tan estratégico para la industria española como, como parte de esa ola de transformación tecnológica están surgiendo empresas que transforman la visión convencional del sector. Tebrio, por ejemplo, es una compañía biotecnológica pionera en la producción y transformación del insecto *Tenebrio molitor*. Instalará en Salamanca la granja de insectos más grande del mundo, con una superficie total de 90.000 metros cuadrados cuando tenga finalizadas sus seis fases, cinco



Biología sintética en el foco: Cuestiones de política y oportunidades en la ingeniería de la vida



de ellas destinadas a la cría y una a la transformación. Alcanzará una capacidad de producción anual superior a las 100.000 toneladas anuales de proteínas de alta calidad y lípidos para la elaboración de productos destinados a alimentación animal, biofertilizantes 100% orgánicos y quitosano, con aplicaciones en los sectores farmacéutico, cosmético y de bioplásticos.

Los ejemplos de emprendimiento innovador son muy abundantes. La startup Impact Upcycled Foods ha lanzado al mercado *Impact Oat*, la primera gama de ingredientes alimentarios derivados del proceso de elaboración de la bebida de avena; Yuüt utiliza ingredientes como la proteína del guisante y la mezcla de vegetales para diseñar los perfiles nutricional; la biofactoría de Naturae et Salus utiliza biotecnología para extraer de hongos y vegetales vitaminas, minerales y moléculas bioactivas para la industria alimentaria; AlgaEnergy se centra en sacar el máximo provecho a las microalgas, tanto en cosmética como en alimentación; y Foody’s y Cocuus han lanzado al mercado *BACON!* un alimento elaborado mediante bioimpresión 3D.

La startup navarra MOA Foodtech fue una de las 71 empresas seleccionadas a principios de 2025 por el European Innovation Council (EIC) para recibir subvenciones e inversiones de capital⁴¹. Servirán para desarrollar su proyecto Non-GMO Directed Fermentation, que utiliza inteligencia artificial (IA) para la transformación de subproductos de la industria agroalimentaria en ingredientes de alto valor añadido. Lo hace diseñando procesos y dirigiendo la fermentación hacia un producto específico, sin necesidad de utilizar microorganismos modificados genéticamente. De ese modo, puede ampliar su gama de ingredientes de un alto valor nutricional, evitar barreras regulatorias para su puesta en mercado y adoptar un enfoque de economía circular.

Precisamente, Navarra ha introducido algunos de los campos de actuación previstos para la biología sintética en su Estrategia de Especialización Inteligente (S4) y ha diseñado un Plan Empresarial de Biología Sintética, BioSint-NA⁴², al frente del cual se sitúa la empresa pública Sodena. Incluye hasta 65 acciones y seis ámbitos de actuación. Además, el Gobierno foral ha ubicado el laboratorio de biología sintética en un complejo empresarial llamado Polo de Innovación Digital IRIS⁴³, recientemente inaugurado. Además de ser el centro que concentra todo el conocimiento de la región en materia de innovación y digitalización, se constituye como una “ventanilla única” para impulsar la transformación digital del tejido empresarial.

Fuente: OCDE

Relación de notas

¹ Trijatmiko, K., Dueñas, C., Tsakirpaloglou, N. et al. Biofortified indica rice attains iron and zinc nutrition dietary targets in the field. *Sci Rep* 6, 19792 (2016). doi: 10.1038/srep19792 (Consultado: 03/07/2025).

² Zhu, Q. et al. (2017) ‘Development of “purple endosperm rice” by engineering anthocyanin biosynthesis in the endosperm with a high-efficiency transgene stacking system’, *Molecular Plant*, 10(7), pp. 918–929. doi:10.1016/j.molp.2017.05.008. (Consultado: 03/07/2025).

³ Waltz, E. Gene-edited CRISPR mushroom escapes US regulation. *Nature* 532, 293 (2016). doi: 1038/nature.2016.19754 (Consulta-do: 03/07/2025).

⁴ Medicine, C. for V. (no date) Aquadvantage Salmon fact sheet, U.S. Food and Drug Administration. Disponible en: <https://www.fda.gov/animal-veterinary/aquadvantage-salmon/aquadvantage-salmon-fact-sheet> (Consultado: 03/07/2025).

⁵ Sharif, M. et al. (2021) ‘Single cell protein: Sources, mechanism of production, nutritional value and its uses in aquaculture nutrition’, *Aquaculture*, 531, p. 735885. doi:10.1016/j.aquaculture.2020.735885. (Consultado: 03/07/2025).

⁶ Leger, D. et al. (2021) ‘Photovoltaic-driven microbial protein production can use land and sunlight more efficiently than conventional crops’, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(26).

doi:10.1073/pnas.2015025118.

⁷ Fytsilis, V.D. et al. (2024) ‘Toxicological risks of dairy proteins produced through cellular agriculture: Current State of Knowledge, challenges and future perspectives’, *Future Foods*, 10, p. 100412. doi:10.1016/j.fufo.2024.100412. (Consultado: 03/07/2025).

⁸ Carne cultivada en laboratorio: Cómo se elabora y cuáles son sus pros y sus Contrás (no date) Eufic. Disponible en: <https://www.eufic.org/es/produccion-de-alimentos/articulo/carne-cultivada-en-laboratorio-como-se-elabora-y-cuales-son-sus-pros-y-sus-contras> (Consultado: 03/07/2025).

⁹ Messer, E., & Cohen, M. Food as a Weapon, *Oxford Research Encyclopedia of Food Studies*, 18 de junio de 2024, doi.org/10.1093/acrefore/9780197762530.013.17

¹⁰ <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/duda-integridad-usda-retraso-cambios-reporte-sobre-deficit-comercial-agricola-20250609-762866.html>

¹¹ <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-euro-indicators/w/6-18032025-ap>

¹² <https://www.syngenta.com/products/biologicals>

¹³ “The future of food”, *Nature Reviews Bioengineering*, 9 de noviembre de 2023

¹⁴ Lucile Yart, Cellular agriculture for milk bioactive production, *Nature Reviews Bioengineering*, 9 de

octubre de 2023, doi.org/10.1038/s44222-023-00112-x

¹⁵ Sydney Reis, Zoe Stanley-Lockman, “Healthier, cleaner, greener: a NATO strategy for the coming bio-revolution”, *NATO Review*, 30 de mayo de 2024

¹⁶ https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_224669.htm

¹⁷ “Defense Production Act: The Department of Defense should invest in food biomanufacturing to advance national security”, *Good Food Institute*, diciembre de 2023

¹⁸ Chui, M. et al. “The Bio Revolution: Innovations transforming economies, societies, and our lives”, *McKinsey*, 2020

¹⁹ <https://www.congress.gov/bills/118th-congress/house-bill/7539>

²⁰ “Safeguarding the Bioeconomy”, *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*, 2020, <https://doi.org/10.17226/25525>

²¹ <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/09/12/executive-order-on-advancing-biotechnology-and-biomanufacturing-innovation-for-a-sustainable-safe-and-secure-american-bioeconomy/>

²² Marcia McNutt, “Winning a noble race”, *PNAS*, 21 de diciembre de 2023, doi.org/10.1073/pnas.2321322120

²³ “Prepared Statement of Edward H. You, Supervisory Special Agent,

Biological Countermeasures Unit, Countermeasures and Operations Section, Weapons Of Mass Destruction Directorate, Federal Bureau Of Investigation, Safeguarding the Bioeconomy: U.S. Opportunities and Challenges”, *U.S.-Economic and Security Review Commission*, 16 de marzo de 2017

²⁴ International Security Advisory Board, “Report on Biotechnology in the People’s Republic of China’s Military-Civil Fusion Strategy”, *U.S. Department of State*, 12 de noviembre de 2024

²⁵ Anna Puglisi, Daniel Chou, “China’s Industrial Clusters. Building AI-Driven Bio-Discovery Capacity”, *Center for Security and Emerging Technology (CSET)*, junio de 2022, doi.org/10.51593/20220012

²⁶ <https://www.biomap.com/en/>

²⁷ Michael A. Fisher, “Advancing the U.S. Bioindustrial Production Sector”, *FAS*, 20 de enero de 2023, consultado el 26/06/2025

²⁸ Stefano Donati et al., Synthetic biology in Europe: current community landscape and future perspectives, *Biotechnology Notes*, 2022, doi.org/10.1016/j.biotno.2022.07.003

²⁹ <https://www.gov.uk/government/news/government-publishes-2-billion-vision-for-engineering-biology-to-revolutionise-medicine-food-and-environmental-protection>

³⁰ <https://www.ukri.org/what-we-do/browse-our-areas-of-invest->

ment-and-support/synthetic-biology-for-growth/

³¹ Christopher A. Voigt, Synthetic biology 2020–2030: six commercially-available products that are changing our world, *Nature Communications*, 11 de diciembre de 2020, doi.org/10.1038/s41467-020-20122-2

³² Christopher A. Voigt, Synthetic biology 2020–2030: six commercially-available products that are changing our world, *Nature Communications*, 11 de diciembre de 2020, doi.org/10.1038/s41467-020-20122-2

³³ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. “Strategic Report on Research and Development in Biotechnology for Defense Innovation”. *The National Academies Press*, 2025, <https://doi.org/10.17226/27971>

³⁴ “Artificial Intelligence and Automated Laboratories for Biotechnology: Leveraging Opportunities and Mitigating Risks: Proceedings of a Workshop—in Brief”, *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*, 2024

³⁵ Rajeeva, A. “AI Datasets Need to Get Smaller—and Better”, *InfoWorld*, 15 de junio de 2024, consultado el 02/02/2025

³⁶ De La Cruz, V.Y.V. et al. “Yield gap between organic and conventional farming systems across climate types and sub-types: A meta-analysis”, *Agric. Syst.*, octubre de 2023, doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103732

³⁷ <https://www.darpa.mil/about/offices/bto>

³⁸ Douglas K. R. Robinson, Daniel Nadal, “Synthetic biology in focus: Policy issues and opportunities in engineering life”, OCDE, marzo de 2025, [dx.doi.org/10.1787/3e6510cf-en](https://doi.org/10.1787/3e6510cf-en)

³⁹ Marnie L. Campbell, Chad L. Hewitt, Chi T.U. Le, Views on biosecurity and food security as we work toward reconciling an approach that addresses two global problems for a sustainable outcome, Cell Reports Sustainability, 27 de septiembre de 2024, doi.org/10.1016/j.crsus.2024.100218

⁴⁰ Philip E. Hulme, “One Biosecurity: a unified concept to integrate human, animal, plant, and environmental health”, Emerg Top Life Sci, 28 de octubre de 2020

⁴¹ “La startup navarra MOA Foodtech recibe el compromiso de inversión 14,8 millones de euros de la Comisión Europea”, Revista Alimentaria, 19 de febrero de 2025

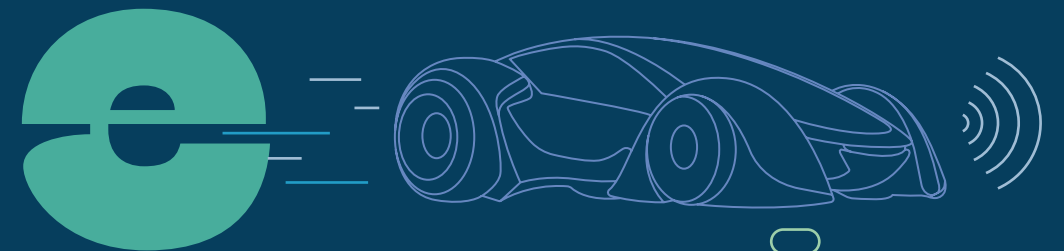
⁴² “Navarra proyecta el Plan Empresarial de Biología Sintética ‘BioSint-Na’, liderado por Sodena, con 65 acciones estratégicas”, biotech-spain.com, 28 de marzo de 2025

⁴³ www.navarra.es/es/-/nota-prensa/polo-de-innovacion-iris-10-millones-de-euros-en-una-infraestructura-unica-en-espana-para-el-desarrollo-digital-y-de-la-biologia-sintetica



07

El vehículo autónomo toma el control del volante





Introducción

Cuando echamos un vistazo a los vehículos disponibles en los distintos catálogos ya no nos sorprendemos al leer entre sus características sistemas como “frenado automático de emergencia”, “control adaptativo de la velocidad” o incluso “cambio automático de carril”. Estas tecnologías, impensables hace apenas unas décadas, son una buena muestra de la innovación que impulsa la industria del automóvil. De este modo, aumentan tanto la seguridad como el disfrute del desplazamiento en un vehículo personal, liberando cada vez más al conductor de las acciones inherentes a la conducción y, por extensión, de los posibles errores asociados que se pueden cometer.

Por ello, la tendencia actual es crear vehículos que sean cada vez más inteligentes y autónomos, que reduzcan el número y la severidad de los accidentes de tráfico que cada año acaban con la vida de miles de personas en todo el mundo. Pero no se trata de un camino sencillo. El desarrollo de la conducción autónoma se enfrenta a enormes retos que ha de sortear, tanto ingenieriles como legales, antes de poder pisar y conquistar las carreteras. Por ello, un número creciente de proyectos tratan de encontrar las teclas que den forma a la movilidad del futuro. Muchos de ellos en nuestro país.

La inteligencia artificial conduce hacia la nueva movilidad

POR DENTRO

Han pasado casi 140 años desde que el 29 de enero de 1886, Carl Benz patentara su “vehículo motorizado con motor de gasolina”, un invento que supuso un cambio de paradigma en el desplazamiento de las personas. Los automóviles transformaron el entorno urbano y acercaron las ciudades, ensanchando las fronteras de la vida de las personas. Además, las vaciaron de los animales de tiro, mejorando sus niveles de salubridad. Como indican las crónicas de la época, a finales del siglo XIX las grandes ciudades se encontraban en mitad de una gran crisis sanitaria producida por el bestiario. En Londres, por poner un ejemplo, los 50.000 animales de tiro producían alrededor medio millón de kilos de estiércol a diario que había que retirar de las calles. Por ello, muchas familias decidieron elevar sus viviendas para evitar que el estiércol llegara a las puertas. En Nueva York, las primeras reuniones acerca de planificación urbana se centraron hallar soluciones a estos excrementos, y en Memphis, los brotes de cólera y fiebre tifoidea eran cada vez más comunes. Por ello, la llegada del automóvil, cuyos únicos excrementos son compuestos volátiles, supuso una revolución¹.

Desde su adopción a principios del siglo XX, la industria del automóvil ha seguido innovando para ofrecer una experiencia cada vez más atractiva y segura para el conductor. En la actualidad, en los automóviles se pueden encontrar interiores aislados y cómodos, con accesorios como climatizadores y sistemas de entretenimiento a bordo que poco tienen que ver con aquello que ideó Benz. Los cinturones de seguridad, los airbags múltiples, y las carrocerías diseñadas para absorber los impactos han permitido que aumente la seguridad. A es-

tos sistemas se han sumado ayudas a la conducción en las que el usuario cada vez tiene que realizar menos acciones.

Esa búsqueda de comodidad y seguridad se está trasladando al desarrollo de vehículos autónomos, capaces de transformar nuevamente la movilidad. Con la intención de que las personas puedan disfrutar del trayecto sin necesidad de conducir, la industria se enfrenta al reto de crear automóviles que sean capaces de operar de manera totalmente independiente, abriendo la puerta a una nueva era del transporte.

Los vehículos se pueden clasificar según su automatización en 6 niveles. El primero, L0, engloba a todos los vehículos completamente manuales, mientras que L5 incluiría a aquellos que son capaces de desenvolverse en cualquier carretera y situación sin que ningún humano tenga que intervenir. Este tipo de vehículo es al que aspira la industria automovilística, uno que no tiene ni volante ni pedales y donde el humano únicamente indica su destino y llega de forma eficiente sin tener que realizar ninguna acción, sólo disfrutando del viaje. Ahora bien, esta tecnología presenta desafíos tanto tecnológicos como logísticos incluyendo, entre otros, la presencia del resto de vehículos, peatones y situaciones en las carreteras que dependen de una respuesta rápida.

Para poder llevar a cabo estas acciones, los vehículos autónomos cuentan con piezas de tecnología que superan con creces las capacidades humanas. En los humanos son los sentidos (mayoritariamente la visión y el oído) los que hacen el trabajo de recoger la información de lo que ocurre en la carretera y transmitirla al cerebro. Allí, es procesada por las redes neuronales y se emite una respuesta que modifica la circulación, bien sea un frenazo por un semáforo en rojo o un cambio rápido de carril para evitar un accidente o un desperfecto en la vía. La respuesta dependerá de muchos factores, como la experiencia del conductor, su estado anímico, el cansancio o las posibles distracciones. Sin embargo, en un vehículo autónomo, tanto la toma de datos, como su procesamiento son radicalmente distintas.

Para detectar obstáculos o eventos que ocurren durante la circulación, los vehículos autónomos utilizan sistemas que superan con creces las capacidades humanas. Por lo general, los vehículos emplean cámaras, radares, LiDAR o cualquier combinación de ellos para poder obtener la información de sus alrededores. Cada una de estas tecnologías tiene sus ventajas y sus desventajas, por lo que su combinación sirve, por lo general, como mecanismo redundante para esclarecer una situación que puede darse durante la conducción.

En los vehículos L0 estos sistemas no existen, ya que su funcionamiento depende completamente de los humanos y, por lo general, los L1 y la mayoría de los L2 no dependen en su totalidad de estos sistemas, sino que el conductor sigue realizando la mayoría del trabajo. Pero echando una mirada al futuro², con los vehículos L3 en adelante, estos dispositivos y las aplicaciones asociadas a ellos cada vez estarán más presentes en nuestro parque

Un elemento que hace complicado avanzar más rápido en la diseminación de estas prestaciones avanzadas se deriva de la necesaria coexistencia de los dos modelos de conducción, el que manejan los humanos y el que hacen los vehículos autónomos. Para mejorar esta compleja realidad se está avanzando en tres vertientes que, a ciencia cierta, nos darán la solución al reto:

1. La existencia de redes de comunicaciones con latencias muy reducidas que aseguren la transmisión de las informaciones a los vehículos autónomos en tiempos de reacción necesarios para evitar los accidentes imprevisibles.

(...)

|
Francisco Marín

de conducción³. El Gráfico 1 permite formarse una idea precisa de los mecanismos de funcionamiento de todo este complejo ecosistema.

Las cámaras captan la luz del sol (o de cualquier otra fuente) que rebota en la superficie de un objeto y entra en el detector. En la mayoría de las cámaras, esta luz se encuentra en el espectro de luz visible, que es la misma que captan nuestros ojos. De este modo, al igual que un humano, los dispositivos artificiales pueden ver obstáculos situados en los bordes de la carretera o, empleando varias cámaras en distintas localizaciones, triangular la posición en tres dimensiones, tanto de objetos estáticos como de los que se acerquen al vehículo en posibles trayectorias de colisión. Las cámaras de los vehículos autónomos son similares a las que tenemos a nuestra disposición en cualquier teléfono actual, aunque suelen estar especializadas en mantener un delicado equilibrio entre resolución, consumo y robustez, ya que se enfrentarán a climas duros, vibraciones y posibles golpes de insectos y pequeñas piedras durante la conducción.

Una de las mayores ventajas de la tecnología de visión artificial que utilizan los vehículos autónomos es que estos no están sujetos a las vicisitudes de la biología, y a lo que la evolución ha ido seleccionando por ser más ventajoso en la naturaleza. Cualquier máquina puede ser diseñada y construida a medida para cumplir una misión de la forma más eficiente posible. Es por ello por lo que, aplicando el ingenio, la industria automotriz ha adaptado tecnologías que anteriormente tenían otros usos a los vehículos autónomos. Añadiendo otro tipo de sensores, capaces de ver la luz que a los humanos nos resulta invisible, los vehículos pueden contar con un “ojo mejorado” con unas habilidades que superan con mucho a cualquier órgano de visión biológico.

Un claro ejemplo son las cámaras de infrarrojos, que detectan la radiación que escapa de cualquier objeto por tener una cierta temperatura. A medida que ésta sube, se incrementa el intercambio de calor con el medio, y eso se traduce en un gradiente de color que suele mostrarse desde el negro (frío) hasta el blanco (caliente). De este modo, el vehículo puede “ver” en completa oscuridad en la noche, o tras una densa cortina de humo, ya que cada objeto, dependiendo de si se encuentra expuesto al sol o cubierto de nieve, tiene una temperatu-



(...)

2. La elaboración de algoritmos de conducción muy expertos, que, en base a las informaciones recibidas por las comunicaciones, reaccionen en los mayores términos de seguridad para los viajeros.

3. La mejora de los elementos de seguridad implícitos en el propio vehículo que incremente, de forma muy notable, la evitación de daños al pasajero, inclusive en las indeseadas ocasiones en las que se pudiese producir el accidente.

(...)

|

Francisco Marín

ra determinada. Esta tecnología es especialmente útil para detectar humanos, que tienen una temperatura de alrededor de 35°C en su piel expuesta, o los tubos de escape de los vehículos de su alrededor, que se calientan con la salida de gases del motor⁴.

Tanto las cámaras normales como las infrarrojas son sistemas pasivos y, por tanto, como comentábamos, detectan la luz o radiación que emiten o reflejan los objetos. Por ello, las primeras dependen de que haya luz para poder funcionar, y las segundas, de que haya diferencias de temperatura en su entorno. Si no se cumplen estas condiciones, las cámaras quedan ciegas. Por ello, los vehículos autónomos emplean otros sistemas que mueven la fuente de luz al propio vehículo. Un sistema que demuestra cómo el ingenio humano puede encontrar soluciones a cualquier obstáculo al que se enfrente.

Para comprender cómo funcionan estos sistemas vamos a realizar un pequeño ejercicio de imaginación. Situémonos en un valle formado por dos cadenas montañosas. Una de las paredes es prácticamente vertical, y la otra ofrece una pendiente y un camino asequible. No sabemos cómo hemos llegado allí, pero, por supuesto, queremos saber dónde estamos. Por ello, nos atamos los zapatos y comenzamos a subir la pendiente asequible para tratar de llegar a la cima y otear en el horizonte algún rastro de civilización. Comenzamos a subir, y a subir, y a subir. Y, cuando hacemos una parada de descanso, nos gustaría saber cuánto nos hemos separado de la pared. No disponemos de ningún dispositivo más que un cronómetro, y una calculadora de bolsillo, por lo que, para averiguarlo tendremos que valernos de la creatividad.

Si nos giramos y miramos la pared distante de la montaña, podemos estimar la distancia a la que se encuentra emitiendo un grito. El sonido se transmite por el aire a aproximadamente a 343 metros por segundo, o dicho de otro modo, cada segundo recorre 343 metros. Por tanto, analizando el eco, o dicho de otro modo, cuánto tiempo tarda en llegar el sonido en rebotar en la pared y llegar de nuevo a nuestros oídos, podemos hacernos una idea de la distancia a la que se encuentra la pared. Si pasan dos segundos, la pared se encontrará exactamente a 343 metros (ya que tardará un segundo en llegar a la pared y otro en volver). Si tarda más, o menos, podemos hacer una sencilla regla de tres para conocer la distancia aproximada.

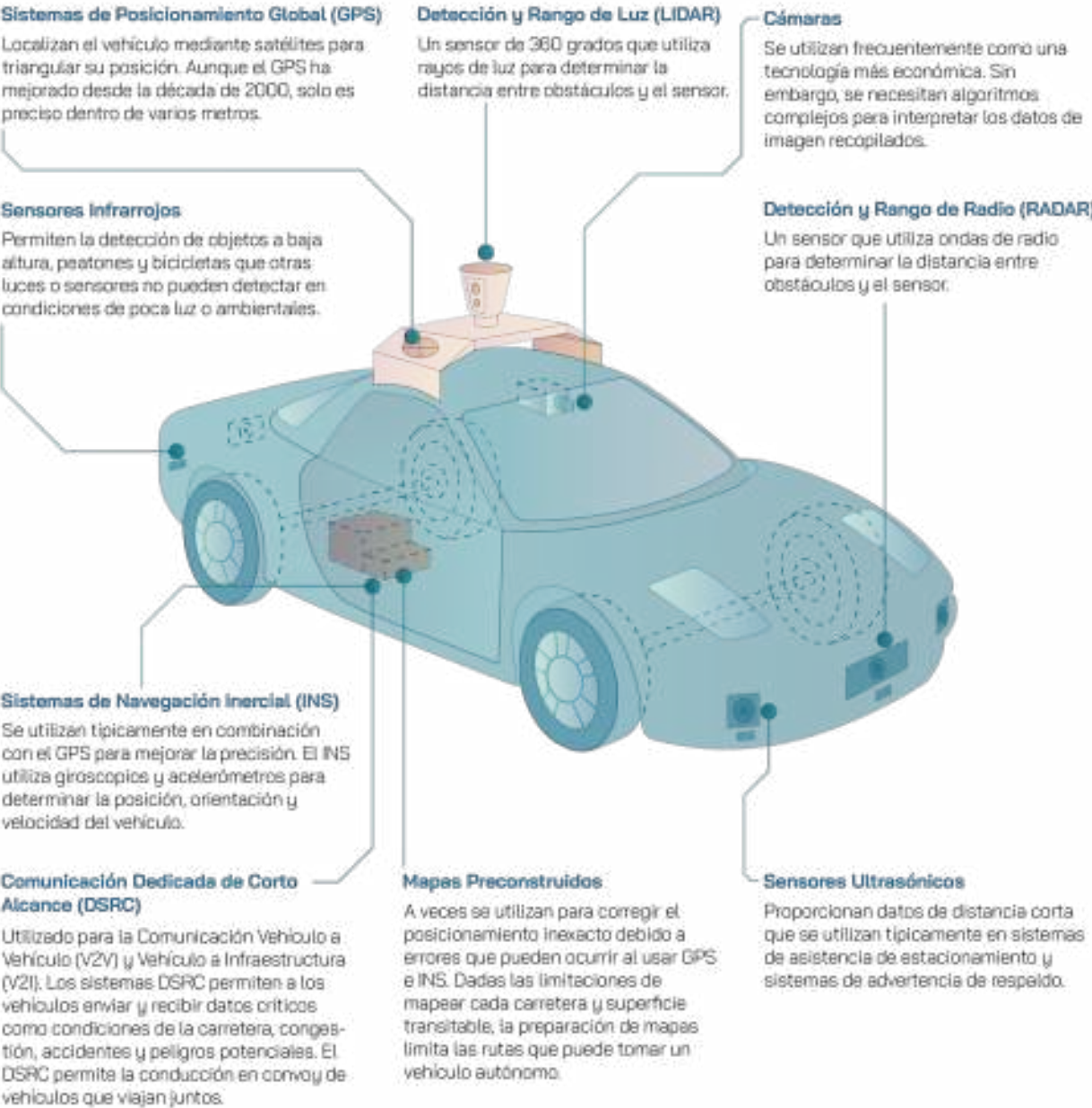
Esto es, de forma muy simplificada, cómo funciona un sónar activo, un mecanismo que ha sido muy utilizado por barcos y submarinos para detectar los bancos de peces o evitar encallar en el fondo marino. Sin embargo, este método no está exento de controversia. Los fuertes sonidos han sido responsables de asustar y desorientar a muchos cetáceos, llegando incluso a provocar su muerte por empujarlos a las profundidades en su huida. Por ello, aunque se trata de un sistema muy arraigado, se están explorando otras opciones.

En tierra firme el sónar de larga distancia tampoco es viable ya que también podrían alterar la fauna y el bienestar de las personas. Aunque sí que se utiliza, en algunos casos, para los sistemas de aparcamiento autónomo. Pero para largas distancias, la industria automovilística se ha centrado en desarrollar un sistema similar que, en vez de emitir sonido, emite distintas longitudes de onda de luz. Estos sistemas de detección se denominan «activos» y engloban el radar, si usa microondas, o el LiDAR⁵, si utiliza el espectro infrarrojo. En ambos casos, los sensores miden el tiempo que tardan los fotones en llegar a todos los puntos del entorno y cuánto tiempo tarda cada uno de ellos en volver, creando así un mapa en 3D de los alrededores del vehículo. Ambos sistemas también son capaces de calcular la dirección y la trayectoria de los objetos móviles del entorno realizando estas mediciones varias veces por segundo y aplicando cálculos vectoriales.

La diferencia entre el radar y el LiDAR radica sobre todo en su resolución y en la distancia de detección. El LiDAR puede detectar objetos a corta distancia con una precisión de centímetros, incluso milímetros en ciertos casos, mientras que el radar, debido a su mayor longitud de onda, puede detectar objetos más lejanos, pero de forma mucho menos precisa. El radar puede detectar que se acerca un objeto voluminoso, pero no distingue entre un coche, un camión o una motocicleta, mientras que el LiDAR sí que podrá distinguirlos con precisión. Además, también es especialmente útil en anticiparse a obstáculos inmóviles e irregularidades de la carrera a corta distancia. Por último, el LiDAR no está encorsetado en una única frecuencia del espectro, sino que puede usar varios rangos, combinando así la resolución con la distancia de detección. Por ello, hasta ahora, se ha consolidado como el sistema más atractivo para que los vehículos autónomos sientan su entorno.

Una última ventaja de estos sistemas tiene que ver con la protección de datos de las personas de nuestro alrededor. Las cámaras están constantemente tomando imágenes de los edificios y las personas. Esto podría evitar la conducción autónoma en lugares sensibles, o vulnerar leyes de protección de datos especialmente en la Unión Europea. En cambio, radares y LiDAR crean matrices de puntos en 3D que no pueden ser reconstruidos en una imagen precisa. Por ello, en este tipo de sistemas de detección es imposible distinguir el detalle de las facciones características de una persona, respetando así su privacidad.

Tecnologías implicadas en los Vehículos Autónomos



Fuente: Universidad de Michigan

		Operaciones	Con Manos	Con Ojos	Con Atención
Asistidos	Nivel 0 Manual	<ul style="list-style-type: none">Advertencias de seguridad o asistencia temporalEl conductor retiene todas las tareas de conducción			
	Nivel 1 Conducción Asistida	<ul style="list-style-type: none">Control de la dirección O de la velocidad por el sistemaEl conductor mantiene las manos en el volante y los ojos en la carretera			
	Nivel 2 Conducción Parcialmente Automatizada	<ul style="list-style-type: none">Control de la dirección Y de la velocidad por el sistemaEl conductor mantiene las manos en el volante y los ojos en la carretera			
	Nivel 2/++ Conducción Automatizada Avanzada o Parcialmente Automatizada	<ul style="list-style-type: none">Control de la dirección Y de la velocidad por el sistemaEl conductor mantiene los ojos en la carreteraEl conductor debe poder tomar el control total de forma inmediata cuando sea solicitado			
Automáticos	Nivel 3 Conducción Automatizada bajo Condiciones Definidas	<ul style="list-style-type: none">El sistema conduce bajo condiciones predefinidasEl conductor necesita intervenir para tomar el control en 5-10 segundos al solicitarlo el sistemaCambio crítico: la responsabilidad cambia del conductor al sistema			
Autónomos	Nivel 4 Conducción Autónoma bajo Condiciones Definidas	<ul style="list-style-type: none">El sistema conduce bajo ODDs (Dominio de Diseño Operacional) pre-aprobadosNo se requiere que el conductor tome el control (dentro del ODD)Se puede diferenciar entre L4 de autopista y L4 urbano debido a sus diferentes complejidades			
	Nivel 5 Conducción Autónoma en Todas las Condiciones	<ul style="list-style-type: none">El sistema conduce en todas las condicionesNo se requiere que el conductor tome el control			

Conductor

Sistema

(...)
Superadas estas barreras, las ventajas que suponen para los ciudadanos la existencia de estas nuevas ayudas son muy relevantes. Comodidad, ahorro, rapidez, mejora del medio ambiente, etc. son algunos de los elementos que fuerzan el mantenimiento de la inversión necesaria para conseguir un completo parque de vehículos autónomos.
|
Francisco Marín

Los sensores de los que hemos hablado hasta ahora únicamente detectan información del entorno y lo traducen al sistema binario. Unos y ceros. Para que dichos datos sean de utilidad, los ordenadores de abordo deben analizarlos y transformarlos en cifras medibles con las que elaborar una respuesta. Para ello, los vehículos contienen, repartidos por toda la carrocería, las denominadas unidades de control electrónica o ECU. Por lo general, se encuentran cerca de los sensores o de los mecanismos que controlan. Allí, procesan la información y la envían directamente a los sistemas de respuesta o a otra ECU que esté especializada en el control de la respuesta.

La funcionalidad de las ECU y, por ende, de los sensores y sistemas de respuesta depende, a su vez, del software que tengan instalado. Estos softwares han ido aumentando tanto en complejidad como sofisticación para adelantarse a todos los posibles escenarios que se pueden dar durante la conducción. Antes de poner un vehículo en circulación, se prueban durante miles de kilómetros tanto en espacios cerrados, como en tráfico abierto bajo la atenta mirada del personal que realiza la prueba. Cuanto mayor grado de autonomía tiene el vehículo, más duras y severas serán las pruebas para garantizar que no ponga en peligro al resto de usuarios de las carreteras.

Pero además de la capacidad de computación de cada vehículo, la casi omnipresente conexión a internet ofrece una mayor capacidad para disfrutar de un viaje seguro y eficiente. Al conectarse a la nube, un vehículo autónomo puede obtener información de las carreteras al instante. Así es capaz de establecer las rutas más rápidas entre dos puntos teniendo en cuenta la situación global. El conductor autómatas puede acceder a una ingente cantidad de información, además de actualizaciones para sus ECU sin tener que almacenarla en sus limitados sistemas ni acudir a un taller especializado.

Aunque la conexión a internet es una carretera de doble sentido. Además de recibir información, un vehículo autónomo también puede enviar datos de geolocalización, así como de alarma en caso de accidente, lo que permite a las autoridades acudir con la mayor celeridad. Estas conexiones tienen sus riesgos, ya que pueden existir vulnerabilidades con las que ciertos hackers sean capaces de activar o desactivar tanto sensores

como sistemas de respuesta, dando lugar a una situación de peligro para los ocupantes del vehículo o el resto de los usuarios de la carretera.

Teniendo todo esto en cuenta, la mayoría de vehículos del parque automovilístico son de la clase L0, L1 o L2. Dichos vehículos ofrecen sistemas de protección para los conductores, como el frenado de emergencia, la posibilidad de mantener una velocidad de crucero, o de mantenerse a cierta distancia de un vehículo y cambiar de carril si fuera necesario. Pero existen ciertos lugares donde los sistemas de conducción más avanzados están tomando las calles.

Como se verá con más detalle en el siguiente apartado, tanto en Estados Unidos como en China, hay compañías de taxis completamente autónomos. Los más conocidos son los de la compañía Waymo, que operan desde hace años en California (Los Ángeles y San Francisco), Arizona (Phoenix) y Texas (Austin) un vehículo I-Pace de Jaguar. También en Estados Unidos, en Las Vegas, la compañía Motional, que tiene una flota de medio millar de Hyundai Ioniq 5 han superado los dos millones de kilómetros sin ningún accidente en el que el vehículo tuviese la culpa. En estas ciudades, el servicio de taxi autónomo comenzó llevando un conductor supervisor, ya que las leyes recogían que los vehículos debían llevar en todo momento a una persona al volante. Pero tras los cambios de leyes pertinentes, ahora no están supervisados, y transportan pasajeros por toda la ciudad.

Debido a estas leyes más permisivas, cada vez más empresas, como Tesla, van uniéndose al negocio de los taxis autónomos en el país americano. El gigante automovilístico comenzó su andadura el 22 de junio de 2025 con 10 taxis, aunque con un éxito limitado, puesto que se han visto envueltos en varios accidentes que se encuentran bajo investigación por la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras⁶. Esta declaración de intenciones es un claro pulso a China, donde las empresas Baidu, AutoX o WeRide tienen flotas de taxis autónomos en ciudades como Wuhan, Shanghai Beijing o Guangzhou⁷. Además, Xin Jinping ha mostrado un claro interés en seguir expandiendo la flota de vehículos autónomos a coches, camiones y autobuses en sus ciudades más importantes.

Por otro lado, algunas ciudades han apostado por la creación de zonas especializadas en testar estos vehículos. Es el caso de Ottawa, en Canadá, donde han creado L5⁸, una zona industrial en la que las compañías de vehículos autónomos pueden probar sus sistemas en situaciones de conducción lo más cercanas a la realidad. Estas pruebas son cruciales para pulir los softwares que controlan los vehículos y disminuir la cantidad de accidentes, una cifra baja de por sí.

Según informaba la empresa Waymo, en los 35 millones de kilómetros que sus vehículos han realizado en los últimos 5 años, los vehículos se han visto envueltos en 192 colisiones⁹. 18 de estas colisiones se saldaron con algún herido, aunque los informes no mencionan la responsabilidad. Estas cifras



son mejores que las de sus contrapartes de carne y hueso, que en la misma distancia recorrida sufrieron más de mil colisiones, de las cuales alrededor de 60 produjeron heridos. Con las siguientes mejoras en la tecnología se espera que los vehículos autónomos sean todavía más seguros¹⁰.

En Europa, las regulaciones también están favoreciendo la integración de los vehículos autónomos en el parque automovilístico, sobre todo centrados en la movilidad en las ciudades. Los pioneros son los de países como Noruega o Finlandia, donde estos vehículos, llamados e-Jest y e-ATAK ya forman parte habitual de sus carreteras. Aunque no son los únicos, existen varios proyectos de autobuses autónomos que se han desarrollado en varios países de la Unión y entre ellos, también a la vanguardia, se encuentran proyectos desarrollados en España.

En definitiva, a lo largo de los últimos años, los vehículos autónomos han irrumpido en el parque automovilístico, listos para transformar tanto la movilidad como el transporte público a nivel global. Esta integración en nuestras carreteras ha sido posible por naciones tanto de América como de Asia y Europa, que han apostado tanto por la innovación como por modelos de negocio que únicamente formaban parte de historias de ciencia ficción. En la actualidad, la carrera tecnológica es producto de grandes inversiones, avances en distintos campos científicos y, una arriesgada, pero sólida apuesta legislativa cuyo resultado es que las calles cada vez presencien a más vehículos sin conductores.

De momento, para asegurar que la tecnología sigue avanzando en la dirección correcta, los vehículos (con las mentes ingenieriles detrás) continúan recopilando y analizando datos reales de viajes e incidentes. De este modo, cada vez consolidan mejor los softwares que mueven y dirigen vehículos e industrias en la dirección correcta. Además, legisladores y organismos oficiales también redoblan los esfuerzos para que los marcos normativos se ajusten a esta nueva realidad, donde los conductores tienen menos protagonismo y, por tanto, responsabilidad en caso de accidente.

Pero todo avance requiere prudencia. A adopción de estas tecnologías no es una carrera de sprint, si no que se trata de una transformación que, a largo plazo y con un compromiso por parte de centros e instituciones, moldeará una nueva era de la movilidad.

Mapa de actores del ecosistema de robotaxis y brechas restantes

Rol / Actores			Tareas	En la trayectoria actual, ¿qué falta para escalar para 2030?
● Brechas limitadas			● Brechas principales	
Producción	Vehículos. Fabricantes de equipos originales (OEMs)	Desarrollar y producir vehículos diseñados para el uso de robotaxis.	Transformación exitosa a vehículos definidos por software (SDVs) incluyendo nueva arquitectura eléctrica/electrónica (E/E).	
	Tecnología AD. Proveedores de hardware y software de tecnología AD	Desarrollar software y hardware de AD adecuados a las necesidades locales.	Rendimiento de seguridad fiable en diferentes ODDs (Dominios de Diseño Operacional) y regiones. Software fácilmente escalable y asequible.	
Facilitadores	Financiación. Capital riesgo, inversores estratégicos, asociaciones público-privadas	Proporcionar financiación para I+D y escalado.	Financiamiento asegurado para mejorar la tecnología y escalar operaciones.	
	Regulación. Gobiernos, autoridades	Establecer regulación y estándares de homologación, proporcionar licencias, establecer zonas	Regulación armonizada entre ciudades y países.	
	Seguros. Seguros, análisis de riesgos, reaseguros	Desarrollar modelos y políticas de evaluación de riesgo.	Disponibilidad de datos a gran escala para modelos y políticas de riesgo robustos Infraestructura.	

Fuente: WEF / Boston Consulting Group

Rol / Actores			Tareas	En la trayectoria actual, ¿qué falta para escalar para 2030?
● Brechas limitadas			● Brechas principales	
Operaciones	Infraestructuras. Servicios públicos, ciudades	Proporcionar carga, comunicación vehículo-a-todo (V2X), trabajar para conectar, integrar el control en el tráfico.	Infraestructura dedicada de robotaxis dentro de la ciudad (carriles, espacios de bordillo). Integración en sistemas de gestión de tráfico.	
	Gestión de flotas. OEMs, proveedores, servicios de transporte bajo demanda (ride-hailing), gestión de flotas	Gestionar flotas y mantenimiento, determinar áreas de servicio.	Distribución de tareas definida entre OEMs, plataformas, gestión de flotas. Marcos de gestión de flotas escalables.	
	Control de flotas. OEMs, proveedores, servicios de transporte bajo demanda (ride-hailing), gestión de flotas	Gestionar unidades de seguridad de respaldo, monitorear el rendimiento de la flota.	Distribución de tareas definida entre OEMs, plataformas, gestión de flotas. Centros de control de flotas dedicados con personal especializado Plataforma.	
	Plataformas. Servicios de transporte bajo demanda (ride-hailing) y Movilidad como Servicio (MaaS)	Integrar robotaxis en las plataformas, asegurar interacciones fluidas y soporte	Trayectoria del cliente definida y procesos fluidos. Integración con proveedores de gestión y control de flotas.	
Uso	Educación. Grupos públicos, medios de comunicación, universidades	Educar sobre seguridad y beneficios, abogar por el acceso equitativo	Educación a gran escala sobre capacidades y limitaciones. Análisis del beneficio social de las flotas a gran escala.	
	Cliente. Usuarios finales B2B y B2C	Usar robotaxis, participar en ciclos de retroalimentación	Confianza para compartir calles con robotaxis, así como para usarlos.	

Nuevos modelos de negocio dentro y fuera del coche

EN ACCIÓN

Si bien a finales de la pasada década se vaticinaba una imparable proliferación de vehículos autónomos durante los siguientes años, como sucede muchas veces en el sector tecnológico, el sentir general hoy es que numerosos desafíos y complejidades técnicas, regulatorias y económicas van a ralentizar su implementación. El mercado está demostrando que existe demanda y la carrera tecnológica, en cualquier caso, ya no se va a detener, especialmente en el ámbito del software y la visión artificial. De modo que, a medida que el nuevo ciclo de inteligencia artificial (IA) despliegue todas sus capacidades, la reacción de la industria podría cambiar. Pero los expertos coinciden ahora mismo en que los sistemas L2 y L2+ dominarán hasta 2035 debido a su rentabilidad y a su adecuación a la normativa, mientras que la adopción del L3 seguirá siendo limitada, y la implementación del L4 apenas representará alrededor del 4% de los nuevos vehículos personales dentro de 10 años¹¹.

Los robotaxis ya han demostrado su viabilidad tecnológica y, como se ha dicho en el apartado anterior, se están implementando a gran escala en ciudades de Estados Unidos y China. En el Gráfico 3 se pueden observar las previsiones de crecimiento por regiones. Ambos países suman más de 30 urbes con pruebas, más que el resto del mundo unido. Se espera que el gigante asiático adopte los vehículos L2+ y L3/L4 con mayor rapidez, debido a la fuerte demanda de los consumidores, a la mayor agilidad regulatoria y al desarrollo del ecosistema innovador. El gobierno chino considera la conducción autónoma una prioridad estratégica y a finales de 2024 el 15% de los vehículos nuevos incorporaban las formas más avanzadas de ADAS (Advanced Driver As-

sistance Systems). La operación comercial de vehículos autónomos se regula a nivel nacional, pero su implementación se realiza a nivel municipal. Apollo Go de Baidu ofrece un servicio de pago totalmente autónomo en Wuhan y, junto a empresas como Pony.ai y WeRide, opera con algunas restricciones en zonas acotadas de ciudades como Pekín, Cantón, Shenzhen y Chongqing.

Por su parte, a mediados de 2025, más de 1.500 robotaxis operaban comercialmente en cinco ciudades estadounidenses y la previsión era que esa cifra aumentara hasta los 35.000 en 2030¹². De cumplirse esas expectativas, generarían 7.000 millones de dólares en ingresos anuales y captarían aproximadamente el 8% del mercado estadounidense de viajes compartidos, frente a menos del 1% actual.

El resto de países no están parados y el mapa de actores recopilado en el Gráfico 2 pone de manifiesto la dimensión del ecosistema. En 2035, podría haber una gran cantidad de robotaxis en entre 40 y 80 ciudades de todo el mundo. La expansión internacional incluye Emiratos Árabes Unidos, Japón y hasta Mongolia, pero el reto sigue siendo pasar del ensayo altamente controlado y supervisado al lanzamiento comercial. Emiratos Árabes Unidos se ha fijado el objetivo de tener 4.000 robotaxis en Dubái en 2030, Alemania dispone de un marco para la implementación de vehículos autónomos y la Ley de Vehículos Automatizados¹³ de Reino Unido posibilitará su despliegue comercial a partir de 2026. En este último país, se liberará así el potencial de una industria con un valor estimado de hasta 42.000 millones de libras y una capacidad para crear 38.000 empleos cualificados adicionales hasta 2035¹⁴. La ley británica exigirá que los vehículos autónomos alcancen un nivel de seguridad al menos tan alto como el de los conductores humanos cuidadosos y competentes, además de superar rigurosos controles de seguridad antes de ser autorizados a circular por las carreteras.

El impulso proviene no sólo de los gobiernos, sino fundamentalmente de las propias compañías emergentes que están apareciendo en el sector. Más allá de la decisión de General Motors de retirar la financiación de su filial de taxis autónomos Cruise a finales de 2025¹⁵, se espera un gran interés de las empresas chinas de robotaxi por expandirse fuera de su país de origen. Con Baidu realizando pruebas en Hong Kong y el lanzamiento de WeRide a través de Uber en Abu Dabi, se ha dado el pistoletazo de salida a la carrera por dominar los servicios de transporte autónomo a nivel mundial¹⁶.

Son llamativas las cautelas europeas ante este nuevo mercado, teniendo en cuenta que el primer vehículo vendido al público con autonomía L3 en todo el mundo se presentó en Alemania en 2022. Esto fue posible gracias a la adopción por parte del país de la UNECE R157, una normativa que ya se aplica en más de 50 países, que permitía inicialmente la activación de pilotos artificiales para atascos hasta 60 km/h y lo ha ampliado hasta 130 km/h. En marzo de 2025, entró en vigor en Suiza una legislación que permitirá la conducción autónoma en autopistas, así como los robotaxis sin conductor en determinadas condiciones.



Hoy en día, en la UE, sigue siendo necesario, no obstante, armonizar las pruebas y las políticas de vehículos autónomos para que no se detengan en las fronteras de los países. De hecho, la actual disparidad de normativas y los diferentes niveles de progreso plantean desafíos que exigen una armonización a nivel de toda la UE¹⁷. Los 29 países signatarios de una Carta de Intención en el Día Digital 2017 acordaron poner en marcha corredores transfronterizos 5G¹⁸. La ambición de la Comisión Europea es basarse en ellos para desplegar los proyectos de conducción automatizada. Se han realizado pruebas 5G en más de 1.000 km de autopistas, incluidos cuatro corredores transfronterizos: Metz-Merzig-Luxemburgo, Múnich-Bolonia a través del Paso del Brennero, y Porto-Vigo y Évora-Mérida, ambos entre España y Portugal. Las normas unificadas de la UE, como las establecidas en el Reglamento General de Seguridad¹⁹ de 2019 y las especificaciones ADS²⁰ de 2022, sientan las bases para la armonización. Sin embargo, hay que seguir avanzando. A diferencia del enfoque fragmentado a nivel estatal de Estados Unidos o de los mandatos jerárquicos de China, Europa podría convertir su capacidad alineamiento y cooperación en una ventaja competitiva.

El pronóstico de Goldman Sachs Research indica una tasa de crecimiento anual compuesta del sector de alrededor del 90% entre 2025 y 2030. Delaney estima que los márgenes brutos para un operador de vehículos autónomos podrían alcanzar el 40-50% en los próximos tres a cinco años, lo que elevaría las ganancias brutas en EEUU a aproximadamente 3.500 millones de dólares en 2030. No obstante, escalar flotas implica superar tantos obstáculos que la euforia ha dado paso a una visión más realista y moderada. Hace falta una amplia infraestructura física, con depósitos, centros de mantenimiento y conectividad de alta velocidad. De modo que el número de ciudades adecuadas para el despliegue masivo sigue siendo limitado en la actualidad. Además, desarrollar el software de los robotaxis requiere de miles de millones de dólares de inversión I+D, en contraste con los gastos asociados a la tecnología ADAS/AD (conducción autónoma), por la que se decantan muchos grandes fabricantes (OEM) hoy, que son claramente más asumibles.

En la Feria de Electrónica de Consumo (CES) de 2025 en Las Vegas, la CEO de Waymo, Tekedra N. Mawakana, protagonizó una de las sesiones estelares y Volvo hizo gala de pirotecnia tecnológica para promocionar su camión autónomo, que utiliza el sistema de conducción de Aurora Innovation. Pero la percepción general fue que, en lugar de repetirse las proclamas ambiciosas de otros tiempos, tanto las empresas tecnológicas como los fabricantes de automóviles tradicionales están dando prioridad a las soluciones prácticas y listas para el mercado²¹. Casi todos los encuestados por McKinsey (96%) consideran que las alianzas estratégicas entre las startups y las empresas de viajes compartidos, los gigantes del sector TIC, los grandes fabricantes y los principales usuarios, como los transportistas, serán cruciales para el desarrollo de vehículos autónomos. La mayoría opina también que el mercado norteamericano será el más fragmentado, solo el 15% espera que esté dominado por uno o dos actores, en contraste con el 38% que creen que eso

La revolución de los vehículos autónomos es, ante todo, una revolución de la visión. Cámaras de alta velocidad, sistemas lidar y sensores ópticos avanzados actúan como los “ojos” de las máquinas, permitiendo una movilidad segura e inteligente. La calidad de esa percepción depende directamente de la precisión óptica. Por ello, la innovación en fotónica, óptica adaptativa y procesamiento visual determinará qué países lideran la transición hacia una movilidad más sostenible, eficiente y autónoma.

Pablo Artal

es precisamente lo que va a suceder en el caso europeo²². Por todo ello, es poco probable que los fabricantes de automóviles, en general, participen en un desarrollo integral del nuevo sector, ya que esto agotaría los recursos que necesitan con urgencia para la transición a sistemas de propulsión eléctricos²³.

En contrapartida, a medida que aumente la escala del sector, los costes podrían disminuir por la propia evolución de la tecnología, en ámbitos clave como el de las cámaras. Se estima que la producción de cada uno de los vehículos que actualmente prestan el servicio de Waymo asciende a 150.000 dólares²⁴. La próxima generación de hardware ofrecerá un mayor rendimiento a un coste significativamente menor. Tesla, Wayve y otras empresas están adoptando el enfoque de desarrollar directamente sus sistemas con hardware más asequible, utilizando únicamente cámaras e imitando a los humanos. Gracias a ello, la conducción por kilómetro se está abaratando, y podrían bajar de aproximadamente 22 céntimos de euro en 2025 a nueve en 2040. Los costes del seguro también podrían disminuir de 31 a 14 céntimos por kilómetro durante el mismo período. Las empresas de vehículos autónomos necesitarán, por último, cada vez menos operadores remotos, que actúan como red de seguridad y proporcionan asistencia virtual: cada uno podría gestionar 35 vehículos en 2040, frente a los 10 de 2030 y los apenas tres actuales.

En el caso de los camiones autónomos, la evolución será similar. El coste por kilómetro podría bajar de 3,8 a 1,18 euros en 2030, mientras que el coste de los camiones conducidos por humanos aumentará de 1,63 a 1,75 euros por kilómetro, impulsado por la subida salarial de los conductores. La UE parece, de hecho, más centrada en la integración de lanzaderas robóticas (*roboshuttles*), autobuses y camiones autónomos con los sistemas de transporte público que en el lanzamiento de los vehículos autónomos comerciales o particulares, aunque las fronteras internacionales entre los Estados miembro planteen todavía desafíos para las aplicaciones de larga distancia.

El transporte de mercancías se presenta como el ámbito más prometedor para la automatización. Las ventas de camiones autónomos podrían representar hasta el 30% de las ventas totales de camiones nuevos en

EEUU en 2035. Este país está mejor posicionado para liderar su adopción, especialmente en las rutas de larga y media distancia, debido a sus ventajas en coste total de propiedad (TCO) y a la apremiante necesidad de abordar la escasez de conductores. Actualmente, solo se están implementando unos pocos camiones autónomos en la Cuenca Pérmica y el estado de Texas, en EEUU, pero su número podría alcanzar los 25.000 vehículos en 2030, cifra que aún representaría, en cualquier caso, menos del 1% de la flota total de camiones comerciales existente. El volumen de negocio por el transporte autónomo de carga sería en ese caso de unos 18.000 millones de dólares, sobre un mercado total del sector de mercancías por carretera de unos 660.000 millones²⁵.

A nivel mundial, se prevé llegar al medio millón adicional de conductores autónomos de camiones L4, mientras que los conductores restantes asumirán funciones de supervisión o continuarán trabajando en las regiones menos desarrolladas. Europa también podría obtener fuertes beneficios vía TCO para larga y media distancia, pero necesita un enfoque paneuropeo para escalar rápidamente las operaciones y alcanzar ese 26% en las ventas de camiones nuevos en 2035 que prevén los expertos. La apuesta en el continente apunta a rutas fijas L4 de alta calidad para el transporte autónomo de corta distancia (300-700 km). La sueca Einride está planificando implantarlas en Reino Unido, Noruega y Suecia, para lo cual exige a las empresas que establezcan instalaciones auxiliares a lo largo del camino.

China podría seguir un ritmo de adopción de camiones autónomos todavía más lento, porque su TCO es inferior, salvo que su Gobierno decida intervenir de forma más clara. Cuenta con empresas como Inceptio y DeepWay que superan ya las 1.000 unidades vendidas. La primera ha establecido alianzas a largo plazo con más de 13 entidades y había alcanzado los 100 millones de kilómetros en mayo de 2025. No obstante, lo ha conseguido después de dar un giro estratégico a sus operaciones, que han pasado de dos conductores L4 a un solo conductor (L2+/L3) y han ampliado sus rutas a 800-1.000 km. El resultado ha sido una reducción de los costes laborales de los conductores de hasta un 40%, y un aumento de sus ingresos de aproximadamente el 8%.

El desarrollo de las lanzaderas robóticas y los autobuses autónomos, que también ofrecía perspectivas muy alentadoras, se ha acabado atascando. Las primeras asomaron en su momento como la solución ideal para el transporte de última milla y más de 25 empresas llegaron a disputarse la primacía en el sector. Sin embargo, la financiación insuficiente está impidiendo a muchas compañías avanzar más allá de las pruebas a pequeña escala, y ha puesto de manifiesto una inesperada falta de interés público, esencial para establecer un modelo de negocio viable en este sector. Entre las empresas que siguen apostando por esta tecnología destacan WeRide en Singapur, QCraft en 10 ciudades de China continental, Pix Moving en 16 ciudades de todo el mundo y Hyundai en Corea del Sur y Reino Unido. En mayo de 2024, el Grupo Renault presentó su estrategia de vehículos autónomos²⁶ y lanzó, por primera vez en

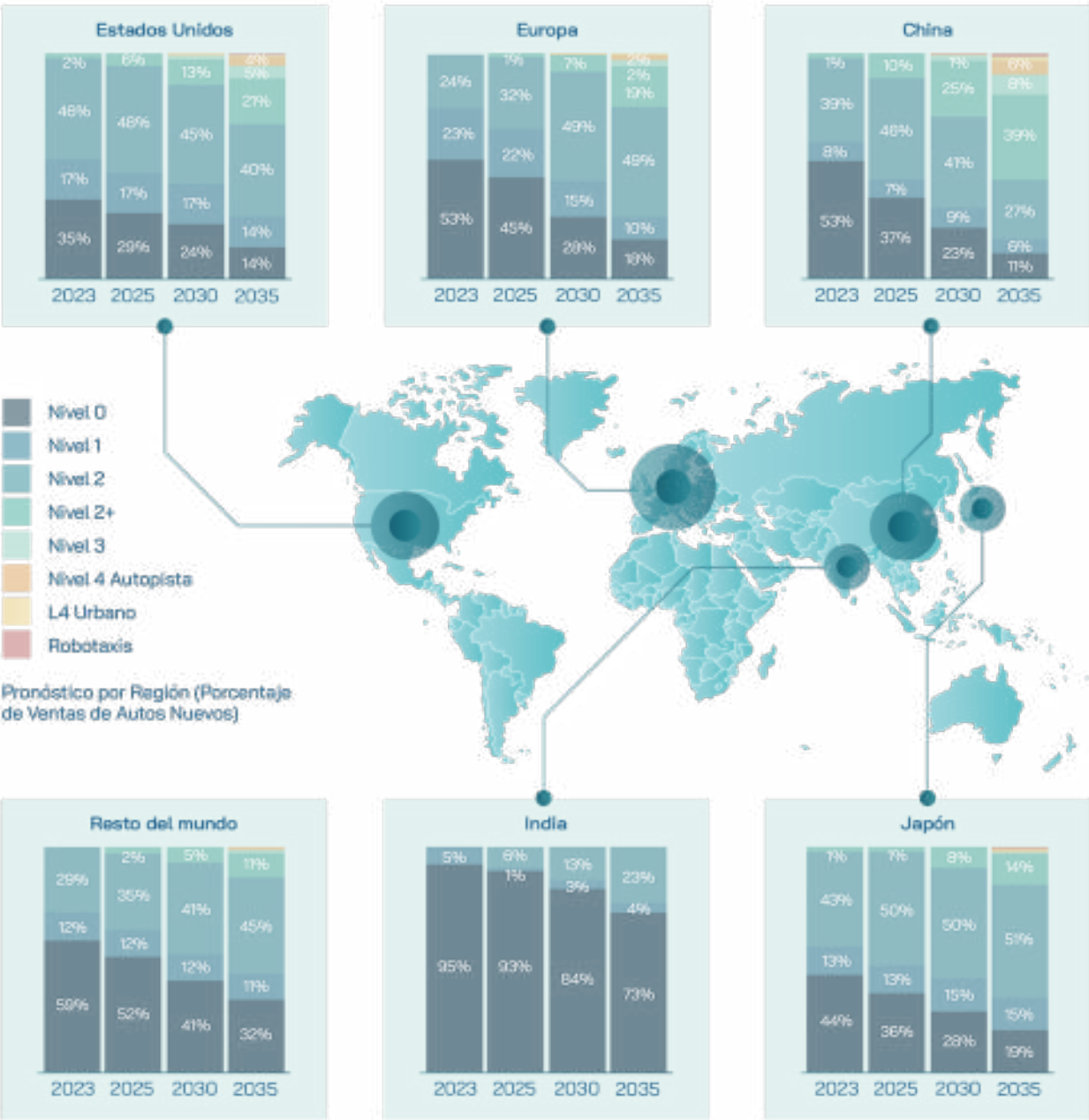
Europa, junto con WeRide, un experimento en carretera con dos minibuses autónomos durante el torneo de tenis de Roland-Garros. Recorrieron 1.000 kilómetros y transportaron a casi 700 personas. Ya se están llevando a cabo nuevos experimentos en toda Europa, como en Zúrich (Suiza), Valence (Francia) y Barcelona.

Como hemos comentado ya en el primer capítulo, a favor de la expansión de los vehículos autónomos juegan los buenos datos en cuanto a siniestralidad, que se cobra 1,2 millones de vidas en las carreteras. Las redes sociales muestran accidentes con robotaxis extravagantes, como el que afectó a una orquesta de trompetas en el estacionamiento de Waymo en agosto de 2024. Pero el Departamento de Vehículos a Motor (DMV) de California mantiene registros de todas las colisiones con vehículos autónomos y la realidad es que, entre enero de 2019 y julio de 2024, se presentaron 600 informes y sólo en 29 ocasiones se pudo atribuir la culpa a un conductor artificial. En el 95% de los casos²⁷, la responsabilidad fue humana, un porcentaje ampliamente aceptado para los accidentes de tráfico causados personas, mientras que el 5% restante se atribuye a otras causas, como fallos mecánicos, animales salvajes que saltan a la carretera y accidentes imprevistos. Además, en muchas de las 571 colisiones provocadas por las personas, el vehículo autónomo ni siquiera conducía.

Los robotaxis en California recorrieron 5,3 millones de kilómetros sin conductor de seguridad en 2023 y sólo se les puede atribuir responsabilidad en una colisión cada 482.000 kilómetros, frente a los 322.000 kilómetros de los conductores estadounidenses de todo el país, cifra que aumenta a una vez cada 161.000 kilómetros en San Francisco. Un estudio realizado por Swiss Re sobre más de 40 millones de kilómetros de conducción autónoma de vehículos Waymo ha revelado que estos fueron objeto de aproximadamente un 90% menos reclamaciones de seguros en comparación con los vehículos conducidos por personas, incluso los más avanzados²⁸. Se estima que cuando la tasa de penetración de mercado de los vehículos sea del 10%, estos pueden reducir los riesgos de accidentes y lesiones de vehículos en un 50%; cuando la tasa de penetración se mejora al 50%, los riesgos se pueden reducir en un 90%²⁹.

Los conjuntos de datos obtenidos por sensores tam-

Pronóstico de ADAS/AD (Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor / Conducción Autónoma) de automóviles de pasajeros por región



Fuente: WEF / Boston Consulting Group



bién son útiles para determinar la responsabilidad³⁰. Bosch, Continental AG, Denso Corporation, Veoneer, Valeo, Hella, Aptiv, Panasonic, ZF Friedrichshafen AG, Hitachi, Velodyne, Shenzhen Anzhijie Technology, Ibeo Automotive Systems, Ouster, Quanergy Systems, LeddarTech, Luminar, Hesai Tech o Leishen³¹, son algunos de los líderes tecnológicos en el ámbito de los sensores para vehículos autónomos y la lista no deja de crecer. Como se ha dicho en el primer apartado del capítulo, el LiDAR, que utiliza luz para medir distancias entre objetos, se ha considerado durante mucho tiempo la más precisa de las tecnologías de detección, ya que proporciona mapas tridimensionales de alta resolución en prácticamente cualquier condición climática³². Su balance en frenadas de emergencia, detección de peatones y prevención de colisiones es insuperable. Sin embargo, tiene un precio de tres a cinco veces superior al del radar, que se está posicionando cada vez más como alternativa.

El cambio reciente tiene que ver con los problemas de resolución del radar. Ahora, está prácticamente a la par gracias a la mayor apertura del radar más reciente, que también cuenta con ecolocalización y aplica el principio de medición del tiempo de vuelo, como hace el LiDAR. Con esto, crea imágenes de nube de puntos del entorno del vehículo. Para habilitar las nuevas funciones, los sistemas de radar pasaron a utilizar conjuntos de antenas de entrada y salida múltiple (MIMO) que permiten el mapeo de alta resolución.

Sin embargo, más allá de los riesgos físicos hay otro tipo de amenazas en el ámbito cibernético que pueden condicionar también la expansión de los vehículos autónomos. Si son atacados por hackers podrían alterarse los comportamientos normales de conducción y causar problemas de seguridad³³. Se espera que los ataques potenciales más graves sean aquellos que inciden sobre los sistemas globales de navegación por satélite de los vehículos y los que buscan confundir los sistemas operativos de los vehículos con información falsa, para dirigirlos a destinos incorrectos o por rutas de conducción inestables. En menor medida, se teme la posible fuga de datos. Al registrar todo lo que sucede dentro y alrededor de ellos, para proporcionar servicios personales de movilidad compartida, los vehículos autónomos tienen incidencia en el ámbito de la privacidad. Registran y evalúan datos de los usuarios, incluida la frecuencia de uso del servicio, el tiempo medio de viaje o los lugares visitados frecuentemente, y les identifican a través de números de teléfono móvil, reconocimiento facial y huellas dactilares.

Los avances tecnológicos que van a ir aterrizando en el mercado los próximos años marchan también a favor de la conducción autónoma. En el caso del nuevo ciclo de IA generativa (GenAI), los modelos de extremo a extremo (E2E) están reemplazando a los sistemas tradicionales basados en reglas que gestionan con dificultades la complejidad de la conducción en el mundo real. Al crear datos sintéticos, la GenAI ayuda significativamente al entrenamiento de sistemas autónomos, dado que la recopilación de datos en el mundo real es costosa e incompleta. Asimismo, la IA está fortaleciendo

la colaboración hombre-máquina mediante sistemas de monitorización del conductor (SDM) e interfaces (HMI) mejorados dentro del vehículo, que permiten comandos de voz más intuitivos y controles adaptativos.

Desarrollar los algoritmos de IA adecuados exige, no obstante, miles de millones de euros de inversión en I+D, y deben planificarse y adaptarse al entorno de conducción único de cada ciudad. A ello se suma, en el caso europeo, que los sistemas de IA implementados en vehículos autónomos, o en conexión con ellos, se clasifican como sistemas de IA de alto riesgo conforme a la Ley de IA de la UE si afectan a la conducción y la seguridad de los pasajeros. Está exigencia se aplicará, en todo caso, a través del Reglamento Marco de Homologación de Tipo (TAFR)³⁴ y el Reglamento General de Seguridad (GSR)³⁵, ambas normas forman parte de la legislación sectorial, que queda modificada para ello en virtud de la Ley de IA³⁶.

En EEUU, no existen estándares ni directrices nacionales, lo que permite a los Estados determinar los suyos propios. Las leyes de responsabilidad del producto intervienen hoy cuando ocurren accidentes y su interpretación depende de múltiples factores, especialmente si el vehículo se operaba adecuadamente para su nivel de automatización. China ha emitido el Proyecto de Propuesta de Enmiendas a la Ley de Seguridad Vial que regula los requisitos de prueba y aprobación, así como la asignación de responsabilidad cuando ocurren accidentes o infracciones³⁷.

Las tecnologías actuales de conducción autónoma, especialmente las relacionadas con la percepción y la predicción, se han beneficiado enormemente de los avances en visión artificial³⁸. Sin embargo, persisten dificultades en muchas dimensiones, como la gestión de entornos complejos y rápidamente dinámicos, la explicación de las decisiones y el seguimiento de instrucciones humanas. A menudo, los ojos artificiales no logran comprender el contexto y eso limita el avance hacia una conducción autónoma más avanzada. La aparición de los LLM (modelos de lenguaje extenso) y los VLM (modelos de visión-lenguaje) ofrecen posibles soluciones. Por ejemplo, los modelos de visión a gran escala actuales suelen contener miles de millones de parámetros, lo que hace que tanto el ajuste fino como la inferencia consuman muchos recursos y no sean compatibles con

los requisitos de tiempo real. La tecnología de ajuste fino con eficiencia de parámetros (PEFT) podría reducir el número de parámetros entrenables.

En cuanto a la gestión de las decisiones del vehículo autónomo, la fórmula óptima será híbrida: el vehículo debe adoptar las medidas críticas en tiempo real, mientras que el análisis de datos y las actualizaciones de modelos deben permanecer en la nube. Hay que resolver todavía cuestiones como la arquitectura del software y los requisitos de hardware para la aplicación de grandes VLM, considerando que es imposible determinar la causa específica de un accidente de tráfico a partir de una sola imagen. Además, el fenómeno de la alucinación de los modelos de lenguaje extenso autorregresivos plantea serios desafíos para las aplicaciones prácticas³⁹ y alimenta el debate ético sobre la atribución de la responsabilidad en caso de accidente.

El grado de sofisticación en el uso de la IA tendrá incidencia en el impacto de los vehículos autónomos en el medio ambiente. Se prevé que una conducción ecológica reduzca el consumo de energía hasta en un 20%. Las mejoras en la prevención de colisiones, debido a las mayores prestaciones en materia de seguridad, pueden aligerar el peso y el tamaño de los vehículos autónomos, lo que podría disminuir el consumo de combustible entre un 5 y un 23%⁴⁰. El dimensionamiento correcto del vehículo, es decir, su adaptación a determinadas necesidades y usos, podría añadir también otro 21-45% de ahorro. Aunque suene paradójico, la conducción autónoma podría incrementar el flujo de vehículos en aproximadamente un 15%, pero reducir al mismo tiempo la congestión del tráfico en un 30%⁴¹, con la consiguiente bajada del consumo de combustible en hasta un 4%. Hay quienes creen, sin embargo, que esto se convertirá un acicate para incrementar el número de kilómetros recorridos por vehículo, lo que nos devolvería al punto inicial. Por último, los modelos de estacionamiento inteligente también contribuirán a ahorrar combustible al minimizar los tiempos de búsqueda de espacios libres.

A raíz de la entrada en vigor de la Ley de Vehículos Automatizados de Reino Unido, prevista para la primavera de 2026, se han analizado los aspectos colaterales a la expansión de una tecnología que obliga a replantear muchos de nuestros actuales paradigmas. Por ejemplo, la eliminación de la necesidad de conductores humanos⁴² y de los correspondientes empleos podría reducir significativamente los costes laborales⁴³. Asimismo, los vehículos autónomos podrían operar 24/7, y eso transforma todo el panorama logístico y podría propiciar, entre otras cosas, un incremento de la demanda de comercio electrónico⁴⁴.

En clave social, los vehículos autónomos ofrecen un potencial de mejora sustancial para las personas desatendidas por el sistema de transporte público actual o que sufren barreras de movilidad. En el Reino Unido, el 25% de la población presenta dificultades de movilidad, son personas que tienen miedo de usar el metro y no viajan en coche para no conducir solos, por lo que están prácticamente condenados a quedarse en casa. Muchas ciuda-



des, incluso las de más de 20 millones de habitantes, no pueden permitirse sistemas ferroviarios en toda la malla urbana y dependen de pequeños autobuses de servicio público. En Alemania, se estima que se necesitarán 80.000 conductores de autobús en 2030. Se podría reemplazar la antigua tecnología de sistemas ferroviarios (metro, tranvía, tren ligero, etc) por servicios 24/7 con un coste base de apenas la mitad del que tienen los sistemas de transporte público actuales⁴⁵.

La movilidad compartida permite a los consumidores acceder a diversos modos de transporte según sus necesidades⁴⁶. A medida que el coste de oportunidad disminuya, la población podrá optar por vivir más lejos de los centros urbanos, lo que podría aumentar el valor de las propiedades periféricas e impulsar a la expansión urbana. Empresas e individuos tendrán más facilidades interactuar entre ubicaciones y beneficiarse de la concentración espacial de las economías de aglomeración⁴⁷. Todo ello obligará a pensar en cambios en la planificación urbana y en la infraestructura actuales, en particular en la digital que es la que debe habilitar carriles designados, sistemas de tráfico inteligentes y estructuras de carga.

En un futuro, durante la conducción autónoma, se espera que los pasajeros puedan realizar una amplia variedad de actividades que ahora no son posibles dentro del vehículo, como ver películas, beber, usar ordenadores portátiles y comprar. Las empresas relevantes del sector TIC, la industria del entretenimiento, el retail o los medios de pago *online* están analizando ya a fondo las oportunidades que abre esta nueva plataforma que mantiene durante largos periodos de tiempo *cautivos* a sus potenciales usuarios. En paralelo, el diseño del espacio interior de los vehículos está en proceso de revisión a fondo: nuevas posibilidades inmersivas para la realidad virtual y aumentada integradas en ventanas y salpicadero confluyen en la mesa de operaciones con mobiliario hasta ahora impensable, como mesas de trabajo, nuevos sistemas de acceso y la desaparición de componentes que pueden ir perdiendo sentido, desde los pedales hasta el espejo retrovisor.

La penetración de las empresas tecnológicas en el mercado de la movilidad compartida⁴⁸, con soluciones de detección, inteligencia artificial, comunicación, navegación y datos geoespaciales de alta definición, además de sistemas de software, chips y unidades de procesamiento gráfico (GPU) para vehículos, así como aplicaciones de entretenimiento, supone todo un desafío para la industria auxiliar del automóvil. La Comisión Europea promueve una alianza para que los fabricantes compartan tecnologías que fomenten el desarrollo de vehículos autónomos, en paralelo a su apoyo a los eléctricos⁴⁹, y pretende fortalecer las cadenas de suministro, especialmente en el ámbito de las baterías para vehículos eléctricos⁵⁰. Quiere evitar depender de los proveedores existentes, especialmente tras la quiebra del principal desarrollador nacional de baterías, Northvolt.

Una industria en pruebas, pendiente de la regulación

ESPAÑA

La Estrategia de Seguridad Vial 2030 define manifiesta la intención de que España se convierta en laboratorio de pruebas del vehículo autónomo, “y se logre un avance significativo en la regulación y las condiciones de base necesarias, tanto en los vehículos como en las vías para poder implantar progresivamente una conducción automatizada segura”, según se recoge en el proyecto de Real Decreto para vehículos totalmente automatizados cuya aprobación se encuentra en curso. El Gobierno prevé la creación de una oficina o ventanilla única para la gestión de las solicitudes de pruebas, así como de un sistema de certificación de vehículos autónomos, basado en la acreditación del cumplimiento de los preceptos del Reglamento General de Circulación.

En junio de 2025 se dio a conocer el Programa Marco de Evaluación de la Seguridad y Tecnología de Vehículos Automatizados (Programa ES-AV)⁵¹, que establece un código nacional para los ensayos y operaciones con vehículos automatizados, o conducidos de forma remota, desde prototipos a pre-homologación. El objetivo es avanzar en la definición de la política de circulación segura y de certificación, y el Centro Gestor del Programa ES-AV (CG-ES-AV), perteneciente a la Subdirección General de Gestión de la Movilidad y Tecnología de la Dirección General de Tráfico, se ha configurado como el órgano encargado de gestionar las autorizaciones y admisiones.

Las propuestas pueden dirigirse a la Oficina para la Facilitación de Pruebas de Vehículos Automatizados en vías públicas (OFVA). Ya están disponibles los principales datos de las pruebas y operaciones que han recibido autorización: E-BUSKAR, por ejemplo, realizó prue-

bas con un autobús autónomo en Leganés entre enero y febrero de 2025 y recorrió 279,20 km; Renault probó dos vehículos tipo *shuttle* en Barcelona en marzo y acumuló 141,65 km; ALSA lleva a cabo pruebas en curso con un *shuttle* en el campus de Cantoblanco (UAM), con una duración prevista de dos años; y el CTAG inició pruebas en Sevilla en mayo, también con un *shuttle*, que siguen en marcha.

No obstante, los experimentos de conducción autónoma tienen años de recorrido en nuestro país. En 2022, el CTAG gallego había participado en pruebas en el marco del proyecto europeo 5G-MOBIX, centrado en la tecnología 5G para la Movilidad Conectada y Automatizada avanzada. Los experimentos tuvieron lugar en el corredor Tui-Valença, implicaron a un *shuttle* autónomo 100% eléctrico desarrollado por el centro español y abordaron la adaptación de velocidad (para evitar a un peatón, por ejemplo) y la conducción remota en una situación crítica.

A través de la primera convocatoria del Perte del Vehículo Eléctrico y Conectado (VEC), se han financiado tres proyectos⁵² enfocados a la conducción autónoma y la movilidad conectada, liderados por Renault Group, Ficosa y otro por Avanza Zaragoza. El importe total es, no obstante, de apenas 14,5 millones de euros, con los que resulta complicado movilizar un cambio de modelo productivo. España cuenta con cinco corredores donde se pueden realizar tests de estas tecnologías. Entre las compañías que se posicionan como referentes en el desarrollo del vehículo autónomo en nuestro país destaca también Applus+ IDIADA en la provincia de Tarragona, especializada en la validación de tecnologías de comunicación y sistemas de control en el circuito ADAS/CAV, incluida la protección frente a ciberataques. La división de la alemana Bosch en nuestro país participa también de forma activa en proyectos centrados en sensores avanzados, radares, cámaras y IA, con la mirada puesta en alcanzar el Nivel 3 de autonomía. GMV e Indra están desarrollando tecnologías clave en el proyecto R3CAV, al igual que Abertis a través del proyecto Future World y la empresa guipuzcoana MASERMIC también participan en este sector.

Actualmente, la principal barrera para la circulación de vehículos autónomos en España es la falta de un marco normativo que permita la operación de los niveles 4 o superiores, a pesar de los avances tecnológicos, según ANFAC⁵³. La adecuación de la normativa no corresponde únicamente a nuestro país, sino que debe abordarse a nivel europeo y con estrategias de integración tecnológica que reduzcan el impacto de las fronteras. La mayoría de la oferta comercial de vehículos ligeros, tanto de pasajeros como de mercancías, se concentra en un nivel de automatización 2. Está presente en el 81% de los modelos de turismos disponibles y en el 57% de los modelos de vehículos comerciales ligeros. Destaca la presencia del sistema de advertencia de colisión con peatones y ciclistas (97,9%), aunque no es obligatorio para vehículos ligeros, el sistema de emergencia de mantenimiento de carril (ELKS) (96,1%) y el asistente de velocidad inteligente (ISA) (94,6%). Para el

transporte de mercancías, un 71% de los modelos de la oferta de vehículos industriales un nivel 2 de autonomía, mientras que en el caso de los autobuses, la mayoría de la oferta comercial se concentra todavía en un nivel de automatización 1.

Progreso en la conducción autónoma, 2025-2040



Relación de notas

¹ Martínez, M. (2022) El Estiércol de Caballo Que redefinió La Arquitectura - blog FerroviaL, FerroviaL. Disponible en:: <https://blog.ferroviaL.com/es/2022/10/estiercol-caballo-redefinio-arquitectura/#:~:text=Y%20lo%20mismo%20ocurr%C3%ADa%20en,caballos%20de%201300%20establos%20diferentes>. (Consultado el 20/06/2025).

² Litman, T. (2025) Autonomous Vehicle Implementation Predictions, Victoria Transport Policy Institution. Disponible en: <https://www.vtpi.org/avip.pdf> (Consultado el 20/06/2025).

³ Autonomous vehicles: Timeline and roadmap ahead (2025) World Economic Forum. Disponible en: <https://www.weforum.org/publications/autonomous-vehicles-timeline-and-roadmap-ahead/> (Consultado el 20/06/2025).

⁴ Rangwala, S. (2022) Thermal cameras gain acceptance for Adas and autonomous cars, Forbes. Disponible en: <https://www.forbes.com/sites/sabbirrangwala/2022/10/28/thermal-cameras-gain-acceptance-for-adas-and-autonomous-cars/> (Consultado el 20/06/2025).

⁵ Saveliev, V. (2025) ‘New tendencies in LIDAR technology for Autonomous Vehicles and other applications’, Autonomous Systems: Sensors, Processing, and Security for Ground, Air, Sea, and Space Vehicles and Infrastructure 2025, p. 2. doi:10.1117/12.3053382. (Consultado el 20/06/2025).

⁶ Edwards, C. (2025) US safety regulators contact Tesla over erratic robotaxis, BBC News. Disponible en: <https://www.bbc.com/news/articles/cg75zv4gny2o> (Consultado el 25/06/2025).

⁷ Rose, I. (2025) The slow but steady advance of driverless vehicles, BBC News. Disponible en: <https://www.bbc.com/news/articles/cly41yx9w88o> (Consultado el 20/06/2025).

⁸ Symonds, D. (2019) Mayor launches Ottawa L5 autonomous vehicle test track, ADAS & Autonomous Vehicle International. Disponible en: <https://www.autonomousvehicleinternational.com/news/testing/mayor-launches-ottawa-l5-autonomous-vehicle-test-track.html> (Consultado el 20/06/2025).

⁹ Martínez, P. (2024) Los taxis sin conductor Afrontan Su Extensión total por EEUU, y el ‘culpable’ es un español, elconfidencial.com. Disponible en: https://www.elconfidencial.com/motor/nueva-movilidad/2024-10-10/hyundai-ioniq-waymo-taxi-autonomo-robotaxi-jaguar-zeekr-jose-munoz_3979422/ (Consultado el 20/06/2025).

¹⁰ Abdel-Aty, M., Ding, S. A matched case-control analysis of autonomous vs human-driven vehicle accidents. Nat Commun 15, 4931 (2024). DOI: 10.1038/s41467-024-48526-4

¹¹ “Autonomous Vehicles: Timeline and Roadmap Ahead”, World Economic Forum / Boston Consulting Group, 24 de abril de 2025

¹² “The Autonomous Vehicle Market Is Forecast to Grow and Boost Ridesharing Presence”, Goldman Sachs, 3 de julio de 2025

¹³ www.legislation.gov.uk/ukpga/2024/10/contents/enacted

¹⁴ “Self-driving vehicles set to be on roads by 2026 as Automated Vehicles Act becomes law”, Gobierno de Reino Unido, 20 de mayo de 2024

¹⁵ news.gm.com/home.detail.html/Pages/news/us/en/2024/de-c/1210-gm.html

¹⁶ Graham Hope, “Autonomous Vehicles: The Outlook for 2025”, IoT World Today, 27 de diciembre de 2024

¹⁷ “Mastering mobility: autonomous vehicles and EU-alignment”, EIT Urban Mobility, 6 de diciembre de 2024

¹⁸ digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/cross-border-corridors

¹⁹ eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/2144/oj

²⁰ eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2022/1426/oj

²¹ Jeremy Carlson, Brock Walquist, “A More Practical Future for Autonomous Vehicles”, S&P Global, 31 de enero de 2025

²² Derek Chiao et al. “Autonomous vehicles moving forward: Perspectives from industry leaders”, McKinsey, 5 de enero de 2024

²³ “Autonomous driving”, Roland

Berger, 30 de octubre de 2024

²⁴ Clément Chamboulive, “AI-powered autonomous driving: global expansion and regulatory support”, Robeco, 5 de marzo de 2025

²⁵ Goldman Sachs, 2025

²⁶ media.renaultgroup.com/autonomous-vehicles-for-public-transportation-the-growing-interest-of-local-authorities-and-mobility-operators-in-renault-groups-approach/

²⁷ James Jeffs, “Autonomous Vehicle Industries Now and in 10 Years”, IDTechEx, 20 de noviembre de 2024

²⁸ Di Lillo, L. et al., Do Autonomous Vehicles Outperform Latest-Generation Human-Driven Vehicles? A Comparison to Waymo’s Auto Liability Insurance Claims at 25.3M Miles, Swiss Re / Waymo, diciembre de 2024

²⁹ Lin Tu, Min Xu, An Analysis of the Use of Autonomous Vehicles in the Shared Mobility Market: Opportunities and Challenges, Sustainability, 8 de agosto de 2024, doi.org/10.3390/su16166795

³⁰ Amolika Sinha et al. Crash and disengagement data of autonomous vehicles on public roads in California, Sci Data., 23 de noviembre de 2021, 10.1038/s41597-021-01083-7

³¹ www.linkedin.com/pulse/global-autonomous-vehicle-sensors-market-growth-future-outlook-nhdkf/

³² Stefan Dobler, Victor Kondel, “LiDAR And Radar Battle For

Autonomous Vehicle Turf”, Oliver Wyman, julio de 2023, consultado el 11/07/2023

³³ Han Wu et al. Adversarial Driving: Attacking End-to-End Autonomous Driving, 2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 27 de julio de 2023, DOI: 10.1109/IV55152.2023.10186386

³⁴ eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02018R0858-20230730

³⁵ eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02019R2144-20220905

³⁶ Osman Gazi Güçlütürk, Bahadır Vural, “Driving Innovation: Navigating the EU AI Act’s Impact on Autonomous Vehicles”, Holistic AI, 20 de marzo de 2024

³⁷ www.china.org.cn/china/2021-04/04/content_77376009.htm

³⁸ Xingcheng Zhou et al. Vision Language Models in Autonomous Driving: A Survey and Outlook, IEEE, 16 de mayo de 2024, 10.1109/TIV.2024.3402136

³⁹ L. Huang et al., A survey on hallucination in large language models: Principles, taxonomy, challenges, and open questions, ACM Transactions on Information Systems, enero de 2024, doi.org/10.1145/3703155

⁴⁰ css.umich.edu/sites/default/files/2024-10/Autonomous%20Vehicles_CSS16-18.pdf

⁴¹ Xujun Wang, An Analysis of

the Future Trends and Challenges of Autonomous Driving Technology, Proceedings of the 2nd International Conference on Machine Learning and Automation, 8 de noviembre de 2024, doi.org/10.54254/2755-2721/104/20241087

⁴² Alexandros Nikitas, Alexandra-Elena Vitel, Corneliu Cotet, Autonomous vehicles and employment: An urban futures revolution or catastrophe?, Cities, julio de 2021, doi.org/10.1016/j.cities.2021.103203

⁴³ Jeremy Webb, The future of transport: Literature review and overview, Economic Analysis and Policy, marzo de 2019, doi.org/10.1016/j.eap.2019.01.002

⁴⁴ Heleen Buldeo Rai, Sabrina Touami, Laetitia Dablan, Autonomous e-commerce delivery in ordinary and exceptional circumstances. The French case, Research in Transportation Business & Management, diciembre de 2022, doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100774

⁴⁵ Anja Huber et al. "Autonomous vehicles: The future of European transport?", McKinsey, 23 de junio de 2025

⁴⁶ Lin Tu, Min Xu, An Analysis of the Use of Autonomous Vehicles in the Shared Mobility Market: Opportunities and Challenges, Sustainability, 8 de agosto de 2024, doi.org/10.3390/su16166795

⁴⁷ Daniel J. Graham, Stephen Gibbons, Quantifying Wider Economic Impacts of agglomeration for transport appraisal: Existing evidence

and future directions, Economics of Transportation, septiembre de 2019, doi.org/10.1016/j.ecotra.2019.100121

⁴⁸ León, L.F.A., Aoyama, Y. Industry emergence and market capture: The rise of autonomous vehicles. Technol. Forecast. Soc. Chang., julio de 2022, doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121661

⁴⁹ Nick Flaherty, "EU alliance to push driverless vehicle technologies, large scale pilots", eenewseurope.com, 3 de marzo de 2025

⁵⁰ Chris Rosamond, "Europe proposes big push on self-driving vehicles, and measures to boost EV demand", autoexpress, 3 de marzo de 2025, consultado el 10/07/2025

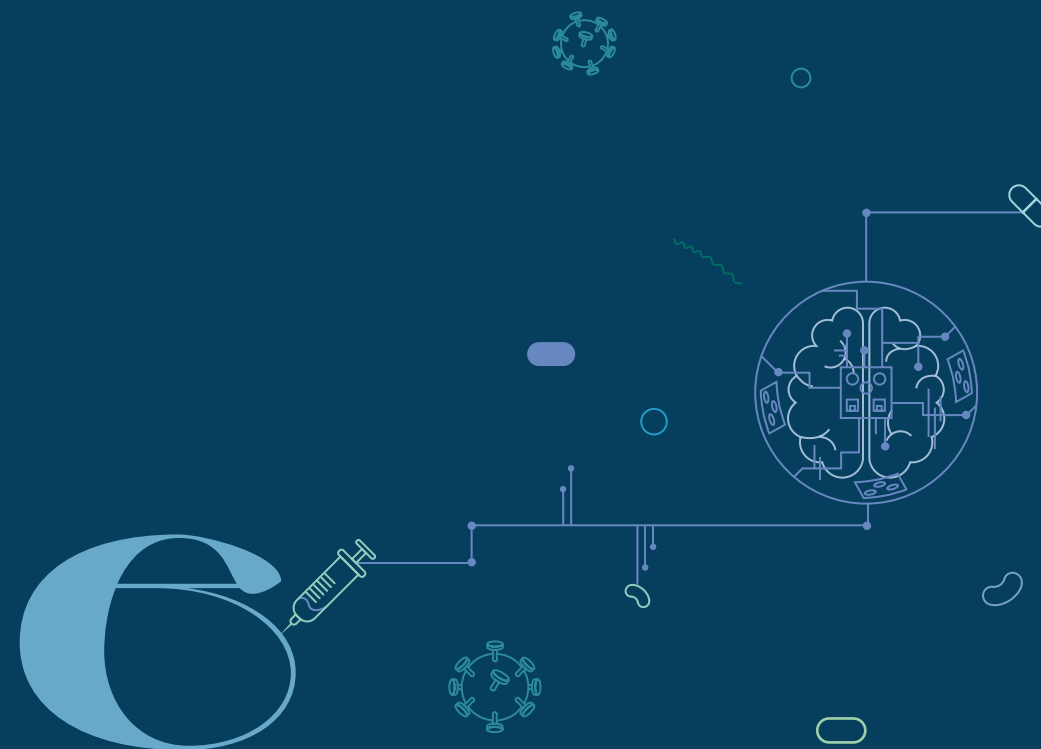
⁵¹ www.dgt.es/muevete-con-seguridad/vehiculos-segueros/conduccion-automatizada/marco-pruebas-vehiculos-automatizados/

⁵² Diego Estebanez, "España acelera en la carrera por el coche autónomo a la espera de cambios en la normativa", El Economista, 15 de agosto de 2025

⁵³ "Barómetro Vehículo Autónomo y Conectado 2024", ANFAC, noviembre de 2024



08 Inteligencia artificial en el descubrimiento de antibióticos



Introducción

La resistencia a los antibióticos es uno de los grandes problemas del siglo XXI. Desde que comenzara su utilización masiva alrededor de los años 50, estos medicamentos han logrado que algunas enfermedades mortales de necesidad pasen a ser meros inconvenientes que apenas duran unos días. Sin embargo, su uso indiscriminado ha provocado una reacción por parte de los patógenos. En la actualidad, un número cada vez mayor de microorganismos se han vuelto resistentes a estos mismos antibióticos, y parece que evolucionan más rápido que el tiempo en el que la humanidad desarrolla nuevas fórmulas.

En este preocupante escenario, la inteligencia artificial puede aportar a los humanos una ventaja tanto a la hora de crear como de buscar nuevas moléculas con potencial antibiótico. Gracias al análisis masivo de datos y a una gran comprensión de las interacciones químicas entre sistemas biológicos, el futuro del desarrollo antibiótico parece que va a transcurrir en gran parte en el interior de servidores de datos. Aunque existen muchas promesas a la hora de generar nuevas moléculas, esta innovación debe tener muy presentes sus limitaciones, ya que de ellas depende uno de los tres grandes pilares de la humanidad: la salud.

Algoritmos para combatir a las superbacterias

POR DENTRO

Los compuestos antibióticos se conocen desde hace miles de años. Ya en el papiro de Ebers, datado en el año 1.550 a.C. se recogen remedios y cataplasmas que contienen sustancias con poderes antibióticos. Ahora bien, en estos textos antiguos los poderes medicinales de las hierbas y los hongos se atribuyen más al poder de los curanderos y los ritos empleados que a los compuestos presentes en las mezclas. En aquella época las enfermedades eran misterios demoníacos, provocados por seres malévolos que se introducían en el cuerpo y se alojaban en diversos órganos y tejidos, causando el dolor y los males.

Este pensamiento continuó influyendo en la medicina durante siglos. Sin embargo, con la invención del microscopio por parte del comerciante neerlandés Anton van Leeuwenhoek en 1676 nació la microbiología, es decir, una ventana a un nuevo mundo de seres que escapaban al sentido de la vista humana. Tras dos siglos de investigación microbiológica e innumerables experimentos, los científicos empezaron a comprender que estos microorganismos podían tener un gran impacto en la salud. Las enfermedades pasaron de ser cosa de hechizos y espíritus y adquirieron una dimensión más terrenal. Este importante cambio de mentalidad que fue posible gracias a nombres conocidos como Louis Pasteur, su esposa Marie Anne Laurent, Joseph Lister o Robert Koch. Gracias a ellos se sentaron las bases de la microparasitología y se estableció que ciertos microorganismos eran capaces de producir enfermedades. Es decir: se puso nombre y apellidos a los enemigos con los que había que acabar para curarse de una enfermedad infecciosa.

Tras este chocante descubrimiento, comenzaron los ex-

perimentos con compuestos químicos y biológicos para atacar a dichos microorganismos. Uno de los avances importantes ocurrió el 17 de diciembre de 1897, cuando el joven investigador Ernest Duchesne presentó su tesis con título «*Contribución al estudio de la competencia vital entre microorganismos: antagonismo entre mohos y microbios*». En dicha tesis, dirigida por Gabriel Roux, discípulo de Pasteur, Duchesne pudo observar cómo el hongo *Penicillium glaucum* evitaba el crecimiento bacteriano.

Pero Duchesne fue un paso más allá. Durante su tesis, inoculó bacterias letales para cobayas como *E.coli* y *Staphylococcus typhy* (causante de la fiebre tifoidea) junto con el hongo *P.glaucum*. Su sorpresa fue que, aquellos animales en los que había realizado la doble inoculación sobrevivían a la enfermedad, mientras que aquellos infectados sólo con la bacteria morían a los pocos días. Lamentablemente, Duchesne no pudo identificar la sustancia antibiótica y decidió abandonar sus estudios por la carrera militar. Al igual que otros descubrimientos, su tesis, tan prometedora, quedó olvidada en un cajón.

Hasta que en 1928, al volver de sus vacaciones, el doctor Alexander Fleming tuvo su momento de serendipia. Cuando regresó al laboratorio notó que algunos de los cultivos bacterianos de *Estafilococcus* que había dejado a su ida se habían contaminado con hongos. En vez de tirar inmediatamente las placas, Fleming observó que, alrededor de los lugares donde estos hongos habían crecido, había una sustancia a la que Fleming denominó «jugo de moho», que impedía el crecimiento bacteriano. Esa sustancia era la penicilina, y pasaría a convertirse en uno de los descubrimientos médicos más importantes de la historia¹. Posteriormente, en 1942, los investigadores Howard Walter Florey y Ernst Boris Chain idearon un sistema que permitía extraer la penicilina en cantidad suficiente como para aplicarla a pacientes. El novedoso medicamento fue clave durante el contexto bélico de la segunda guerra mundial, ya que permitió tratar infecciones en el campo de batalla y en hospitales de campaña que, de otro modo, habrían sido mortales para los soldados. Tal fue el éxito de la penicilina que, una vez finalizada la guerra, pasó a formar parte del arsenal de los médicos en hospitales de todo el mundo, dando lugar a la era de los antibióticos.

Rápidamente, los investigadores notaron que la penicilina no era una panacea, sino que existen especies de microorganismos contra los que esta sustancia no tiene ningún efecto. Y lo que es peor, también pudieron observar cómo aparecían cepas resistentes a la penicilina de especies previamente sensibles². Por ello comenzó una búsqueda de nuevos antibióticos que bien podían encontrarse de forma natural, bien podían sintetizarse a partir de los conocimientos de química. Pero esta solución era temporal, ya que en breve también empezaron a aparecer microorganismos resistentes también a los nuevos antibióticos³.

Estas poblaciones resistentes surgen debido al azar en la genética intrínseca a la vida. En una población de bacterias existen colonias que son ligera-

mente distintas unas de otras. Algunas de ellas pueden tener en su ADN la capacidad de utilizar otras fuentes de alimentos, otras de engancharse mejor a las superficies y, en cuanto al tema que nos concierne, existe la posibilidad de que algunas contengan la información para expulsar o degradar y, por tanto, inactivar, ciertos antibióticos.

Cuando se utiliza un antibiótico para tratar una enfermedad, todas las poblaciones de bacterias patógenas sensibles al antibiótico mueren y, por tanto, únicamente quedan las colonias resistentes. Estas, al quedarse sin competencia por los alimentos o el espacio, tienen vía libre para crecer. Así, comienzan a ocupar todo el espacio antes colonizado por una población diversa, lo que da lugar a una segunda infección. Ahora bien, las bacterias presentes en esta segunda oleada descienden de colonias resistentes a los antibióticos y, por tanto, los tratamientos conocidos no funcionarán, lo que complica la curación.

Pero este no es el único método de adquisición de resistencias. También se ha observado que ciertas bacterias pueden transmitir información de forma horizontal, es decir, que una bacteria lo ceda a otra, aunque no sean de la misma especie. Por tanto, una bacteria que ni siquiera sea patógena para humanos podría cederle este gen de resistencia a una que sí lo sea, dando lugar a una bacteria resistente peligrosa para las personas.

De este modo, el uso excesivo de antibióticos, tanto en ganadería como en salud, ha permitido una expansión de los genes de resistencia a antibióticos en diversas especies patógenas humanas. Las más preocupantes se encuentran recogidas en el informe “*WHO bacterial pathogen list*” emitido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y actualizado a 2024. En él, se pueden encontrar 24 patógenos que abarcan 15 familias bacterianas y distintos niveles de resistencia. Entre ellos están la *Salmonella*, causante de la salmonelosis; la *Neisseria gonorrhoeae*, que provoca la conocida enfermedad de transmisión sexual; o la *Pseudomonas aeruginosa*, que puede infectar a prácticamente cualquier tejido. Pero especialmente preocupante es el caso de *Mycobacterium tuberculosis*, causante de la tuberculosis, una enfermedad pulmonar que cuyos casos han aumentado en los últimos años y, en algunos de ellos, con cepas resistentes a todos los antibióticos conocidos⁴.



Como también indica el informe, se estima que en 2019 la resistencia a los antibióticos causó de forma directa 1,27 millones de muertes. Además, estuvo involucrada de algún modo en alrededor de cinco millones de fallecimientos en todo el mundo, un número que supera al total de muertes por otras epidemias como el SIDA o la malaria. Lo realmente crítico es que se estima que el 20% de estas muertes ocurrieron en niños menores de cinco años, una muestra de la gravedad del problema. De seguir esta tendencia, los modelos computacionales advierten de que, en 2050, es posible que fallezcan alrededor de 10 millones de personas al año debido a la resistencia a antibióticos.

Desde su descubrimiento hace alrededor de un siglo, los antibióticos se han cimentado, por consiguiente, como uno de los pilares fundamentales de la sanidad. Y buena prueba de ello es el gran número de antibióticos que se han ido generado a lo largo de los años. Por ello, que haya microorganismos contra los que no funcionen puede suponer todo un reto para el futuro.

En la actualidad existen varias decenas de antibióticos distintos que pueden clasificarse según su mecanismo de acción (cómo afectan a las bacterias), según su espectro de actividad (si sirven para tipos concretos de bacteria o son de amplio espectro), o según su estructura química.

La clasificación por estructura química permite, a su vez, detectar ciertas familias de antibióticos que parten de una misma base, pero que tienen ciertas modificaciones que cambian ligeramente sus aplicaciones. Estas familias se consideran bastante estáticas, ya que, aunque han ido aflorando nuevos miembros en la mayoría de ellas, no se ha descubierto ninguna nueva familia de antibióticos desde 1987⁵. Este hecho es atribuible a cuellos de botella en las formas tradicionales de descubrimiento. Como ya hemos comentado, la mayoría de los antibióticos clínicos tienen su origen en microorganismos que los producen de forma natural en su ciclo de vida.

Por ello, los científicos “de bata” han establecido sinergias con aquellos “de bata” y han ido a los confines del mundo a extraer muestras para encontrar nuevas sustancias. Una vez obtenidas, al caracterizar su estructura química y comprender su mecanismo de acción, se han conseguido crear antibióticos modificados que mantie-

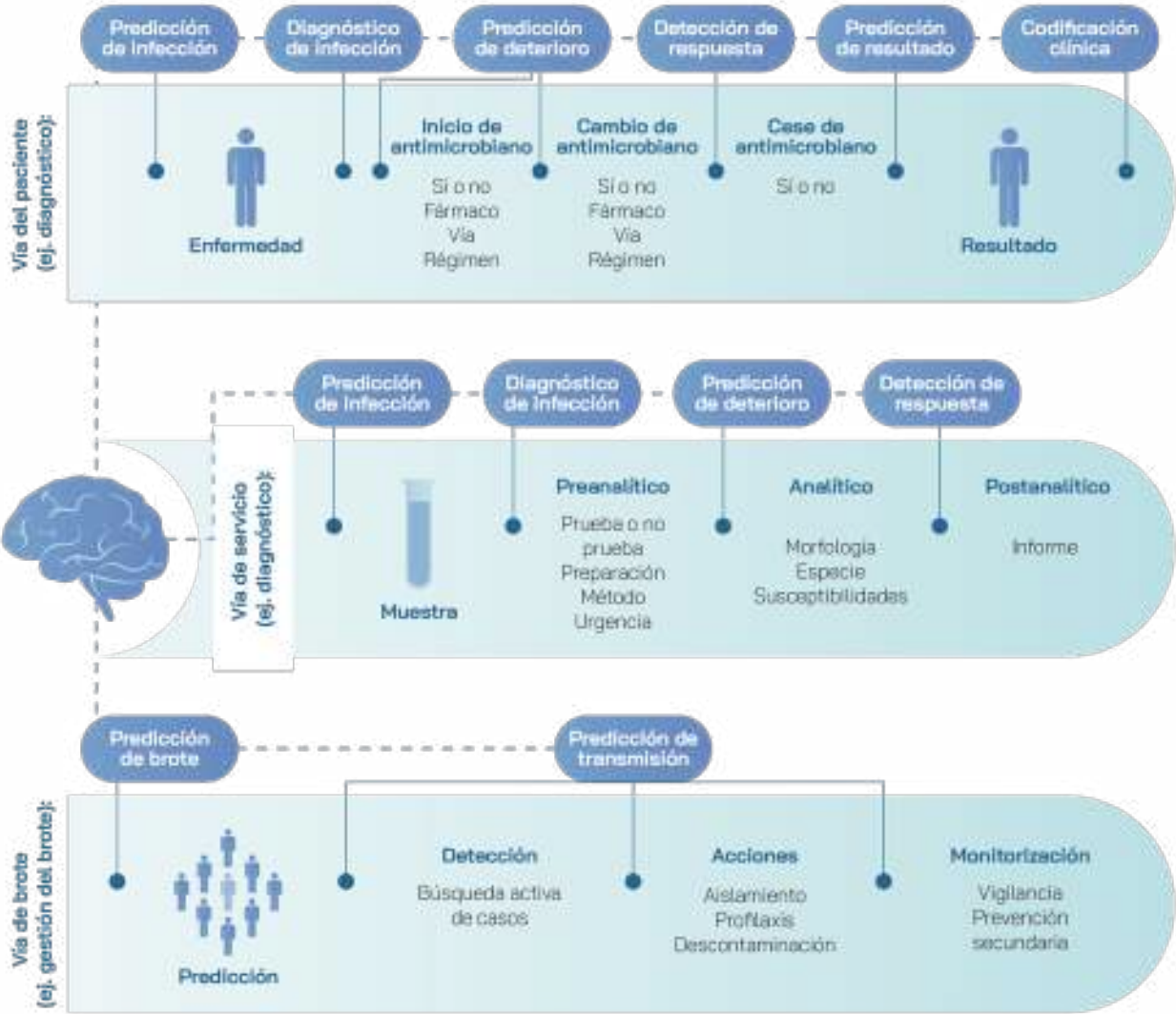
nen su poder bactericida o bacteriostático, pero que tienen menos papeletas para generar resistencias al no ser naturales. Sin embargo, también existen resistencias contra familias completas de antibióticos, lo que supone un reto mucho más complejo de abordar. Por ello, en los últimos años, estas técnicas han caído en desuso y se han ido sustituyendo por cribados de cientos de moléculas basadas en predicción de uniones entre moléculas.

Este método también se denomina farmacología inversa, porque los científicos dan un giro en el camino habitual del conocimiento. En lugar de encontrar un compuesto concreto o una encima y luego buscar en el genoma del hongo o la bacteria el gen concreto, se hace al revés. Es decir, se estudia al detalle el genoma del microorganismo y, se seleccionan posibles dianas para desarrollar compuestos que puedan acabar con él. Esto depende de los conocimientos previos que se tengan de los microorganismos⁶.

Según la OMS, en la actualidad únicamente hay 77 antibióticos en desarrollo, un número insuficiente para abordar el problema de la resistencia de los microorganismos. De esos 77, la mayoría derivan de antibióticos ya existentes, por lo que las bacterias con resistencia podrían adaptar los mecanismos rápidamente. Por tanto, de los 77, se espera que muy pocos lleguen al mercado⁷. Este hecho, sumado a que los expertos opinan que no existe un mercado claro para los antibióticos nuevos, explica que las grandes empresas no tengan un incentivo para desarrollarlos, y que se trate de un riesgo demasiado grande para las pequeñas biotecnológicas. Afortunadamente, el cada vez mayor poder computacional sumado a técnicas de inteligencia artificial (IA) puede darle la vuelta a la tortilla y permitir la creación de antibióticos con propiedades novedosas⁸. En el Gráfico 1 se explica cuáles pueden ser sus grandes aportaciones.

Uno de los métodos de combate de la crisis de los antibióticos ha sido estudiar a fondo los mecanismos de defensa de las bacterias resistentes. Para ello, se han analizado genomas bacterianos, se han aplicado test de susceptibilidad a antibióticos y paneles de actividad bioquímica. Todos estos métodos han recogido una cantidad ingente de datos que pueden ser utilizados para entrenar a una IA. Concretamente para un tipo de IA llamado *machine learning*, que emplea algoritmos estadísticos para identificar relaciones sofisticadas entre datos y extrapola estos resultados cada vez que se añaden datos nuevos. Dentro del *machine learning*, el *deep learning* utiliza redes neurales para procesar datos utilizando nodos interconectados en distintas capas. Estos modelos normalmente están entrenados con datos existentes específicos de una tarea y se utilizan para extraer conclusiones a partir de datos nuevos. Es decir, primero se entrena el modelo para que aprenda a realizar una tarea con datos conocidos y, posteriormente, se le pone a realizar esa tarea con datos desconocidos. Posteriormente, esos datos se comprueban de forma tradicional para comprobar su porcentaje de acierto. De este modo, la IA se puede utilizar para distintos métodos, como el cribado virtual de moléculas, la generación molecular de compuestos y el descubrimiento de más antibióticos de origen natural⁹.

El camino de la inteligencia artificial para combatir las infecciones



Ejemplos de tareas en vías de atención sanitaria relacionadas con infecciones que suelen requerir mucha mano de obra y suponen un desafío computacional y, por lo tanto, podrían presentar oportunidades para que los modelos de inteligencia artificial contra la resistencia a los antimicrobianos aumenten y mejoren los sistemas.

Fuente: The Lancet

El cribado virtual puede ser una alternativa menos costosa y laboriosa que el HTS convencional, ya que aprovecha las técnicas de aprendizaje automático para predecir moléculas novedosas con una propiedad molecular específica, mediante la búsqueda en vastos repositorios químicos *in silico*. Mientras que las campañas de HTS convencionales tienen un límite superior de unos pocos millones de compuestos, los modelos de predicción de propiedades moleculares solo requieren el cribado de miles o decenas de miles de compuestos y, a continuación, pueden aplicarse para cribar virtualmente bibliotecas químicas mucho más grandes, del orden de decenas de millones de compuestos para encontrar los óptimos. Las bases de datos de estas moléculas cada vez son mayores y, en ocasiones, de acceso abierto, para que químicos, biotecnólogos y farmacéuticos puedan sintetizar los compuestos más prometedores¹⁰.

Aunque el cribado molecular es una técnica más potente que las tradicionales, está sujeta a la limitación de las moléculas conocidas y registradas en las bases de datos. Sin embargo, entrenando una IA con nociones de química, esta puede acabar generando moléculas con una estructura posible, pero que está contenida actualmente en ningún ser vivo. De este modo un modelo puede probar la eficacia de estas moléculas novedosas para las que los microorganismos resistentes no tienen respuesta, ya que nunca se han enfrentado a ellas. Entre los mayores avances del campo se encuentra AlphaFold3¹¹, de Google DeepMind, que modela la estructura de complejos que contienen combinaciones de biomoléculas, incluyendo proteínas, ácidos nucleicos, moléculas pequeñas e iones. Es decir, puede comprender cómo van a reaccionar los antibióticos a las distintas estructuras de un microorganismo. El mayor problema de esta técnica suele ser su síntesis. En ocasiones, no conocemos las técnicas necesarias para poder sintetizar las moléculas orgánicas propuestas por la IA. O puede, directamente, que sea imposible sintetizarlas. Por ello, se necesitan guardarraíles para este tipo de IA con los que se ciña a las moléculas que sean posibles.

Finalmente, la IA también puede ayudar a la búsqueda de nuevas fuentes naturales de antibióticos. Con las enormes bases de datos genéticas disponibles en las plataformas virtuales, el minado genético es una muy buena posibilidad para explorar moléculas antibióticas que hayan pasado desapercibidas. Este método cobra especial relevancia para los genomas de especies que no pueden cultivarse en el laboratorio. Al no poder cultivarlas, es necesario introducir los genes de producción del antibiótico en otra especie más manejable mediante ingeniería genética. Una vez cultivado, se puede extraer y testar la eficacia del metabolito concreto. Sin embargo, esta técnica funciona bien para secuencias que producen antibióticos ya conocidos, pero no tanto con aquellos por descubrir, puesto es complicado conseguir que “imaginen” las propiedades de un metabolito prometedor. Por tanto, su implementación es compleja.

La resistencia a antibióticos pone en grave riesgo al sistema de salud actual. Para combatirla, la IA no es una panacea, pero sí un conjunto de po-

tentes herramientas que los seres humanos con experiencia en el campo pueden aprovechar para vencer al auge de las bacterias multirresistentes. En la actualidad, con modelos cada vez más sofisticados, la IA sigue limitada por los datos con los que se entrena el modelo. Afortunadamente, esta limitación va diluyéndose y ha permitido la creación de sistemas que superan a los humanos en el análisis de estructuras moleculares.

Ahora bien, conviene tener en cuenta que, como diría el Dr. Ian Malcolm, querido personaje de Jurassic Park encarnado por Jeff Goldblum, en la película homónima, “la vida se abre camino”. Es decir, que ante los nuevos antibióticos, los microorganismos acabarán desarrollando una resistencia, por lo que conviene desarrollarlos, sí, pero también utilizarlos de forma inteligente para atrasar al máximo este hecho.



Antibióticos posibles con nuevas dianas en desarrollo clínico

Fuente: BIO

1. Síntesis de la pared celular: DrpE1. Existen fármacos en fase clínica que actúan sobre la enzima DrpE1, que desempeña un papel clave en la síntesis de las unidades precursoras de glucolípidos de las paredes celulares de las micobacterias. Los fármacos dirigidos a DRpE1 se encuentran en fases avanzadas y están indicados para *M. tuberculosis*.

2. Lisis de la pared celular por lisinas. Existen bioterapéuticos en fase clínica que utilizan la lisis enzimática para eliminar bacterias. Se usa una lisina de fago purificada para *S. aureus* y lisina purificada específica para *C. difficile*.

3. Lisis de la pared celular por bacteriófagos. Se han iniciado pruebas en humanos de una terapia con fagos para *Pseudomonas aeruginosa* resistente a fármacos. Este enfoque utiliza el proceso de liberación de progenie del ciclo de vida de los bacteriófagos, que libera lisinas para romper la pared externa y la membrana de las bacterias.

4. División celular: Citoesqueleto. El producto proteico bacteriano del gen FtsZ es similar a la tubulina en las células eucariotas, con una función similar en la división celular. Existe al menos un fármaco dirigido a FtsZ en desarrollo, con la designación QIDP.

5. Blanco de superficie: Sistemas de secreción. El sistema de secreción tipo III (SST3) de las bacterias gramnegativas patógenas es una jeringa molecular multiproteica que puede inyectar factores de adhesión e internalización en las células humanas. Ciertos inhibidores del SST3 han demostrado una reducción del

crecimiento. El Ftortiazinón ruso se estudia para su uso en infecciones complicadas del tracto urinario (ITUc) causadas por *P. aeruginosa*.

6. Objetivo de superficie: Endotoxina. La endotoxina es un lipopolisacárido que reside en la superficie celular externa de las bacterias gramnegativas. Dentro de la estructura de la endotoxina se encuentra la fracción Opolisacárido, que ha sido diana de los mAb (anticuerpos monoclonales). Uno de los mAb se encuentra en fase avanzada para la infección por *P. aeruginosa*.

7. Objetivo de superficie: Proteína A. Es una proteína de superficie celular única que interactúa con regiones constantes de anticuerpos humanos. Si bien esto se conoce desde hace más de 40 años y se utiliza para la purificación de mAb, la proteína A es ahora la diana misma para la infección por *S. aureus*. Un anticuerpo específico para la proteína A de *S. aureus* se encuentra en fase avanzada.

8. Objetivo de superficie: Desconocido para mAb. Una proteína de superficie diana desconocida (y probablemente múltiples dianas) es el antígeno de un cóctel policlonal de supervivientes de la infección por *C. difficile*.

9. Objetivo de superficie: FimH. Las bacterias poseen filamentos proteicos que les permiten adherirse a las células huésped. Entre las numerosas subunidades que componen estos filamentos que sobresalen de la superficie celular bacteriana, se encuentra FimH (una proteína de unión de la fimbriamanosa, un apéndice largo que sobresale de la bacteria).

10. Metabolismo energético: citocromo γ . El inhibidor de la ATP sintasa, bedaquilina (*SIRTURO*), fue aprobado en 2012 para la tuberculosis pulmonar multirresistente. Este fármaco de molécula pequeña representa la primera aprobación de un nuevo objetivo en más de 30 años. Otro objetivo dentro de la cadena respiratoria, aguas arriba de la ATP sintasa, es el citocromo cc, una enzima similar al complejo citocromo bc1 presente en las mitocondrias humanas y las bacterias respiratorias. Existe un nuevo fármaco en desarrollo clínico dirigido al citocromo cc de *Mycobacterium*.

11. Metabolismo: Catabolismo del colesterol. Un fármaco de molécula pequeña dirigido al catabolismo del colesterol se encuentra en fase avanzada. Ciertas bacterias, como la *M. tuberculosis*, pueden sobrevivir con colesterol y este candidato podría prevenir eficazmente esta fuente opcional de energía lipídica.

12. Traducción: LeucilARNt sintetasa. Existe un candidato a fármaco para la leucilARNt sintetasa para la *M. tuberculosis*. Actualmente existe otro inhibidor de la ARNt sintetasa aprobado por la FDA, la mupirocina, pero es específico.

13. Traducción: Metionina ARNt sintetasa. La segunda ARNt sintetasa en desarrollo es la metioninaARNt sintetasa, para el tratamiento de *C. difficile*.

14. Síntesis de ADN: ADN polimerasa. Implica a 10 enzimas al menos que trabajan de forma coordinada para sintetizar ADN. La ADN polimerasa III, la enzima principal en el pro-

ceso de síntesis de ADN, sería una nueva diana para esta categoría.

15. Daño al ADN: Edición de Cas3. Esta terapia utiliza bacteriófagos modificados con CRISPRCas3 para atacar a la *E. coli* y destruirla. Se ha probado para infecciones del tracto urinario.

16. ADN: unión directa. Se desarrollan dos NCE (*new chemical entity*) de unión al surco menor del ADN para tratar las infecciones por *C. difficile*.

17. Flora intestinal y del tracto reproductivo. Aunque no es una diana molecular específica, este grupo de bioterapéuticos vivos se dirige a la restauración del microbioma y los ácidos biliares, y se ha demostrado que ejerce presión sobre el crecimiento de *C. difficile* y la vaginosis bacteriana. La mayoría de estas terapias para el microbioma intestinal son consorcios microbianos: dos contienen lactobacillus, dos contienen cepas no tóxicas de *C. difficile* y otras contienen mezclas más complejas de especies bacterianas o variantes clonales patentadas.

18. Diana desconocida para Acinetobacter baumannii. Otra NCE para una diana desconocida es un péptido macrocíclico específico para *A. baumannii* (G), el patógeno de mayor prioridad según los CDC y la OMS. Esta bacteria gramnegativa se asocia con infecciones nosocomiales que afectan el tracto urinario, los pulmones (neumonía), la sangre o las heridas. Se estima que la *Acinetobacter* resistente a carbapenémicos causó 8.500 infecciones en pacientes hospitalizados en Estados Unidos en 2019.

Un campo con mucha investigación y poca industria

EN ACCIÓN

Existen métodos con una larga historia de uso y de eficacia comprobada para descubrir nuevos antibióticos. Desafortunadamente, la mayoría de ellos agotaron sus posibilidades hace décadas, por lo que arrastramos años tratando de encontrar nuevas formas de eliminar estas bacterias¹². La inteligencia artificial (IA) no es nueva en la búsqueda de antibióticos. Antes de la llegada de la IA generativa, los investigadores solían utilizar algoritmos para explorar las bibliotecas de fármacos existentes e identificar aquellos con mayor probabilidad de actuar contra un patógeno determinado. Examinar hasta 100 millones de compuestos conocidos¹³, puede arrojar resultados muy interesantes, pero se queda lejos de rastrear todas las opciones posibles: se estima que existen cerca de 10^{14} moléculas similares a las de los fármacos. También existen muchos algoritmos generativos para el diseño molecular *ex novo*, pero tienden a construir moléculas, átomo por átomo, sintéticamente intratables en un laboratorio¹⁴. La carrera de la innovación sigue abierta. Los avances recientes en la predicción de la estructura de las proteínas y la generación de moléculas impulsada por el aprendizaje automático ofrecen razones convincentes para revisar el diseño racional de fármacos¹⁵.

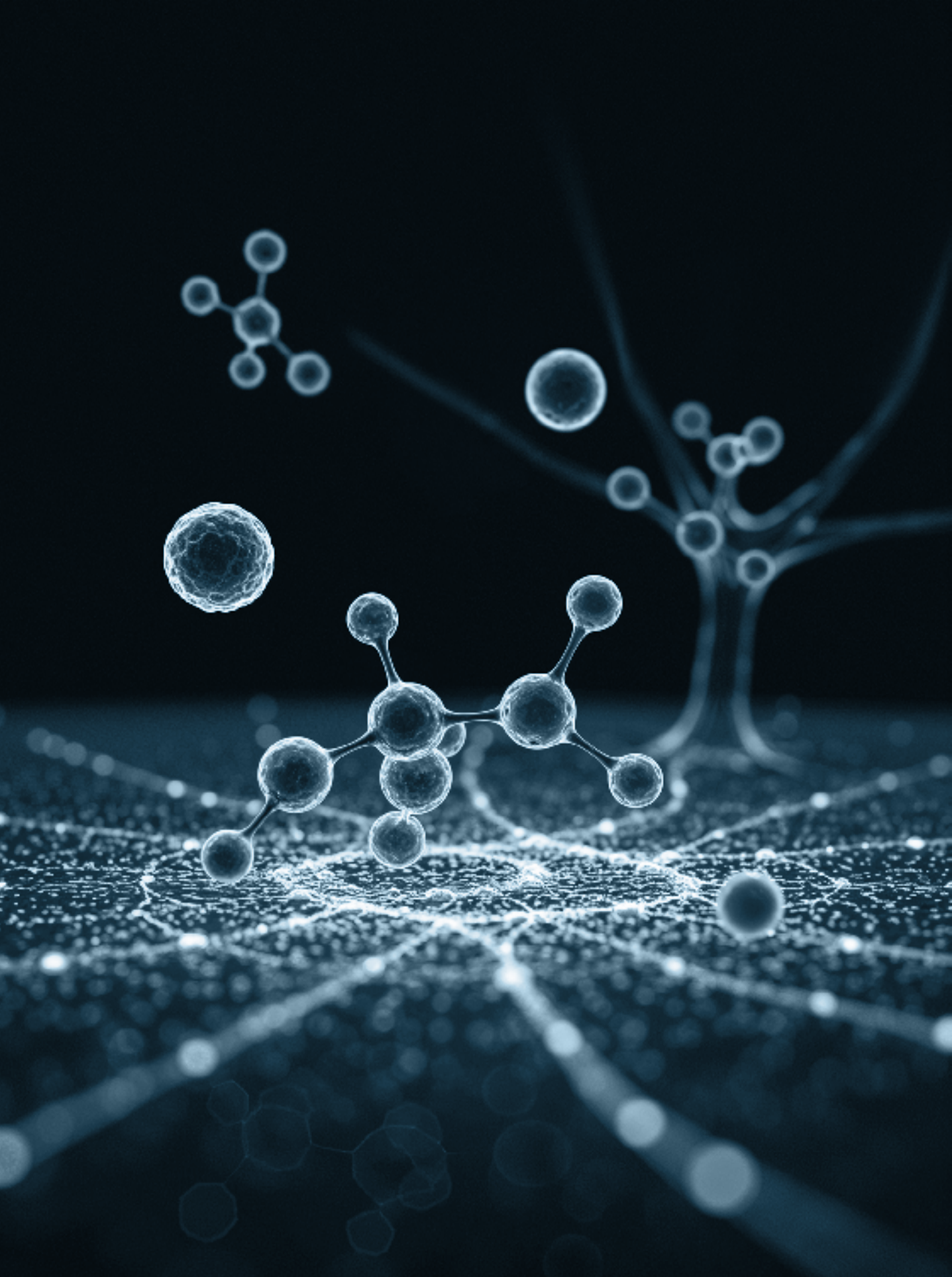
Entre los pioneros del nuevo ciclo de la IA para resolver esa brecha inconmensurable se encuentra un grupo de investigadores de Stanford Medicine y la Universidad McMaster se encuentran. Impulsaron un nuevo modelo, denominado SyntheMol (sintetizador de moléculas)¹⁶, para crear las estructuras y fórmulas químicas de nuevos fármacos destinados a eliminar cepas resistentes de *Acinetobacter baumannii*, uno de los principales

patógenos responsables de muertes relacionadas con la resistencia a los antibacterianos. El objetivo era usar la IA para diseñar moléculas completamente nuevas, nunca antes vistas en la naturaleza¹⁷, con la condición de que pudieran sintetizarse en un laboratorio. SyntheMol se entrenó con una biblioteca de más de 130.000 bloques de construcción moleculares y generó, en menos de nueve horas, alrededor de 25.000 posibles antibióticos, así como las recetas para elaborarlos. De ellos, se seleccionaron únicamente aquellos diferentes a los compuestos existentes, para dificultar la resistencia de las bacterias. Se obtuvieron 70 compuestos. La empresa química ucraniana Enamine generó eficientemente 58, seis de los cuales eliminaron una cepa resistente de *A. baumannii* al ser probados en el laboratorio. No obstante, cuatro no se disolvían en agua, de modo que quedaron sólo dos. Después de analizar su toxicidad en ratones, ambos demostraron ser seguros.

Este es uno de los modelos de investigación que se están desarrollando en la actualidad y que están contribuyendo a sentar buena parte de los principios generales relevantes para el descubrimiento de nuevos antibióticos. Aunque la IA generativa se encuentra todavía en una fase de despegue, su impacto empieza a ser demoledor. El profesor José R. Penadés y su equipo del Imperial College de Londres llevan años investigando y demostrando por qué algunas superbacterias son inmunes a los antibióticos. Cuando se le dio la posibilidad de probar la herramienta Google co-scientist, el científico proporcionó una breve instrucción para que resolviera el problema central que había estado investigando. La IA le devolvió una respuesta en 48 horas¹⁸, había llegado a una conclusión similar a la suya. Penadés no pudo evitar ponerse en contacto con Google para asegurarse de que no habían hackeado su ordenador.

Desde la Universidad de Pennsylvania, el equipo que dirige el español César de la Fuente busca los nuevos compuestos en la propia naturaleza con la ayuda de la IA. Su trabajo parte de la identificación computacional de más de 2.603 antibióticos peptídicos dentro del proteoma humano, a los que se suman otros 323 antibióticos peptídicos adicionales codificados en pequeños marcos de lectura abiertos dentro de los metagenomas del intestino humano. Hay un mundo oculto de inmunidad basada en péptidos¹⁹.

Se han localizado ya, de hecho, un millón de nuevas moléculas antibióticas, después de utilizar un algoritmo para escanear toda la diversidad microbiana de la Tierra, desde el océano hasta el intestino humano. Es el mayor esfuerzo de descubrimiento de antibióticos realizado hasta la fecha. Un centenar de secuencias de ADN se sintetizaron en el laboratorio para evaluar su eficacia contra las bacterias y el 79% podrían matar al menos un microbio, lo que indica su potencial como antibióticos²⁰. El resultado es AMPSphere, un recurso abierto y accesible que proporciona información sobre los péptidos antimicrobianos, incluyendo sus secuencias, genes originales y propiedades bioquímicas. Pero De la Fuente ha ido más allá y ha aplicado un modelo de aprendizaje automático para buscar moléculas similares en neandertales y denisovanos, lo que le ha permitido lanzar el campo de la desextinción



molecular²¹. A partir de ese trabajo, se ha desarrollado un nuevo modelo de aprendizaje profundo llamado APEX capaz de extraer antibióticos de todos los organismos extintos conocidos, incluidos los candidatos preclínicos del mamut lanudo y otros organismos. Ya se han descubierto más de 37.000 secuencias encriptadas algunas de ellas una potente actividad antiinfecciosa.

Hasta los venenos constituyen una reserva inmensa y en gran parte desaprovechada de moléculas bioactivas con potencial antimicrobiano. Mediante aprendizaje profundo, una investigación²² ha obtenido más de 40 millones de péptidos encriptados por veneno, de los que se seleccionaron 386 candidatos estructural y funcionalmente distintos a los compuestos ya conocidos. Finalmente eligió 58 para validación experimental y confirmó que 53 de ellos presentan una potente actividad antimicrobiana incluido en el caso de enfrentarse al *Acinetobacter baumannii*.

Las nuevas posibilidades de la IA intentan sacudir, no obstante, un entorno que avanza con una inercia muy rígida y difícil de redireccionar, como pone de manifiesto el Gráfico 3. Farmacéuticas e inversores privados operan muy lejos del desarrollo de nuevos antibióticos y la innovación se ha frenado durante las últimas cuatro décadas. Desde la década de 1980²³, no se comercializa ninguna nueva familia de antibióticos, pese a que los compuestos disponibles no dejan de perder eficacia debido a las bacterias resistentes a los antimicrobianos (RAM). A mediados de 2025, solo 32 fármacos antimicrobianos se encontraban en desarrollo clínico, y de ellos, solo 12 podían considerarse innovadores según la OMS²⁴. El destino para la mayoría de ellos será el fracaso en las pruebas clínicas y la ausencia de aprobación regulatoria.

La inversión privada es escasa para el desarrollo de antimicrobianos por la disfuncionalidad del propio mercado, que hace que las empresas que han conseguido permisos para nuevos compuestos los últimos años se hayan tenido que declarar en quiebra casi a continuación. De hecho, las pequeñas empresas son responsables del 80% de las nuevas terapias con antibióticos propuestas, mientras que el 8% surge en institutos y universidades sin fines de lucro, y sólo el 12% se origina en grandes empresas²⁵. Cada formulación necesita de media alrededor de 1.000 millones de dólares en desarrollo y recuperar esa inversión es extremadamente difícil para un tipo de medicamentos que, a diferencia de los que tratan las enfermedades crónicas de por vida, se usan durante un espacio corto de tiempo, el que dura la infección. Entre 2011 y 2020, el capital riesgo invirtió 1.600 millones de dólares en empresas de investigación en antibacterianos y 26.500 millones de dólares en compañías oncológicas²⁶. En consecuencia, podría suceder que la IA genere una gran cantidad de candidatos terapéuticos prometedores, pero no haya financiación necesaria para que completen las pruebas clínicas y lleguen a los pacientes. El G7 ha emitido diversas declaraciones en apoyo de los llamados “incentivos de atracción” para las empresas que desarrollen con éxito antibióticos eficaces, pero solo el Reino Unido²⁷ e Italia²⁸ han promulgado medidas significativas al respecto.

El pronóstico para los pacientes con infecciones bacterianas peligrosas ha empeorado en los últimos años debido a la propagación de cepas bacterianas resistentes a los antibióticos y al estancamiento del desarrollo de nuevas opciones de tratamiento²⁹. Se proyecta que la resistencia a los antimicrobianos provocará hasta 1,91 millones de muertes atribuibles y 8,22 millones de muertes asociadas en 2050. Sin más intervenciones, será poco probable lograr la reducción propuesta por la OMS del 10% en la mortalidad por RAM en 2030 y atender a los requerimientos del Parlamento Europeo, que en 2023 reconoció la RAM como una de las tres principales amenazas prioritarias para la salud en la UE³⁰. Se trata de un asunto que impacta directamente en la lucha por reducir las brechas de desigualdad en el mundo, ya que los países de ingresos bajos y medianos soportan la mayor parte de la carga de la resistencia a los antimicrobianos³¹ y tienen una capacidad limitada para implementar planes de acción debido a la insuficiencia de personal y recursos financieros.

El fracaso de los tratamientos antimicrobianos no se puede atribuir únicamente a los genes resistentes a ellos. Influyen múltiples factores, incluidos los mecanismos complejos subyacentes a afecciones clínicas críticas como la sepsis. De hecho, se está produciendo un aumento significativo y alarmante de las infecciones resistentes que se producen durante las hospitalizaciones³². Anualmente, alrededor de 1,7 millones de personas desarrollan sepsis solo en EEUU, y aproximadamente 350.000 mueren durante la hospitalización³³. La eficacia de los antibióticos está limitada, en ese caso, por las altas tasas de mortalidad (23-35%) y por las complicaciones clínicas. Junto a sus beneficios para combatir patógenos, la integración de la IA en los sistemas de salud podría conducir a una prescripción de antimicrobianos más precisa³⁴.

La investigación sobre antibióticos descubiertos mediante procesos asistidos por aprendizaje profundo aún se encuentra en etapas preliminares. Ninguno de los fármacos identificados ha comenzado aún los ensayos clínicos, y mucho menos ha alcanzado la aprobación regulatoria. Como se ha dicho es necesario comprender completamente el contexto y garantizar la calidad de los datos de entrenamiento. Los sistemas de IA se entrenan en entornos claramente definidos, mientras que

el mundo físico a menudo tiene fenómenos subyacentes complejos y volátiles. Esto puede cuestionar la validez de las soluciones generadas.

Por el lado de la tecnología, la calidad de los datos, la interpretabilidad de los modelos y la implementación en el mundo real de los resultados que se obtienen de la computación siguen siendo los grandes desafíos pendientes. Y no se trata estrictamente de una cuestión de cantidad: los conjuntos de datos grandes pueden ayudar a entrenar un modelado avanzado, pero los conjuntos de datos más pequeños, bien anotados y precisos pueden ofrecer información más valiosa al evitar el ruido excesivo. Es necesaria la colaboración internacional para compartir información y conocimiento entre instituciones. Además, los algoritmos de aprendizaje automático deben apostar por la transparencia para garantizar la seguridad y la eficacia de los nuevos fármacos. Aquellos basados en redes neuronales profundas, que se describen a menudo como cajas negras, generan desconfianza entre los profesionales de la salud y los pacientes. Los modelos directamente interpretables son los preferidos en los entornos clínicos ya que son fácilmente comprendidos por todas las partes interesadas³⁵.

Como respuesta a estas inquietudes, las autoridades están trabajando para crear directrices claras para la implementación segura y ética de la IA. Los organismos reguladores como la FDA en los EEUU y la Agencia Reguladora de Medicamentos y Productos Sanitarios (MHRA) en el Reino Unido han asumido el papel de monitorizar el uso de la IA en la atención médica. El Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) de la Unión Europea establece estrictas obligaciones en materia de privacidad de datos, mientras que la Ley Europea de Datos, vigente desde enero de 2024, regula el acceso y el uso, incluidos los datos sanitarios.

La Ley de IA es amplia³⁶ y pone un especial énfasis en los escenarios de alto riesgo. Además, la introducción del Espacio Europeo de Datos Sanitarios (EHDS)³⁷ desempeñará un papel fundamental en el apoyo a estas regulaciones, al garantizar la disponibilidad de datos sanitarios a gran escala. Más allá de las fronteras de la UE, la Ley de IA también podría impactar el mercado global al establecer estándares rigurosos para el desarrollo y uso³⁸ que puedan ser seguidos y adoptados por otros reguladores y autoridades nacionales o internacionales. El rápido desarrollo de las tecnologías de IA requerirá, en cualquier caso, un proceso continuo de reevaluación y perfeccionamiento de todas las regulaciones para que no generen desigualdad de oportunidades en el mercado o riesgos para los consumidores.

Al margen de la carrera de los antibióticos, la IA se ha consolidado como una tecnología de referencia para el sector farmacéutico. Exscientia, empresa derivada de la Universidad de Dundee en 2012, fue una de las primeras en aplicar la IA al descubrimiento de fármacos. En 2024, la compañía llevó su primer medicamento candidato diseñado con IA a ensayos clínicos en humanos, tras un proceso de selección que se prolongó tan solo 12 meses. Su

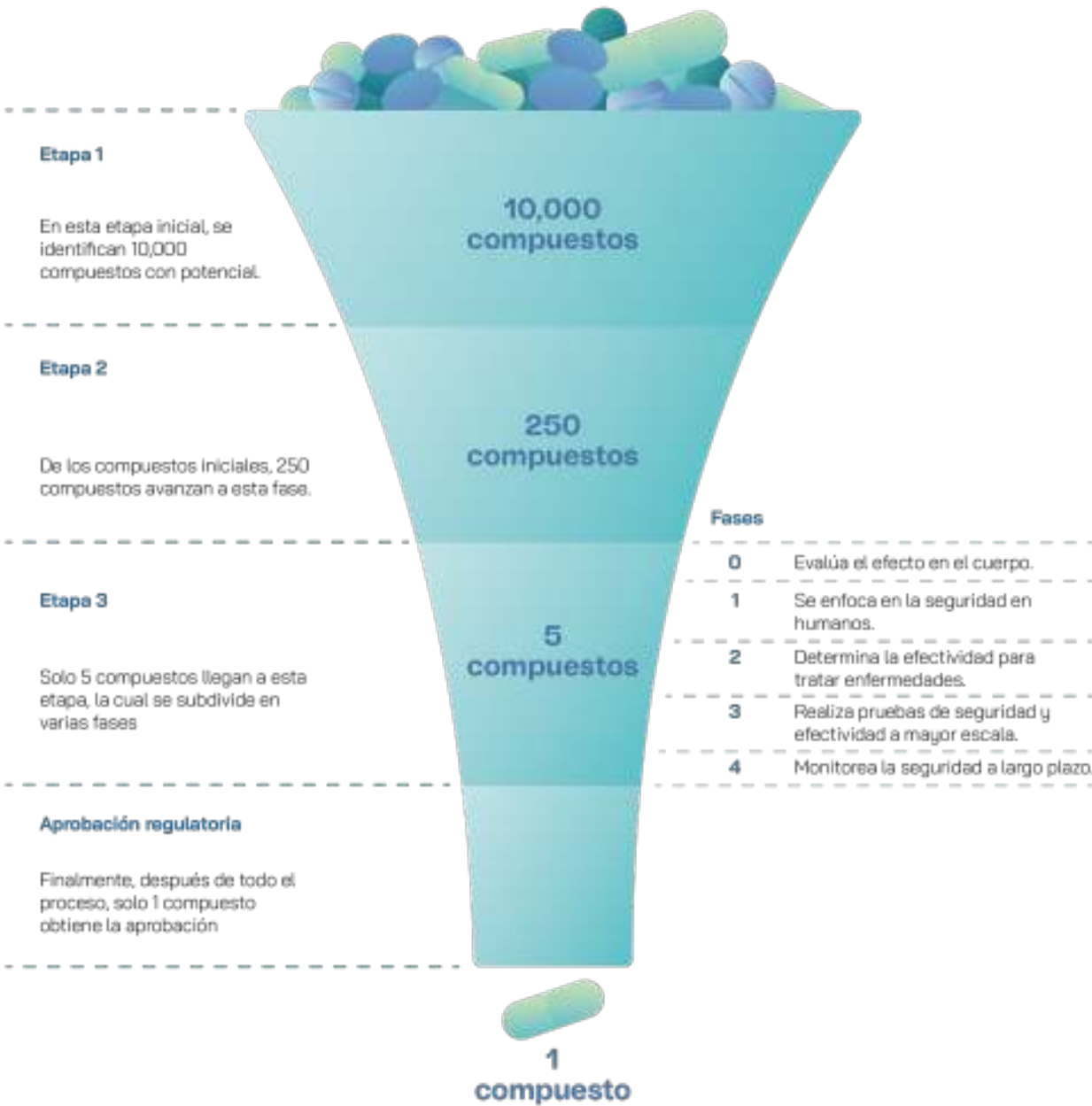
rival estadounidense Recursion adquirió la empresa con sede en Oxford por 688 millones de dólares. A principios de 2025, Isomorphic Labs, filial de Google DeepMind, confiaba en que las pruebas de sus primeros medicamentos diseñados con IA dieran comienzo ese año, mientras las nuevas empresas tecnológicas compiten por poner en marcha tratamientos reales³⁹. Existen más de 460 startups de IA trabajando actualmente en el descubrimiento de fármacos⁴⁰ en todo el mundo, una cuarta parte de ellas europeas.

Como vía para facilitar una visión estratégica e integradora, algunos expertos abogan por un enfoque multidisciplinar que integre la IA con otras tecnologías emergentes, como la biología sintética y la nanomedicina para preservar la eficacia de los antibióticos en el futuro⁴¹. La carrera por el descubrimiento de nuevos antibióticos se beneficiaría así, en mayor medida, de las mejoras masivas en precisión y velocidad de los algoritmos de aprendizaje automático, así como de las reducciones de costes gracias a la asequibilidad de las GPU (unidades de procesamiento gráfico), el aumento de la disponibilidad de datos y a los avances en la investigación de los algoritmos subyacentes.

La IA puede incrementar, de ese modo, la utilidad de una fuente de datos como Drug Repurposing Hub⁴², que contiene una colección curada a mano de miles de medicamentos existentes, incluidos aquellos que nunca obtuvieron la aprobación regulatoria, pese a superar los ensayos clínicos. Permite aplicar medicamentos existentes a nuevas enfermedades distintas de aquellas para las que se desarrollaron originalmente, un enfoque pragmático que puede tener un impacto rápido y de menor coste. Otra herramienta útil que podría recibir un impulso es la base de datos ZINC15 , que incluye datos sobre moléculas pequeñas, incluida su actividad biológica y propiedades químicas. Junto a la primera, se ha utilizado en enfoques de redes neuronales⁴³. Por último, RDKit⁴⁴ es una biblioteca de código abierto que permite calcular características moleculares.

En cuanto a los modelos de IA disponibles en la actualidad, un estudio ha analizado la usabilidad, validez química y relevancia biológica de los seis más destacados con reconocimiento de estructura 3D. Están contruidos sobre diferentes tecnologías: difusión, autorregre-

Etapas para la aprobación de un medicamento



Fuente: Universidad de Michigan



sivas, redes neuronales de grafos y modelos de lenguaje⁴⁵. DeepBlock y TamGen podrían considerarse los mejores en diversos criterios. El primero descompone las moléculas en bloques de construcción sintéticamente accesibles y químicamente reactivos. En una dirección metodológica diferente, el segundo aplica un modelo de lenguaje químico generativo preentrenado (GPT), combinado con codificadores de proteínas basados en *transformers*, para generar moléculas de novo, lo que mejora la validez química, la accesibilidad sintética y la velocidad de generación.

Junto a ellos, destacan otros como DiffSBDD, que garantiza resultados químicamente válidos y geoméricamente consistentes, y es capaz de adaptar las capacidades generativas a diversos escenarios de diseño, sin necesidad de reentrenamiento. Pocket2Mol equilibra de forma única la precisión estructural, la eficiencia generativa y la validez química y, para mejorar aún más la fidelidad estructural, ResGen acelera significativamente la generación de moléculas similares a fármacos. Por último, TargetDiff garantiza una generación de moléculas realista, condicionada por los sitios de unión de proteínas. En general, los seis modelos constituyen propuestas complementarias, que varían principalmente en su dependencia de datos estructurales o datos de secuencia, el uso de diferentes metodologías generativas y los objetivos de diseño específicos.

En un estudio comparativo se observaron diferencias significativas en métricas clave como la validez molecular, la diversidad estructural, la similitud farmacológica y la especificidad de la diana. DeepBlock superó sistemáticamente a sus homólogos y obtuvo la mayor proporción de compuestos químicamente válidos, estructuralmente diversos y similares a fármacos. Sorprendentemente, tras un riguroso filtrado posterior a la generación, se descubrió que el 61% de todas las moléculas candidatas disponibles comercialmente provenían de DeepBlock, TamGen contribuyó con el 34% y los modelos restantes aportaron solo el 5%.

Los científicos están particularmente preocupados por seis especies bacterianas altamente virulentas y resistentes a los fármacos: *Enterococcus faecium*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*, *Acinetobacter baumannii*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Enterobacter* spp., conocidas como patógenos ESKAPE. El caso del *A. baumannii* resulta especialmente preocupante: resiste la desecación y los desinfectantes y responsable de infecciones potencialmente mortales, adquiridas en hospitales, en la piel, los pulmones, las vías urinarias, el cerebro, el torrente sanguíneo y los tejidos blandos⁴⁶. La Organización Mundial de la Salud lo ha clasificado⁴⁷ como una prioridad crítica para el desarrollo de nuevos tratamientos y herramientas de diagnóstico.

El posible impacto para la seguridad ha movilizó a la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa (Darpa) en Estados Unidos. Al frente del proyecto TARGET (Transformación de la I+D de antibióticos con IA generativa para detener las amenazas emergentes)⁴⁸ ha situado a la empre-

La IA está utilizándose en la modelización computacional en el ámbito farmacéutico, en el diseño y desarrollo de fármacos. Su rapidez facilita que podamos tener en un tiempo corto combinaciones que serán muy costosas temporalmente por los métodos tradicionales. También nos ayudará en el proceso de administración de los fármacos a los pacientes personalizando las terapias.

|
Manuel de León

sa social Phare Bio, junto con el Laboratorio Collins del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) y el Instituto Wyss de Harvard. Su objetivo es ampliar el número de moléculas que actualmente se analizan para determinar su actividad antibiótica, incluyendo el Centro de Reutilización de Fármacos del Instituto Broad y la citada biblioteca ZINC15, que en conjunto albergan 107 millones de candidatos a moléculas. Utilizará aprendizaje profundo para desarrollar herramientas de cribado *in silico* que evalúen la eficacia de cada molécula candidata como antibiótico y, en última instancia, como fármaco. Finalmente, TARGET validará cada nuevo descubrimiento prometedor en cuanto a actividad antibiótica y propiedades farmacológicas, con el objetivo de identificar 15 nuevas líneas de investigación prometedoras para nuevos antibióticos, lo que contribuiría a reabastecer la cartera global de productos.

La IA se puede ver beneficiada por los desarrollos en el ámbito de los gemelos humanos virtuales, que simular escenarios del mundo real preservando las características individuales de cada paciente. TWIN-GPT es un enfoque basado en un modelo de lenguaje extenso (LLM), diseñado para crear gemelos digitales útiles para ensayos clínicos⁴⁹. La empresa de IA Unlearn.AI ha simulado grupos de control en ensayos clínicos y eso ha permitido reducir el número de participantes necesarios y acelerar los plazos, y Sanofi prueba también compuestos en pacientes digitales antes de pasar a ensayos clínicos. La Comisión Europea ha financiado el proyecto Gemelo Humano Virtual Europeo (EDITH), en paralelo al lanzamiento de una convocatoria de propuestas para avanzar en la adopción de IA en el ámbito de la salud en el marco del Programa EU4Health).

Si bien el entusiasmo en torno a los LLM está justificado, alcanzar su máximo potencial requerirá un enfoque estratégico para equilibrar la innovación con una evaluación rigurosa, garantizando que estas herramientas se integren de forma segura y eficaz en la práctica clínica⁵⁰. Además, conforme avanza el despliegue de la IA generativa el acceso a las unidades avanzadas de procesamiento gráfico (GPU) con las que se entrenan los grandes modelos de lenguaje y se procesan las aplicaciones de IA derivadas de ellos, pese a resultar cada vez más asequibles, puede convertirse en otra barrera a superar para los investigadores académicos, frente a

los equipos de las grandes industrias. De alguna forma, puede decirse que en la odisea del descubrimiento de antibióticos con inteligencia artificial está reflejado todo lo bueno y lo menos deseable de la revolución digital.

Potencia en el uso de la IA en farmacia, lejos aún de los antibióticos

ESPAÑA

Aunque en España no destacan los ejemplos específicos de búsqueda de antibióticos con inteligencia artificial, sí se consolida la tendencia de empresas y centros de investigación a establecer nuevas vías de colaboración con las tecnologías inteligentes. Grifols se ha asociado con Google Cloud para utilizar los large language models (LLMs) como palanca para la aceleración de nuevas terapias biofarmacéuticas⁵¹. En ese objetivo se incluye tanto la identificación de posibles candidatos terapéuticos como la gestión de los datos clínicos. Almirall, por su parte, trabaja en el desarrollo de nuevos tratamientos para enfermedades dermatológicas con IA de la mano de la norteamericana Absci, que cuenta con una plataforma de descubrimiento de fármacos.

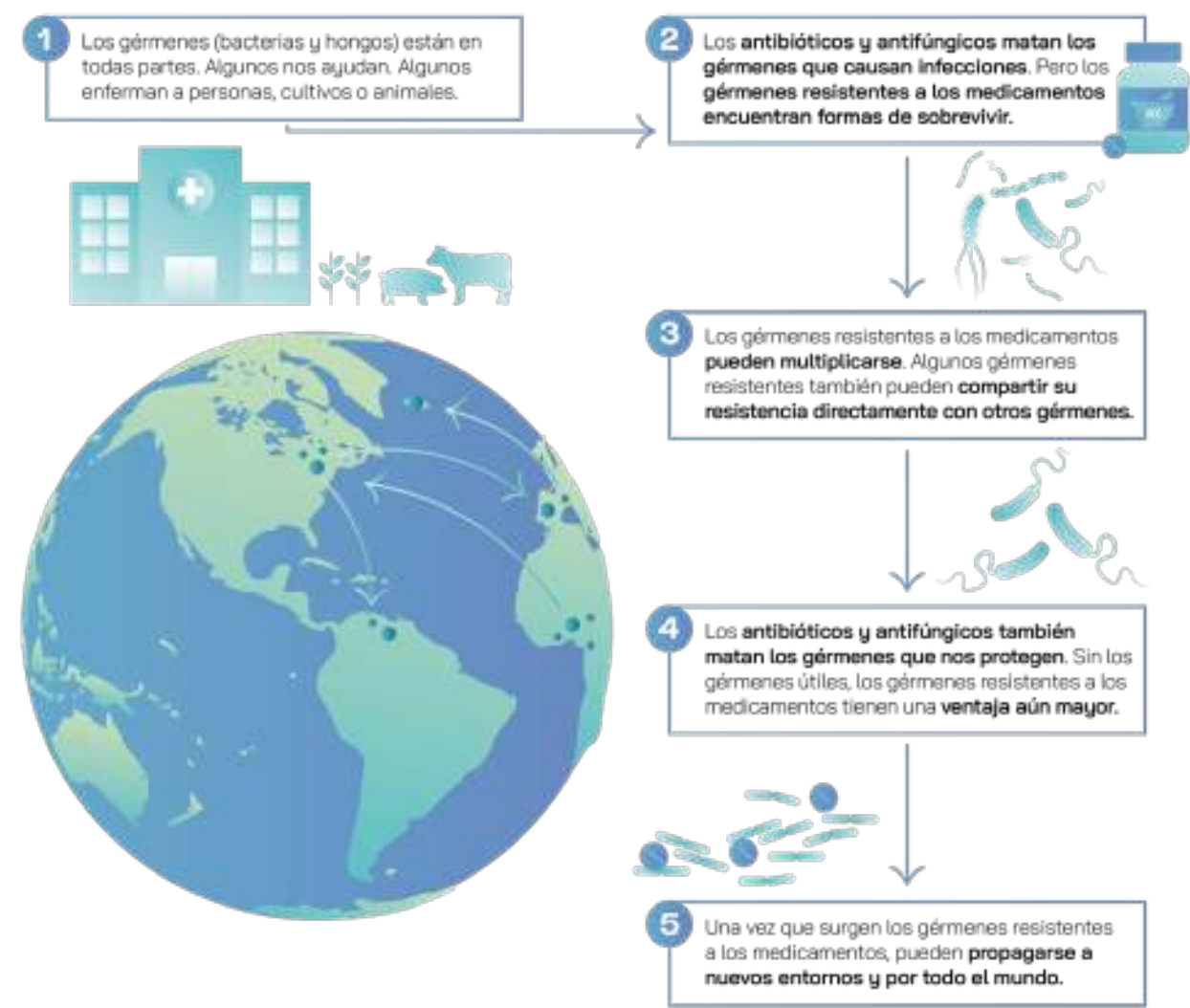
En el ámbito de los centros investigadores, la Fundación para la investigación Biomédica del Hospital Universitario Ramón y Cajal (IRYCIS) colabora en España con la biotecnológica francesa Owkin para optimizar el tratamiento del cáncer utilizando IA. En una primera fase, se centran en optimizar las estrategias terapéuticas del cáncer de próstata detectado de manera precoz, con el fin de identificar qué pacientes se beneficiarían de terapias específicas. Gracias a este trabajo conjunto con Owkin, la base de datos de IRYCIS queda preparada a las necesidades del sector tecnológico para aplicarse en investigaciones futuras que utilicen IA.

En el caso del centro Cima Universidad de Navarra, de Ingeniería-Tecnun y del Instituto de Ciencia de los Datos e Inteligencia Artificial (DATAI), ambos también de la Universidad de Navarra, su colaboración con el Centro de Investigación en Informática Biomédica de la Universidad de



Cómo se propagan los gérmenes resistentes a los medicamentos

Los **gérmenes** como las bacterias y los hongos pueden desarrollar la capacidad de vencer los medicamentos diseñados para **matarlos**. Estos gérmenes pueden causar **infecciones resistentes a los medicamentos** que pueden afectar a cualquier persona, en cualquier lugar y en cualquier etapa de la vida, así como a los sectores de la salud, veterinario y agricultura. Las infecciones resistentes a los medicamentos son una **amenaza urgente para la salud pública**.



Fuente: US Centers for Disease Control and Prevention

Stanford ha dado lugar a una tecnología propia que podría revolucionar el descubrimiento de nuevos medicamentos. Se trata del sistema de inteligencia artificial, bautizado como GENNIUS, que utiliza redes neuronales de grafos (GNN) y aprendizaje profundo para predecir interacciones entre medicamentos⁵².

El modelo utiliza nodos, que representan medicamentos y proteínas y sus conexiones, y genera representaciones gráficas con las que se puede trabajar con agilidad información biológica clave. GENNIUS ha permitido identificar patrones hasta ahora ocultos y descubrir nuevas interacciones fármaco-proteína, un paso determinante en el desarrollo y reposicionamiento de medicamentos. El modelo impulsado por los investigadores de la Universidad de Navarra supera a otros al evaluar distintas bases de datos con una precisión y velocidad sin precedentes, lo que le permite hacer predicciones más precisas y generalizables. Todo ello se podría traducir en el futuro en una reducción de los tiempos y los costes en el desarrollo de terapias.

Por último, un grupo de investigadores de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) acaba de desarrollar un método de restitución de fármacos con el que puede justificar el uso de un determinado compuesto en el tratamiento de una enfermedad. El nuevo algoritmo se llama XG4REPO (eXplainable Graphs for Repurposing)⁵³ y una de sus principales aportaciones es su esfuerzo por la explicabilidad: los resultados se presentan de forma comprensible, aludiendo a los mecanismos biológicos utilizados, y sus pronósticos pueden ser validados así por expertos médicos, que pueden valorar si la explicación resulta suficiente y legítima.

La revista *Scientific Reports* publicó los resultados de una prueba con la que los investigadores pretendieron demostrar la eficacia del algoritmo XG4REPO. En ella, formularon una serie de predicciones sobre los resultados de la aplicación de tres fármacos conocidos contra el cáncer. Descubrieron mucho de lo anticipado por la inteligencia artificial estaba presente ya en la fase de ensayo clínico inicial.

Relación de notas

¹ Descubrimiento y Desarrollo de La Penicilina (Sin fecha) American Chemical Society. Consultado: 20/07/2025.

² Pellicer Roig, D. (2025) Los anti-bióticos están fallando en África y desde el centro de control de Enfermedades Piden que no se ignore el problema, National Geographic España. Consultado: 28/07/2025.

³ Michael, C.A., Dominey-Howes, D. and Labbate, M. (2014) ‘The antimicrobial resistance crisis: Causes, consequences, and management’, Frontiers in Public Health, 2. doi:10.3389/fpubh.2014.00145.

⁴ Who bacterial priority pathogens list, 2024: Bacterial pathogens of public health importance to guide research, development and strategies to prevent and control antimicrobial resistance (Sin fecha) World Health Organization. (Consultado: 20/07/2025).

⁵ Brown, E., Wright, G. Antibacterial drug discovery in the resistance era. Nature 529, 336–343 (2016). doi: 10.1038/nature17042

⁶ Parameswaran, P. (Sin fecha) Target based screening, NC State University Highthroughput Discovery. (Consultado: 20/07/2025).

⁷ Cameron, A. (Sin fecha) Incentivising-development-of-new-antibacterial-treatments- ..., World Health Organization. Consultado: 20/07/2025.

⁸ Cesaro, A., Hoffman, S.C., Das, P. et al. Challenges and applications of artificial intelligence in infectious

diseases and antimicrobial resistance. npj Antimicrob Resist 3, 2 (2025). doi: 10.1038/s44259-024-00068-x

⁹ Branda, F. and Scarpa, F. (2024) ‘Implications of artificial intelligence in addressing antimicrobial resistance: Innovations, global challenges, and healthcare’s future’, Antibiotics, 13(6), p. 502. doi:10.3390/antibiotics13060502.

¹⁰ Arnold, A., McLellan, S. & Stokes, J.M. How AI can help us beat AMR. npj Antimicrob Resist 3, 18 (2025). doi: 10.1038/s44259-025-00085-4

¹¹ Abramson, J., Adler, J., Dunger, J. et al. Accurate structure prediction of biomolecular interactions with AlphaFold 3. Nature 630, 493–500 (2024). doi: 10.1038/s41586-024-07487-w

¹² <https://www.gene.com/stories/ai-and-the-quest-for-new-antibiotics>

¹³ Jonathan M Stokes et al. A Deep Learning Approach to Antibiotic Discovery, Cell, 20 de febrero de 2020, doi: 10.1016/j.cell.2020.04.001

¹⁴ Charlene Lancaster, “Harnessing the Power of AI to Design Novel Antibiotics”, The Scientist, 27 de junio de 2024

¹⁵ Abramson, J. et al. Accurate Structure Prediction of Biomolecular Interactions with AlphaFold 3, Nature, junio de 2024, doi.org/10.1038/s41586-024-07487-w

¹⁶ Kyle Swanson et al. Generative AI for designing and validating easily synthesizable and structurally novel

antibiotics, Nature Machine Intelligence, 22 de marzo de 2024, doi. org/10.1038/s42256-024-00809-7

¹⁷ Rachel Tompa, “Generative AI develops potential new drugs for antibiotic-resistant bacteria”, Stanford Medicine, 28 de marzo de 2024, consultado el 16/07/2025

¹⁸ Tom Gerken, “AI cracks superbug problem in two days that took scientists years”, BBC, 20 de febrero de 2025, consultado el 16/07/2025

¹⁹ Torres, MD, Cesaro, A. y de la Fuente-Nunez, C. “Los péptidos de proteínas no inmunitarias atacan las infecciones mediante propiedades antimicrobianas e inmunomoduladoras”. Trends Biotechnology, enero de 2025, doi.org/10.1016/j.tibtech.2024.09.008

²⁰ Mathias Sundin, “AI discovers nearly 1 million new antibiotics - progress in the fight against antibiotic resistance”, WARP, 9 de junio de 2024

²¹ Fangping Wan et al. Deep-learning-enabled antibiotic discovery through molecular de-extinction, Nature Biomedical Engineering, 11 de junio de 2024, doi.org/10.1038/s41551-024-01201-x

²² Changge Guan et al. Computational exploration of global venoms for antimicrobial discovery with Venomics artificial Intelligence, Nature Communications, 12 de julio de 2025, doi.org/10.1038/s41467-025-60051-6

²³ César de la Fuente-Núñez, Henry Skinner, Christina Yen, “How AI can

slow the rise of antibiotic-resistant “superbugs””, Bulletin of the Atomic Scientists, 13 de mayo de 2025, consultado el 17/07/2025

²⁴ “Agentes antibacterianos en desarrollo clínico y preclínico: visión general y análisis”, OMS, 14 de junio de 2023

²⁵ Thomas, D., y Wessel, C. 2022. “El estado de la innovación en terapias antibacterianas”, BIO, 14 de febrero de 2022

²⁶ Thomas, D., Wessel, C., “El estado de la innovación en terapias antibacterianas”, Organización de Innovación Biotecnológica, 14 de febrero de 2022

²⁷ «Netflix para antimicrobianos: El modelo de suscripción a productos antimicrobianos», Biblioteca de la Cámara de los Comunes, Parlamento del Reino Unido, 18 de septiembre de 2024

²⁸ Rex, John, Damiano de Felice, «Italia ofrece un incentivo nacional de atracción», AMR Solutions, 9 de enero de 2025

²⁹ Justin R. Randall, Deep mutational scanning and machine learning for the analysis of antimicrobial-peptide features driving membrane selectivity, Nature Biomedical Engineering, 31 de julio de 2024, doi. org/10.1038/s41551-024-01243-1

³⁰ “DRAIGON: pioneering global initiative using AI to predict antimicrobial resistance from genomic data”, European Vaccine Initiative, 18 de diciembre de 2023

³¹ Hamid Harandi et al. Artificial intelligence-driven approaches in antibiotic stewardship programs and optimizing prescription practices: A systematic review, Artificial Intelligence in Medicine, abril de 2025, doi. org/10.1016/j.artmed.2025.103089

³² “COVID-19 : U.S. impact on antimicrobial resistance, special report 2022”, National Center for Emerging and Zoonotic Infectious Diseases (U.S.). Division of Healthcare Quality Promotion. Division of Healthcare Quality Promotion, junio de 2022, dx.doi.org/10.15620/cdc:117915

³³ [cdc.gov/sepsis/about/?CDC_AA-ref_Val=https://www.cdc.gov/sepsis/what-is-sepsis.html](https://www.cdc.gov/sepsis/what-is-sepsis.html)

³⁴ Flavia Pennisi et al. Artificial intelligence in antimicrobial stewardship: a systematic review and meta-analysis of predictive performance and diagnostic accuracy, Eur J Clin Microbiol Infect Dis, 6 de enero de 2025, doi.org/10.1007/s10096-024-05027-y

³⁵ Hajar Hakkoum, Ibtissam Abnane, Ali Idri, Interpretability in the medical field: A systematic mapping and review study, Applied Soft Computing, marzo de 2022, doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108391

³⁶ Emmanouil P Vardas , Maria Marketou , Panos E Vardas, Medicine, healthcare and the AI act: gaps, challenges and future implications, European Heart Journal - Digital Health, 23 de abril de 2025, doi. org/10.1093/ehjdh/ztaf041

³⁷ health.ec.europa.eu/ehealth-digital-health-and-care/european-health

th-data-space-regulation-ehds_en

³⁸ Felix Busch et al. Navigating the European Union Artificial Intelligence Act for Healthcare, npj Digital Medicine, 12 de Agosto de 2024, doi.org/10.1038/s41746-024-01213-6

³⁹ Siôn Geschwindt, “Europe accelerates AI drug discovery as DeepMind spinoff targets trials this year”, TNW, 21 de enero de 2025, consultado el 17/07/2025

⁴⁰ Iryna Bursuk, “Meet 20 AI Startups advancing Drug Discovery in 2025”, StartUs Insights, abril de 2023

⁴¹ Francesco Branda, Fabio Scarpa, Implications of Artificial Intelligence in Addressing Antimicrobial Resistance: Innovations, Global Challenges, and Healthcare’s Future, Antibiotics (Basel), 29 de mayo de 2024, doi: 10.3390/antibiotics13060502

⁴² broadinstitute.org/drug-repurposing-hub

⁴³ Gary Liu et al. Deep learning-guided discovery of an antibiotic targeting Acinetobacter baumannii, Nat Chem Biol, 25 de mayo de 2023, doi.org/10.1038/s41589-023-01349-8

⁴⁴ rdkit.org/

⁴⁵ Maximilian G. Schuh, Joshua Hesse, Stephan A. Sieber, AI-guided Antibiotic Discovery Pipeline from Target Selection to Compound Identification, 21 de mayo de 2025, doi.org/10.48550/arXiv.2504.11091

⁴⁶ Alexandra Maure, Etienne Robino, Charles Van der Henst, The intracellular life of Acinetobacter bauman-

nii, Cell, diciembre de 2023, doi.org/10.1016/j.tim.2023.06.007

⁴⁷ “WHO bacterial priority pathogens list, 2024: bacterial pathogens of public health importance, to guide research, development and strategies to prevent and control antimicrobial resistance”, World Health Organization, 2024

⁴⁸ “ARPA-H project to accelerate the discovery of new antibiotics using AI”, DARPA, nota de prensa, 26 de septiembre de 2024

⁴⁹ “Review of AI/ML applications in medicines lifecycle”, EMA, 9 de julio de 2025,

⁵⁰ Daniele Roberto Giacobbe et al. “Antibiotics and Artificial Intelligence: Clinical Considerations on a Rapidly Evolving Landscape”, Infect Dis Ther, 15 de febrero de 2025, doi.org/10.1007/s40121-025-01114-5

⁵¹ “El panorama de la inteligencia artificial en el sector salud en España”, Asebio, 4 de abril de 2024

⁵² “Un nuevo método de inteligencia artificial predice interacciones farmacológicas con mayor precisión”, Universidad de Navarra, 5 de marzo de 2025

⁵³ Ana Jiménez, “Explainable drug repurposing via path based knowledge graph completion”, Sci. Rep., 18 de julio de 2024, doi.org/10.1038/s41598-024-67163-x



09

La carrera tecnológica de la observación geoespacial



Introducción

El 7 de diciembre de 1972 a las 11:39 de la mañana hora española, el obturador de una cámara Hasselblad de 70 milímetros se abrió y cerró en un instante. Lo que hacía especial a aquella fotografía, con respecto a las otras miles que tomaron aquel día, no fue la cámara, ni el momento, sino el lugar donde se tomó. En el instante que duró el parpadeo del obturador, una enorme bola de color azul, blanco, verde y marrón sobre fondo negro quedó fijada en la película fotosensible al otro lado de la lente. La imagen, que después recibió el nombre de “La gran canica azul” fue tomada por los tripulantes a bordo de la misión Apolo 17, a 29.000 kilómetros de la superficie, y muestra la cara iluminada de la Tierra flotando en la inmensidad del espacio. Esa imagen pasó a ser una de las más publicitadas de la historia. Y no es para menos, puesto que captura perfectamente la esencia de nuestro hogar.

A pesar de lo impresionante de la hazaña, una imagen de la Tierra no es de gran utilidad, ya que sólo cuenta una pequeña parte de la historia: aquella que podemos ver. En los 50 años que han pasado desde aquella fotografía se ha producido una verdadera revolución en los sistemas que se dedican a observar nuestro planeta. Es el caso, por ejemplo, de la aparición de nuevas tecnologías que trascienden aquello que podemos detectar con nuestros ojos y aportan información de otra forma invisible. Estas tecnologías integradas en satélites y drones nos ofrecen una visión completamente nueva, ya que recopilan enormes cantidades de datos de todo el mundo, incluso en regiones de difícil acceso.

Además de la toma de estos datos, es su análisis mediante ordenadores, millones de veces más potentes que los que permitieron llevar a los humanos a la Luna, lo que permite predecir, como si de un oráculo se tratara, los escenarios de evolución más posibles. De este modo, podemos poner a prueba modelos climáticos, detectar grandes migraciones de aves e insectos, o prevenir y gestionar riesgos naturales como inundaciones, incendios, terremotos o deslizamientos de tierra.

Desde que tomamos la imagen de *la gran canica azul*, jamás hemos dejado de observar nuestro planeta. Sin embargo, una empresa que anteriormente era mucho más artística ahora ha sido sustituida por ojos analíticos, que permiten extraer cualquier tipo de información que pueda resultarnos de utilidad para comprender nuestro impacto sobre la Tierra, y actuar en consecuencia. Ahora la humanidad monitoriza la salud del medio ambiente, y emplea datos satelitales para escenarios tan variopintos como la gestión de recursos hídricos o la agricultura de precisión.



Los nuevos mapas de la Tierra más allá de lo visible

POR DENTRO

En la antigüedad, la cartografía manual acompañó al progreso de la humanidad y le permitió conocer el entorno por el que se movía. Al plasmar la realidad en un mapa, los humanos contaban con una gran ventaja tanto en el entorno bélico como en la era de la exploración. Pero estos mapas siempre se creaban a partir de un punto de observación situado en el suelo, lo que únicamente permite una visión parcial del entorno. Hubo que esperar a 1783 para los humanos comenzáramos a subir a los cielos con el desarrollo de los globos, y hasta el siglo XX no lo pudimos hacer con aviones. Este hecho, además de revolucionar el transporte, también permitió alzar el instrumental y ver, con cámaras de todo tipo, el mundo como nunca antes.

Paralelamente a este desarrollo, otros campos científicos como la física y la óptica también habían ido avanzando. Se han desarrollado máquinas con las que medir más allá de lo que detectan nuestros ojos. Es el caso de las cámaras infrarrojas, los radares y, posteriormente, los LIDAR, que emplean otras longitudes de onda fuera del espectro visible. Así, la ciencia estaba servida. De la unión de los aviones con los métodos de medición surgieron la fotogrametría y las mediciones aéreas, que permitieron estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición de un objeto o un fenómeno cualquiera, con el fin de predecir su futuro.

El siguiente salto en la tecnología comenzó con el lanzamiento del satélite *Sputnik-1* en 1957 por parte de la Unión Soviética. Este evento, que dio el pistoletazo de salida a la era espacial, demostró que la humanidad tenía la capacidad de escapar de su planeta, lo que abría

ya no un mundo, sino un universo de posibilidades. Con la ruptura de la última frontera comenzaron a enviarse instrumentos científicos al espacio que permitían medir distintos fenómenos terrestres.

Uno de los más famosos es el sistema Landsat¹ desarrollado por Estados Unidos. El proyecto, que comenzó con el lanzamiento del primer satélite en 1972 se ha centrado en observar la Tierra en diferentes espectros y ha proporcionado datos muy dispares y para un gran número de usos en ocasiones sorprendentes. Por ejemplo, uno de los primeros organismos interesados en esta tecnología fue el Departamento de Agricultura de Estados Unidos para la vigilancia de plagas desde el espacio. Aunque el Landsat 1 únicamente tenía una resolución de 80 metros, permitió detectar la cantidad de vegetación de los campos y cuáles estaban siendo afectados por hongos o insectos. De este modo, se pudieron trazar planes de contención y prever el rendimiento total.

En los 50 años siguientes se ha avanzado considerablemente tanto en la resolución del instrumental científico como en el número de satélites que orbitan nuestro planeta lo que se traduce en una mayor toma de datos y precisión en las mediciones. El Gráfico 1 repasa la presencia de medios de toma de información geoespacial por alturas. El último satélite Landsat, el Landsat 9² fue lanzado en 2021, y toma 1.400 imágenes diarias de la Tierra con una resolución de 30 metros. De este modo, se puede controlar la evolución de fenómenos como incendios, crecimientos de algas, estado de los embalses, o salud de los ecosistemas. Los datos que toman los Landsat son de uso libre para investigación, lo que ha permitido a la comunidad científica generar cerca de 20.000 artículos de distintos temas. Hay decenas de satélites que forman parte de otras constelaciones (como los Sentinel, del programa Copernicus, o los satélites MODIS y VIIRS, que están especializados en incendios³).

La toma de imágenes multiespectrales de alta resolución y la monitorización continua han generado series históricas que muestran los cambios sucedidos en estos 50 años⁴ que llevamos enfocando a nuestro planeta. Gracias a estos registros hemos podido ver la desecación del mar de Aral, el avance del desierto del Sahara, o la pérdida de selva amazónica. Pero también cómo han afectado las medidas de recuperación, con el llenado parcial del mar, los progresos en la defensa de la selva o el gran muro verde del Sahel en el sur del Sahara.

Pero emplear imágenes satelitales a nivel local en ocasiones no ofrece la resolución necesaria para muchas tareas. Como se pone de manifiesto en el Gráfico 2, no todas las tecnologías son igual de óptimas en todas las circunstancias. Para ello, en la última década se ha podido ver un gran crecimiento en la oferta de drones tanto autónomos como radiocontrolados que montan cámaras multiespectrales en miniatura para monitorización de precisión. Los drones se emplean tanto en labores de construcción como en ingeniería civil, agricultura, medioambiente, minas e incluso arqueología. Ayudan a trazar planes de trabajo basados en un conocimiento concienzudo del entorno con los que aumentar la eficiencia o la sostenibilidad.

Según datos de la Union of Concerned Scientists⁵ (actualizados en febrero de 2024), se estima que hay más de 1.250 satélites dedicados a la observación terrestre en órbita de origen civil, gubernamental, militar o comercial. La gran mayoría de ellos se encuentran en órbita baja (entre 500 y 2.000 kilómetros de altitud), pero también los hay en órbitas superiores. Un alto porcentaje de esos satélites se encuentran formando constelaciones para así cubrir una gran parte del globo terráqueo en tiempo real.

En Europa destaca la constelación Sentinel⁶ de la ESA, que cuenta con nuevo satélites (10 en diciembre de 2025) están especializados en distintas tareas:

1. Los Sentinel 1 (A, B y C) obtienen imágenes de radar muy útiles para rastrear cambios en la altura de un terreno, así como los posibles daños estructurales producidos a causa de ellos. Al realizar este tipo de observaciones de manera sistemática, los Sentinel 1 son capaces de detectar y supervisar movimientos que de otro modo serían imperceptibles, como el abombamiento del terreno que sucede en algunos volcanes días antes de que entren en erupción. Por ello, estos satélites se emplean para la previsión de deslizamientos de tierra y monitorización de zonas geológicamente activas. También se emplean para la supervisión del terreno situado sobre minas, así como en agricultura, silvicultura o clasificaciones de cobertura del suelo.
2. El Sentinel 2 está equipado con un instrumento multiespectral que permite detectar 13 longitudes de onda distintas (cuatro con una resolución de 10 metros, seis de 20 y tres de 60 metros). Los investigadores han unido sus datos con los de los satélites Landsat 8 y 9 (los dos activos actualmente) para crear el Conjunto de Datos Armonizados Landsat Sentinel-2, públicos y de uso libre para investigación.
3. En el caso del Sentinel 3, gracias a sus instrumentos de medición de la topografía de la superficie marina, la temperatura de la superficie marina y terrestre, y el color de la superficie oceánica y terrestre, vigila con gran precisión el medio ambiente y los efectos del clima.



Hay dos vertientes que dominan un amplio espectro de actividades del hombre en el Espacio. Tienen que ver con las Comunicaciones y con la Observación de la Tierra. En ambos campos ya disfrutamos con las tecnologías presentes de importantes ventajas para el día a día de los ciudadanos.

(...)

|

Francisco Marín

- También se emplea para verificar los datos de predicción oceánica, incendios, aguas de ríos y lagos, el espesor del hielo polar y glaciación y la atmósfera. Sus datos permiten aumentar la resolución de los satélites ERS, ENVISAT y SPOT
4. El Sentinel 5, en cambio, está especializado en la observación de la calidad del aire, del ozono estratosférico y en monitorizar los efectos del cambio climático. Por tanto, es un satélite de gran utilidad para la salud pública, ya que existe una vinculación entre la calidad del aire y el desarrollo de enfermedades pulmonares y cardiovasculares. Además, su capacidad de observar las formación de nubes también es vital a la hora de predecir la generación eléctrica por parte de las placas solares.

Otros países, como Estados Unidos, China y Rusia cuentan con sus propias redes satelitales de observación. Algunas de ellas difunden datos de acceso abierto para cubrir con mayor precisión los mismos ámbitos de interés que los Sentinel. Otras, en cambio, tienen sistemas cerrados para uso comercial, gubernamental o militar.

En la última década, los drones han irrumpido cual elefante en una cacharrería para cambiar el paradigma en la observación de la Tierra. Estos vehículos, en vez de encontrarse a cientos de kilómetros de la superficie, vuelan mucho más cerca del suelo, por lo que es posible obtener una resolución mucho mayor del terreno. Los drones permiten equipar cámaras ópticas, térmicas, radares, LIDAR y otros muchos dispositivos de observación que, si bien no son tan completos y duraderos como las de los satélites, tienen un coste varios órdenes de magnitud menor y requieren de un equipo y conocimiento inferiores para su puesta en marcha.

Los drones, además, son una tecnología más flexible que los satélites. Algunos de ellos tienen componentes modulares y su uso puede adecuarse a las necesidades. Por ello, son muy útiles en la gestión de riesgos, puesto que permiten desde la detección temprana de incendios mediante cámaras térmicas, hasta la monitorización de los deslizamientos de tierra tras inundaciones. También se pueden utilizar para enviar mensajes a personas en riesgo y para indicar las rutas de evacuación más seguras.

En la actualidad, los drones están cobrando una importancia cada vez mayor en la agricultura. Así como desde los satélites se pueden detectar campos afectados por plagas, mediante campañas de observación de drones en un terreno concreto se pueden detectar plantas individuales afectadas por enfermedades o diferencias en la distribución del agua y de los nutrientes. Aunque, sin duda, la sinergia entre los datos de ambas tecnologías es lo que permite los mejores resultados.

Las cámaras y detectores toman información del terreno y la transforman en un lenguaje con el que sea posible trabajar. Pero con el aumento de la cantidad de drones y satélites, el número de datos para su análisis también crece, y los cambios, en ocasiones sutiles, pueden escapar a las capacidades humanas. Por ello, se han desarrollado plataformas de big data, aprendizaje automático e inteligencia artificial que permiten realizar los primeros preanálisis e incluso análisis completos de datos, para hacerlos entendibles a los humanos⁷.

Las redes neuronales profundas han supuesto, en ese sentido, un antes y un después en la identificación de patrones y anomalías. Gracias a ellas, se han podido establecer algoritmos de detección automática de incendios forestales o de cambios de uso de suelo con rapidez y precisión.

No obstante, cierta división en la comunidad científica acerca de cómo tratar estos datos. Por un lado, están aquellos que piensan que se debería adoptar el aprendizaje profundo para todo y, por el otro, los investigadores que se resisten a adoptar estas soluciones porque se trata de un modelo de «caja negra» en el que se sabe los datos que se introducen, pero no se pueden seguir todos los pasos de su procesado. Por ello, pueden aparecer artefactos que las inteligencias artificiales, o los humanos que las supervisan, podrían interpretar erróneamente⁸.

Donde sí que convergen un gran número de científicos es en la apuesta por plataformas colaborativas y de código abierto, como Google Earth Engine⁹. En estas plataformas, los astrónomos y científicos de datos crean y actualizan potentes herramientas de procesamiento de datos satelitales para el uso de toda la comunidad. La plataforma también contiene varios petabytes de información de acceso libre y gratuito para labores de investigación. De este modo, todo el mundo puede acceder a dichos datos y analizar tendencias y riesgos de cualquier parte del planeta.

Durante medio siglo de observación terráquea ha habido grandísimos avances, pero asociados a ciertos riesgos y nuevos retos. Entre ellos, la ESA destaca que la falta de certificación y estandarización de los datos procesados dificulta su análisis y su utilización. Por ello, una colaboración más estrecha entre las distintas agencias espaciales podría suponer un gran avance en el número de datos disponibles con los mismos recursos. Por otro lado, la cadena de custodia de los datos debe estar bien definida y vigilada por agentes externos, para asegurar que se mantienen íntegros de principio a fin. Además, es necesario

Tecnologías de Observación de la Tierra por altitud

Fuente: World Economic Forum



(...)
Comunicarse con cualquier punto del planeta, sin tener que depender de las redes fijas, caras y muy difíciles de implantar en algunas ocasiones, valga como ejemplo el inmenso territorio cubierto por el agua de los mares y océanos, es básicamente posible por las facilidades que nos dan los satélites que ya disponemos en el Espacio. Esa prestación, que es solo un ejemplo importante pero acotado, se va a ver magnificada por la incorporación de inteligencia distribuida en los equipos espaciales que aseguran su intensidad y mejoraran en gran medida su seguridad a través de las incorporaciones de las tecnologías cuánticas, entre otras muchas.
(...)
|
Francisco Marín

garantizar que los datos recopilados sean privados y no atenten contra los derechos individuales de las personas.

Dicho esto, los satélites y los drones pueden ser una herramienta muy poderosa a la hora de obtener información terrestre de áreas que se encuentran restringidas por las leyes vigentes o por motivos de seguridad nacional. Empleando las imágenes obtenidas, se puede garantizar que se están cumpliendo los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la ONU para 2030¹⁰, tanto en materia de derechos civiles y políticos, económicos, sociales y culturales en países donde la información terrestre puede ser contradictoria. Además, dichas imágenes pueden aportar una prueba objetiva en los tribunales internacionales de justicia para demostrar violaciones de los derechos humanos¹¹ que se puedan estar cometiendo.

En última instancia, el uso de inteligencia artificial y la integración de datos de sensores cada vez más avanzados, tanto en drones como en satélites, abre nuevas posibilidades para la anticipación y mitigación de riesgos futuros relacionados con el cambio climático o con otras acciones humanas. Por ello, se espera que la colaboración internacional y el acceso abierto a datos y tecnologías continúen impulsando la innovación en este campo, permitiendo a comunidades de todo el mundo mejorar su capacidad de adaptación ante desastres y eventos extremos.

La observación de la Tierra ha pasado, en definitiva, de ser una labor más bien artística a convertirse en una ciencia de precisión. El avance en drones, satélites y herramientas de análisis de datos ha permitido a la humanidad no sólo contemplar su planeta, sino también comprenderlo en profundidad y emplear dicho conocimiento en anticipar riesgos naturales y humanos con mayor eficiencia. Para dar los siguientes pasos se requiere una sinergia entre estos sistemas y el tratamiento sus datos, para lo que tanto la IA como las plataformas de datos de acceso abierto tendrán un rol crucial en un futuro.

Con estas tecnologías, los servicios de emergencias podrán reforzar su capacidad de respuesta y tomar decisiones informadas en ámbitos tan diversos como la gestión ambiental, la agricultura, la salud pública o la defensa de los derechos humanos. No obstante, este



progreso nos enfrenta a nuevos retos éticos, legales y de gestión de datos, que exigen mayor cooperación internacional y un compromiso firme con la protección de la privacidad y la integridad de la información. Así, el futuro de la observación terrestre dependerá del equilibrio entre innovación tecnológica, acceso abierto y responsabilidad colectiva para garantizar que estas herramientas se utilicen en beneficio de toda la humanidad y del planeta que habitamos. Tras repasar la evolución de estas tecnologías, conviene analizar cómo sus aplicaciones impactan en la economía, la gestión ambiental y la organización social.

Tecnología de observación terrestre más adecuada, según los casos de uso

CASO DE USO	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS	TECNOLOGÍA RECOMENDADA
Selección de emplazamientos de energía limpia	Identificación de ubicaciones óptimas para proyectos de energía renovable, incluidos los basados en energía solar, eólica, clara e hidroeléctrica, según las necesidades del emplazamiento, el análisis de factores ambientales, geográficos y sociales.		Espacio: La imagen satelital de radar de apertura sintética (SAR) permite la evaluación independientemente del clima o la hora del día, lo que la hace valiosa para regiones remotas y extremas, proporcionando datos críticos como pendientes para la evaluación y la idoneidad, velocidades del viento, topografía y disponibilidad de agua para las minas.
Monitorización de pesca ilícita	La observación terrestre (EO) ayuda a detectar y monitorear embarcaciones de pesca ilegal en aguas protegidas o zonas económicas exclusivas.		Espacio: La imagen satelital de alta resolución y los datos del Sistema de Identificación Automática (AIS) permiten un monitoreo preciso de las embarcaciones pesqueras en áreas remotas para identificar actividades y patrones sospechosos.
Cultivo	La optimización del rendimiento y la calidad de los cultivos, a la vez que se minimiza el uso de recursos, se basa en la comprensión de la variabilidad del campo y la salud de las plantas mediante la detección de variaciones en el contenido de clorofila y el estrés hídrico.		Aire: Las cámaras multispectrales en drones proporcionan datos oportunos de alta resolución para apoyar las decisiones diarias, particularmente donde los cultivos de un agricultor requieren agua adecuada sin desperdicio alguno.
Cálculo de primas de seguros	La evaluación de los factores de riesgo ayuda a determinar las primas de seguro adecuadas para propiedades y activos.		Espacio: La imagen satelital se utiliza para evaluar riesgos ambientales como inundaciones, incendios forestales y otros peligros naturales, durante un largo periodo de tiempo para crear una base continua que facilite la evaluación de la prima.
Conservación del patrimonio	La preservación de sitios históricos, edificios y monumentos requiere evaluaciones de su calidad actual y cambios graduales.		Terrestre: El escaneo láser 3D (LIDAR) crea modelos digitales detallados para capturar contornos y detalles que ayudan a los conservadores a monitorear los cambios estructurales (como microfisuras).

Fuente: World Economic Forum

Características

CASO DE USO	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS	TECNOLOGÍA RECOMENDADA
<div>CoberturaUbicación de interésNecesidades de respuestaSeries temporalesSensibilidad de los parámetros</div>			
			
			
			
			
			

Un planeta de datos que puede revolucionar la geoestrategia

EN ACCIÓN

Los datos EO (observación de la Tierra) representan alrededor del 86% de los generados en el segmento de las aplicaciones espaciales¹². Se prevé que en 2032 la observación satelital genere más de dos exabytes (2.000 millones de gigabytes)¹³ de datos acumulados, aunque su volumen y complejidad han dificultado históricamente su aplicación en soluciones viables. En términos económicos, el valor agregado potencial de los datos de la Tierra puede alcanzar los 700.000 millones en 2030 con una contribución acumulada de 3,8 billones al PIB mundial desde 2023¹⁴. El Gráfico 3 muestra las expectativas de crecimiento del mercado. Por cada aumento del 1% en la adopción por parte de los usuarios finales, se pueden añadir 9.800 millones de dólares adicionales en valor.

Hasta 2030, la adopción por parte de la economía global podría aumentar del 39% actual al 72%. Aproximadamente el 94% de ese valor corresponde a aplicaciones en agricultura, electricidad, gobierno, servicios públicos y de emergencias, seguros y servicios financieros, minería, petróleo y gas, y cadena de suministro y transporte. Se estima, asimismo, que la información de la EO puede ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en más de dos gigatoneladas anuales de CO₂e, que representan alrededor del 3,6% de las emisiones globales anuales actuales.

Inicialmente la EO ha estado impulsada por las contribuciones del sector público, especialmente las motivadas por intereses de defensa y seguridad, pero se ha consolidado una industria comercial con una fuerte tendencia de crecimiento. En tan solo dos años, de 2021

a 2023, creció más del 21%. Los ingresos de EO se generan principalmente en Norteamérica, que representa casi el 50% del valor de las ventas, debido a la presencia en los momentos iniciales de compañías muy grandes como AWS, Alphabet (Google) y Maxar. Le sigue Europa con más del 20% y Asia-Pacífico con algo menos del 20%.

En el futuro, se espera que los ingresos tanto en Europa como, sobre todo, en Asia (que podría expandirse al triple de velocidad y alcanzar un valor potencial de 315.000 millones de dólares), crezcan más rápido que en América del Norte, lo que conducirá a una distribución geográfica más equilibrada¹⁵. Al cierre de 2024, el sector de servicios de EO en Europa estaba compuesto por 796 empresas, según la European Association of Remote Sensing Companies (EARSC)¹⁶. Las más de 200 empresas europeas especializadas en los servicios de procesamiento de datos EO, análisis y apoyo a la toma de decisiones son especialmente competitivas: copan más del 50% del negocio global, el doble que las norteamericanas.

Desde una perspectiva puramente comercial, la observación de la Tierra puede ser una herramienta valiosa para mejorar el rendimiento empresarial¹⁷, al permitir la toma de decisiones basadas en datos que ayudan a minimizar el riesgo o a impulsar la eficiencia operativa en un entorno natural repleto de incertidumbres, debido al cambio climático, que podría someterse a enormes cambios. La ONU¹⁸ estima en 44 billones de dólares el valor económico que depende moderada o altamente de la naturaleza y el Marco Mundial para la Biodiversidad¹⁹ estima que el déficit de financiación de la biodiversidad alcanzará 700.000 millones de dólares anuales hasta 2030. De hecho, el Foro Económico Mundial ha identificado los fenómenos meteorológicos extremos como el principal riesgo global para la próxima década²⁰.

Destino Tierra (DestinE)²¹ es una iniciativa emblemática de la Comisión Europea para crear un gemelo digital de la Tierra. El objetivo es desarrollar un modelo digital de alta precisión para modelar, monitorizar y simular fenómenos naturales, peligros y las actividades humanas relacionadas. Asociada al cambio climático, la pérdida de ecosistemas naturales plantea riesgos sustanciales para las sociedades, como la escasez de recursos y la interrupción de servicios ecosistémicos.

El sector asegurador y financiero es, por ello, uno de los que más necesita los datos de EO para evaluar cómo los fenómenos meteorológicos extremos podrían afectar a sus activos. La mitigación de riesgos climáticos extremos y de desastres contribuye con unos 23.000 millones de dólares a hacer más viable la economía sostenible, y este valor podría triplicarse hasta 2030. Se entiende que compañías como Goldman Sachs se hayan unido al Laboratorio Watson del MIT-IBM²² para avanzar en la aplicación de la IA a la medición de la biodiversidad, un conocimiento crucial para escalar productos financieros basados en la naturaleza y para satisfacer las necesidades de evaluación de empresas e instituciones financieras. Las compañías de seguros



utilizan datos obtenidos por teledetección para evaluar mejor los riesgos de los activos cubiertos por ellas, ofrecer seguros paramétricos y optimizar la evaluación de siniestros.

La tecnología puede contribuir también a la mejora de la transparencia y al intercambio de información de organizaciones, gobiernos e instituciones, en los procesos de rendición de cuentas²³. Más del 50% de las variables climáticas esenciales solo pueden medirse a escala desde el espacio²⁴, lo que convierte a la EO en un factor clave para el cumplimiento de las exigencias ESG (medio ambiente, social y gobierno corporativo) en organizaciones multinacionales cuyas actividades abarcan múltiples geografías.

En la UE, la Directiva sobre la Presentación de Informes de Sostenibilidad Corporativa²⁵ (CSRD) exige la divulgación de información climática a las empresas que cotizan en mercados regulados desde 2024. Y el Reglamento sobre Deforestación de la UE (EUDR)²⁶ obliga a presentar informes sobre la procedencia de las materias primas. En Estados Unidos, el reglamento aprobado por la Comisión de Bolsa y Valores (SEC) insta a proporcionar también información relacionada con el clima, incluyendo la gobernanza de los riesgos y los GEI de alcance 1 y 2.

La observación de la Tierra (EO) puede mejorar significativamente la gestión logística proporcionando datos sobre rutas de transporte, patrones climáticos y disponibilidad de recursos²⁷. La startup escocesa Trade in Space²⁸ utiliza datos satelitales para garantizar que los productos se producen de forma sostenible, una práctica cada vez más extendida entre las empresas interesadas en la supervisión, tanto medioambiental como ética, de la cadena de suministro. En el caso de Satellogic, ayuda a acreditar el cacao “libre de deforestación” cosechado en África Occidental.

Los sistemas de información de las empresas del sector del transporte y logístico analizan los datos EO con inteligencia artificial para optimizar los plazos de entrega, minimizar el consumo de combustible, que puede reducirse hasta en un 3% con la consiguiente bajada de costes y de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y redirigir rutas ante interrupciones imprevistas. A medida que avanza la tecnología, se están incorporando además nuevas tipologías de datos, como la medición de materia particulada en rutas aéreas o los niveles de hielo marino para rutas de barcos.

Los datos de EO también pueden utilizarse para impulsar el crecimiento de los ingresos de algunas empresas que los producen y no los habían explotado hasta ahora. Surgen nuevos modelos de negocio, por ejemplo, en el sector de las aerolíneas, al integrarlos en productos y servicios para crear ofertas nuevas e innovadoras.

Por sectores, las aplicaciones agrícolas de EO pueden representar una oportunidad económica de casi 400.000 millones de dólares hasta 2030. Se ha

(...)
Observar lo que pasa en todo el planeta y poder extraer conclusiones de los comportamientos espontáneos de lo que sucede es solo posible gracias a las informaciones que nos aportan los satélites equipados con múltiples sensores de distintas especialidades. Conocer el estado de los territorios, evaluar el comportamiento de las tierras dedicadas a producir nuestros alimentos, ayudar a combatir los fuegos indeseados, facilitar las labores de logística múltiple existentes, tanto en tierra como en el agua, son algunas de las más evidentes ventajas que nos procuraran las próximas constelaciones de satélites que vigilarán desde los cielos nuestra vida cotidiana.

|
Francisco Marín

demostrado que los insumos de fertilizantes pueden reducirse entre un 4% y un 6% en general cuando se utilizan estos datos en la agricultura de precisión. En el ámbito de la energía, permiten evaluar el potencial energético de los nuevos emplazamientos solares, eólicos e hidroeléctricos, así como vulnerabilidades en infraestructuras a gran escala, como tuberías y redes eléctricas. Todo ello podría alcanzar un valor económico de 47.000 millones de dólares.

El sector de minería, petróleo y gas, con una tasa de adopción modelada de tecnologías EO cercana al 60%, tiene ante sí una oportunidad de negocio de 108.000 millones de dólares. Además, la información casi en tiempo real sobre fugas permitiría eliminar 1,7 Gt de emisiones de GEI al año. En el ámbito del cuidado personal, aplicaciones orientadas al consumidor como onX y Strava promueven actividades recreativas y deportivas combinando datos de ubicación con datos de EO para ayudar a las personas a mantenerse seguras y a aprovechar mejor el tiempo de entretenimiento. .

Pese a todo este mar de oportunidades que se abre para las empresas, hoy en día, el gasto público representa casi tres cuartas partes del mercado de datos y servicios de EO²⁹, mientras un buen porcentaje de la demanda comercial permanece “latente”. Algunos expertos advierten de que esa alta concentración de gasto en el sector público puede tener posibles inconvenientes, ya que por sí solo no puede sacar el máximo provecho a los datos de EO. Además, conforme las empresas del sector centran sus servicios en compradores gubernamentales, pueden demorar la inversión en el segmento comercial, dejando de lado los beneficios de sostenibilidad.

Motivos para el interés público no escasean, en cualquier caso. Las tecnologías geoespaciales se han aplicado ampliamente para abordar, por ejemplo, los desafíos urbanos y ambientales en las ciudades, dado que proporcionan varios niveles de detalle, temporales y espaciales³⁰. Los planificadores del uso del suelo a menudo se enfrentan a dificultades para la toma de decisiones como la de la información obsoleta, ya que conjuntos de datos clave, como el censo nacional y las encuestas de viajes, se actualizan con poca frecuencia. Esto dificulta obtener una visión actual del uso del suelo.

La Comisión Geoespacial de Reino Unido es una de las más activas en la lucha contra este problema y ha estudiado cómo se puede abordar los desafíos del uso de la tierra a través del Programa Nacional de Datos Terrestres³¹. El Instituto Alan Turing ha documentado en un informe independiente³² los hallazgos de la herramienta de código abierto *DemoLand*, lanzada en marzo de 2024, en el que analiza el papel de los datos de observación terrestre obtenidos por satélite y el desarrollo de grandes modelos lingüísticos (LLM).

En última instancia, en efecto, la Tierra es el mayor dominio inexplorado de la inteligencia artificial (IA), que ofrece la posibilidad de traducir datos brutos en información significativa, descubriendo los patrones y relaciones ocultos en la superficie terrestre, al nivel de cada árbol individual. Desde la coordinación de las cadenas de suministro hasta la gestión del riesgo climático y la planificación de infraestructuras urbanas, multitud de áreas económicas pueden verse beneficiadas por la gestión de datos geoespaciales.

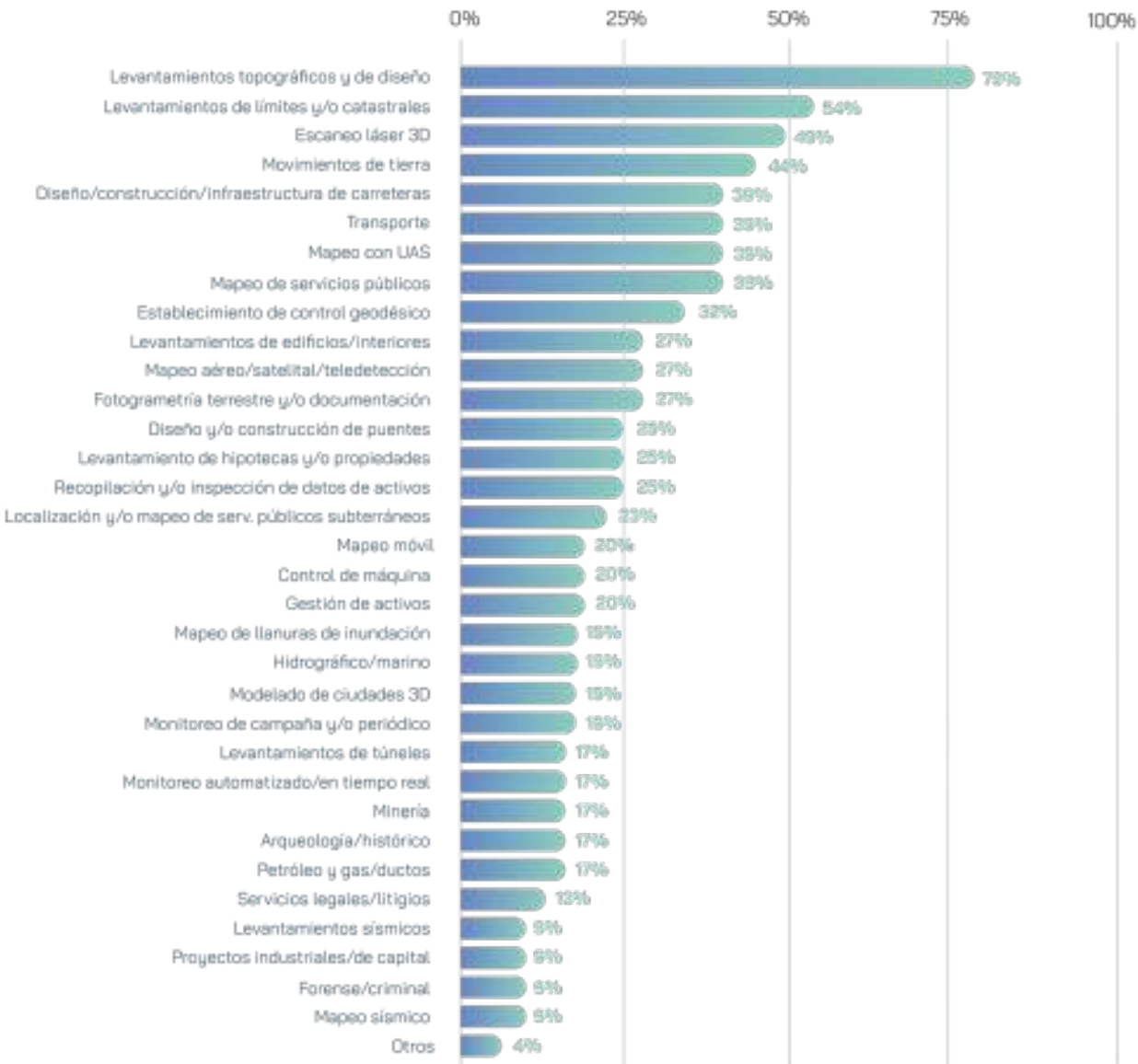
La IA ha conseguido avances significativos, pese a que los datos siguen siendo complejos y permanecen aislados en diversas fuentes, desde satélites a drones y multitud de sensores, accesibles en muchos casos solo para expertos. Los modelos basados en *machine learning*, entrenados con datos existentes, pueden generar ya estimaciones hasta 1.000 veces más rápido³³ que los modelos climáticos tradicionales. Esto puede reducir el tiempo de generación de modelos de pronóstico meteorológico, como los mapas de inundaciones, hasta en un 80%.

Uno de los conceptos emergentes en el ámbito de la IA aplicada a la observación de la Tierra (EO) es el de “incrustaciones”, una poderosa técnica que ayuda a la IA a aprender mediante la creación de resúmenes numéricos que capturan tanto el significado como el contexto, pero ocupan menos del 5% del tamaño original³⁴. Se trata de compresiones semánticas extremadamente poderosas localizadas ya en la base tecnológica de muchos de los nuevos mapas. El modelo abierto Clay, por ejemplo, ha demostrado una precisión superior al 90% en la clasificación del uso del suelo, la detección de acuicultura y la estimación de biomasa. Existen más de 60 modelos de IA para la Tierra, como SatCLIP de Microsoft, Privthi de la NASA o el propio Clay. Sin embargo, siguen siendo mayoritariamente de nicho, académicos y no operativos. Resulta difícil crearlos y usarlos, y es demasiado pronto para confiar en ellos en casos de uso críticos, como los desastres naturales.

A mediados de 2025, ninguno de los principales modelos de IA, como ChatGPT, Llama o Claude, había anunciado el uso de datos de la Tierra en su entrenamiento ni era capaz de comprenderlos. Los modelos emergentes de visión basados en *transformers* para datos geoespaciales, también llamados modelos de base geoespacial (GeoFM), pueden introducir una nueva y poderosa alternativa³⁵ para paliar esta brecha. Con datos etiquetados mínimos, los GeoFM pueden ajustarse a tareas personalizadas como la clasificación de la superficie terrestre, la segmentación semántica o la regresión a nivel de

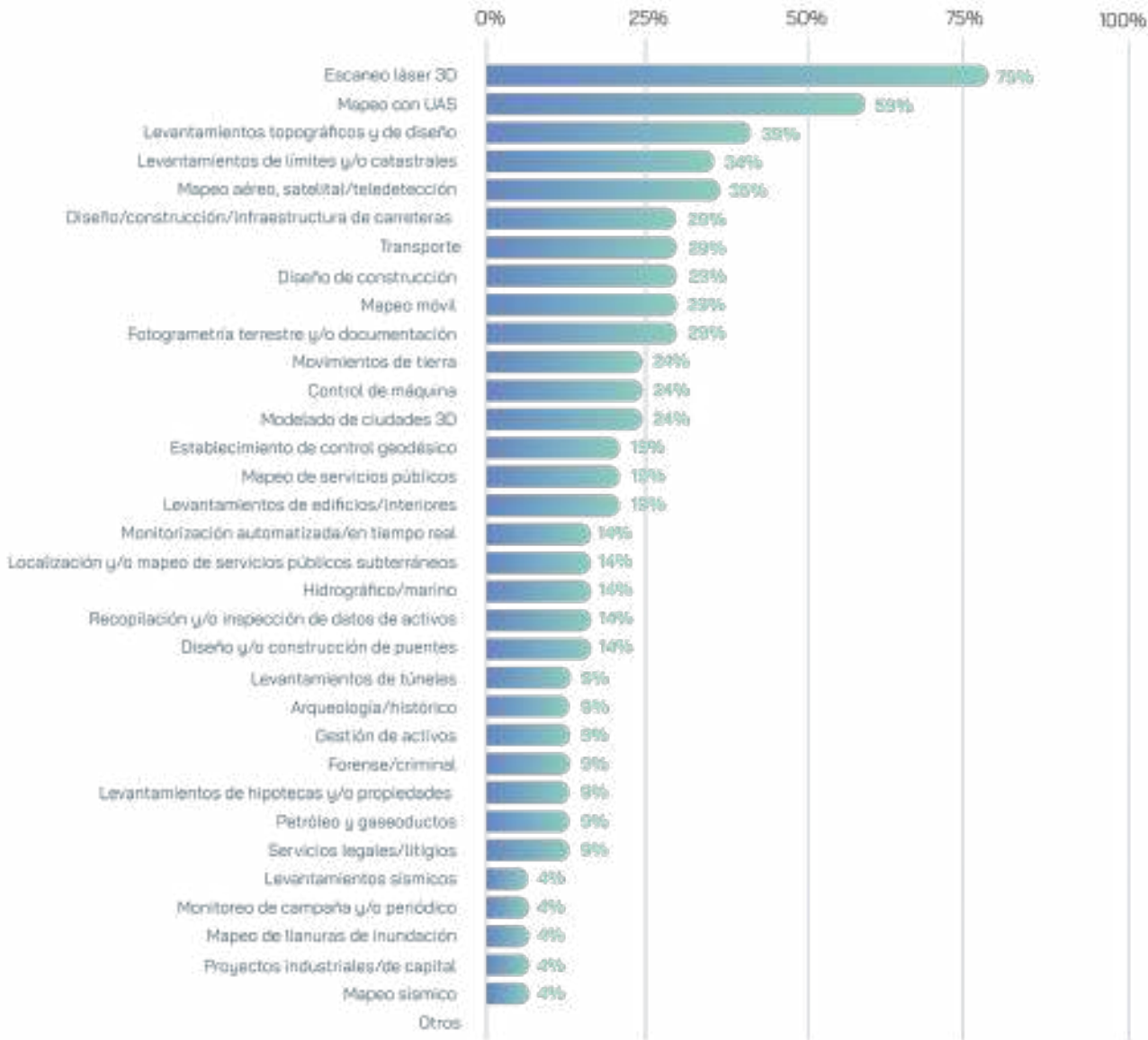
El mercado de la observación de la Tierra, según líneas de actividad actuales y futuras

1 Principales usos de las tecnologías geoespaciales



Fuente: Trimble

2 Líneas de expansión de las tecnologías geoespaciales



Fuente: Trimble

píxel. Muchos de los modelos líderes están disponibles bajo licencias muy permisivas, lo que los hace accesibles para un público amplio, como SatVision-Base, Prithvi-100M, SatMAE y Clay. Han servido para analizar, entre otras cuestiones desafiantes, la deforestación de la selva amazónica, dada la fuerte evidencia de que podría estar llegando pronto a un punto de inflexión³⁶.

Las empresas tecnológicas llevan tiempo tomando medidas en un asunto tan crítico. Microsoft Planetary Computer Pro³⁷ es una plataforma integral para el aprovechamiento de datos geoespaciales y Google ha organizado la información *geoespacial* mundial durante décadas. En noviembre de 2024, presentó dos modelos multipropósito preentrenados para abordar muchos de los desafíos asociados a ella: el modelo fundacional de dinámica poblacional (PDFM)³⁸, que captura la compleja interacción entre el comportamiento de la población y su entorno local, y un nuevo modelo fundacional de movilidad basado en trayectorias (TFMM)³⁹. Más de 200 organizaciones han probado ya las integraciones del PDFM en Estados Unidos y Google estaba ampliando a mediados de 2025 el conjunto de datos para incluir a Reino Unido, Australia, Japón, Canadá y Malawi.

El siguiente paso de Google es el lanzamiento de un sistema de razonamiento geoespacial, que integre todos estos modelos básicos con IA generativa para acelerar la resolución de problemas. WPP, Airbus, Maxar con su ‘globo viviente’ y Planet Labs se han sumado ya a la iniciativa. Según esta visión, con la ayuda de la tecnología, un gestor de crisis podrá visualizar el contexto previo a un desastre natural en imágenes satelitales de código abierto utilizando Earth Engine y compararlo con la situación posterior al acontecimiento, importando imágenes aéreas de alta resolución propias o de fuentes externas. Las inferencias basadas en el análisis de esas imágenes, mediante modelos de base, ayudan a identificar las áreas más dañadas. Se puede, a continuación, corroborar con la inteligencia artificial de WeatherNext dónde persisten todavía los mayores riesgos y consultar a Gemini el posible alcance económico del desastre y cómo priorizar las acciones de socorro teniendo en cuenta el índice de vulnerabilidad social⁴⁰.

Relacionado con esto, los sistemas de alerta temprana ayudan a predecir posibles peligros naturales como

inundaciones, incendios forestales, tsunamis, terremotos y deslizamientos de tierra, y avisan a las comunidades afectadas. Una demora en la respuesta puede hacer que los daños se incrementen y se pierdan vidas. La ONU ha creado la iniciativa Alertas Tempranas para Todos⁴¹ y colabora con el Grupo de Observación de la Tierra (GEO), aplicando técnicas de análisis de vulnerabilidad. En Japón, la información geoespacial ayuda a evaluar los riesgos de inundación en la zona del río Arakawa en Tokio, que posteriormente se muestran en un Mapa de Riesgo de Inundación 3D. Esta información incluye datos como la profundidad máxima de inundación y los períodos de retención de inundaciones, que se complementan con actualizaciones en vivo de cámaras a lo largo del río.

Hay más ejemplos. El nuevo marco de observación desarrollado por la Academia China de Ciencias⁴², integra 15 indicadores para identificar provincias, ciudades y, en algunos casos, incluso manzanas de ciudades con mayor riesgo de marejadas ciclónicas. El estado federado alemán de Renania del Norte-Westfalia ha implementado un gemelo digital para facilitar la gestión de desastres. Utiliza una aplicación 3D dirigida al personal responsable de gestionar las respuestas que no cuenta con conocimientos profundos sobre sistemas de información geográfica.

El impacto potencial en el bienestar de las personas de la EO está demostrando ser inconmensurable. Los datos satelitales temporales de alta resolución y las técnicas analíticas avanzadas con IA pueden ayudar a prevenir brotes de enfermedades, mapear poblaciones, comprender la desigualdad de género, facilitar la transparencia de la cadena de suministro e interrumpir las redes de trata de personas⁴³. Las aplicaciones combinadas de IA con tecnologías geoespaciales para lograr los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), específicamente en Oriente Medio y Asia, se han convertido en un componente fundamental de la estrategia de crecimiento económico y desarrollo de muchos países.

Para promover el intercambio de información, la OMS en Europa abrió su Centro Europeo de Coordinación Geoespacial en Estambul (Turquía) en noviembre de 2023. Su objetivo es empoderar a los países de la región para que utilicen eficazmente los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la toma de decisiones de salud pública más rápidas e informadas⁴⁴. La ubicación geográfica se encuentra, de hecho, en la raíz de muchas desigualdades fundamentales en materia de salud, derivadas del acceso a servicios como vacunas, pruebas de detección y medicamentos. La información de calidad salva vidas, los datos y la tecnología geoespaciales son fundamentales para ampliar el acceso a la atención médica, responder ante emergencias sanitarias.

El verdadero potencial de los datos geoespaciales aparece cuando éstos son accesibles, comprensibles y prácticos. Como sucede con las tecnologías de consumo, cuidar la experiencia de usuario (UX), mediante un diseño específico, puede ser clave para garantizar que los datos complejos sean fá-

ciles de emplear en la toma de decisiones informadas. Se trabaja en la interacción mediante lenguaje natural con los datos, en la integración de múltiples sensores a través de una interfaz unificada, en alertas inteligentes y en paneles de apoyo.

Varias empresas están ampliando los límites de la UX en la EO, como Element84⁴⁵ en el campo de los datos satelitales, incluido su trabajo en *Cumulus*⁴⁶, un sistema respaldado por la NASA. Development Seed⁴⁷ es líder en la creación de plataformas geoespaciales modulares de código abierto⁴⁸, y en la misma línea se sitúan los paneles del Programa de respuesta a desastres de Esri⁴⁹; la herramienta *NASA Worldview*⁵⁰ ofrece acceso intuitivo a imágenes satelitales globales sobre la calidad del aire, la temperatura de la superficie del mar y los peligros naturales; y el Sistema de Monitorización Ambiental Mundial del PNUMA⁵¹ de la ONU, es otro ejemplos de plataforma en la que se ha puesto especial cuidado en la experiencia de usuario.

Las normas ambientales tienden a centrarse más en *qué* medir que *en cómo* hacerlo. Hace falta de evitar un panorama fragmentado de soluciones y enfoques. Para ello conviene fortalecer las conexiones entre la comunidad geoespacial abierta y el ecosistema de datos abiertos en general⁵². Una comunidad global activa trabaja, en efecto, para crear herramientas de código abierto que establezcan canales de análisis de datos de EO. La NASA, la Agencia Espacial Europea (ESA) y numerosas empresas de satélites comerciales colaboran en proyectos como la Biblioteca de Abstracción de Datos Geoespaciales (GDAL) y la API de Tareas de Sensores (STAPI).

El CERN se asoció con EnduroSat, NTU Athens y AGE-NIUM Space para aplicar las capacidades de inteligencia artificial existentes en el primero de ellos y permitir el filtrado de datos en tiempo real a bordo de satélites de EO. La NASA ha adjudicado diversos contratos para desarrollar servicios comerciales de comunicaciones espaciales cercanas a la Tierra, en el marco del Proyecto de Servicios de Comunicaciones (CSP), a compañías como Inmarsat, Kuiper, SES, SpaceX, Telesat y Viasat.

Los estándares abiertos como SpatioTemporal Asset Catalog (STAC)⁵³ y Analysis Ready Data (ARD) del Comité de Satélites de Observación de la Tierra (CSAT)⁵⁴



Las tecnologías ópticas son el núcleo de la observación geoespacial moderna. Los avances en ópticas de alta resolución y detectores multi-espectrales permiten analizar el planeta con una precisión sin precedentes, detectando cambios en el medio ambiente, la agricultura o las infraestructuras. La combinación de óptica avanzada e inteligencia artificial está impulsando una nueva generación de sensores inteligentes y consolidando la autonomía tecnológica en sectores estratégicos como el clima, la energía y la seguridad.

|
Pablo Artal

también pueden ayudar a cerrar la brecha. Su objetivo es garantizar la interoperabilidad y maximizar el valor de los datos geoespaciales. Están impulsados por la industria, con el apoyo de la comunidad de código abierto en coordinación con grupos como Cloud-Native Geospatial Foundation y el Committee on Earth Observation Satellites (CEOS).

La adopción por parte de los principales actores de la industria es ya significativa y plataformas en la nube están poniendo a disposición del público los datos y las herramientas de análisis de EO, para apoyar la I+D. Umbra⁵⁵ lo está haciendo incluso con datos comerciales SAR (Radar de Apertura Sintética), en lo que supone otro enfoque prometedor para apoyar la expansión de la economía geoespacial. Pero no es suficiente, se requiere aún más trabajo en el ecosistema de EO para establecer definiciones consistentes, generar consenso y aumentar la adopción de estándares.

El Consorcio Geoespacial Abierto (OGC) se centra también en facilitar una mejor toma de decisiones mediante estándares abiertos y consensuados que promueven la interoperabilidad de datos y la colaboración intersectorial⁵⁶. Una de sus áreas de interés es la protección de los cables submarinos que transmiten casi el 99% del tráfico de internet y se enfrentan a problemas de visibilidad, contexto y coordinación, especialmente entre jurisdicciones y sectores. Sólo en 2023, la Unión Internacional de Telecomunicaciones de la ONU registró casi 200 fallos de cables. Alrededor del 80% de ellos se atribuyeron a la actividad humana, desde anclas a pesca, construcción o manipulación, y ahí es donde entran en juego los estándares geoespaciales.

En el sector público, los programas nacionales y las colaboraciones internacionales desempeñan un papel importante en el desarrollo de capacidades de observación de la Tierra de próxima generación. Programas como Copernicus⁵⁷ en la Unión Europea y Landsat⁵⁸ en Estados Unidos, de los que se ha hablado en el primer apartado de este capítulo, son reconocidos por su trayectoria en teledetección satelital. La NASA y la Organización de Investigación Espacial de la India (ISRO) se han asociado para desarrollar el satélite de radar de apertura sintética (NISAR) NASA-ISRO. El apoyo continuo a estos programas y a otros similares en todo el

mundo es crucial para democratizar el acceso a los datos terrestres obtenidos mediante teledetección.

El acceso equitativo también puede ser impulsado por organizaciones que pasan de los datos a la información, capacitando así a usuarios sin experiencia geoespacial especializada para actuar. Digital Earth Africa⁵⁹ trabaja para convertir datos de EO disponibles gratuitamente en información y servicios útiles para abordar los desafíos en materia de seguridad alimentaria, hídrica y económica del continente.

En última instancia, la necesidad acabará creando las herramientas. Los investigadores del proyecto FFG Estimation, del Instituto de Geodesia de la Universidad Tecnológica de Graz (TU Graz), dirigido a reunir fuentes de datos para una observación de los cambios en la Tierra más precisa, se encontraron con que uno de sus principales desafíos era que los operadores de satélites, como Starlink, OneWeb y el proyecto Kuiper de Amazon, no divulgan información sobre la estructura de sus señales, que cambian constantemente⁶⁰. Tampoco proporcionan datos precisos sobre la órbita ni mediciones de distancia de los satélites, lo que puede generar errores en los cálculos. Analizaron la señal de Starlink y descubrieron sonidos constantemente audibles que, aplicando el efecto Doppler y utilizando una antena satelital fija disponible comercialmente, les permitieron determinar la posición de los satélites con una precisión de 54 metros. De ese modo, los investigadores pueden calcular datos orbitales, determinar posiciones y estimar el campo gravitacional terrestre con mayor precisión.

Pioneros en satélites, el siguiente desafío son las imágenes

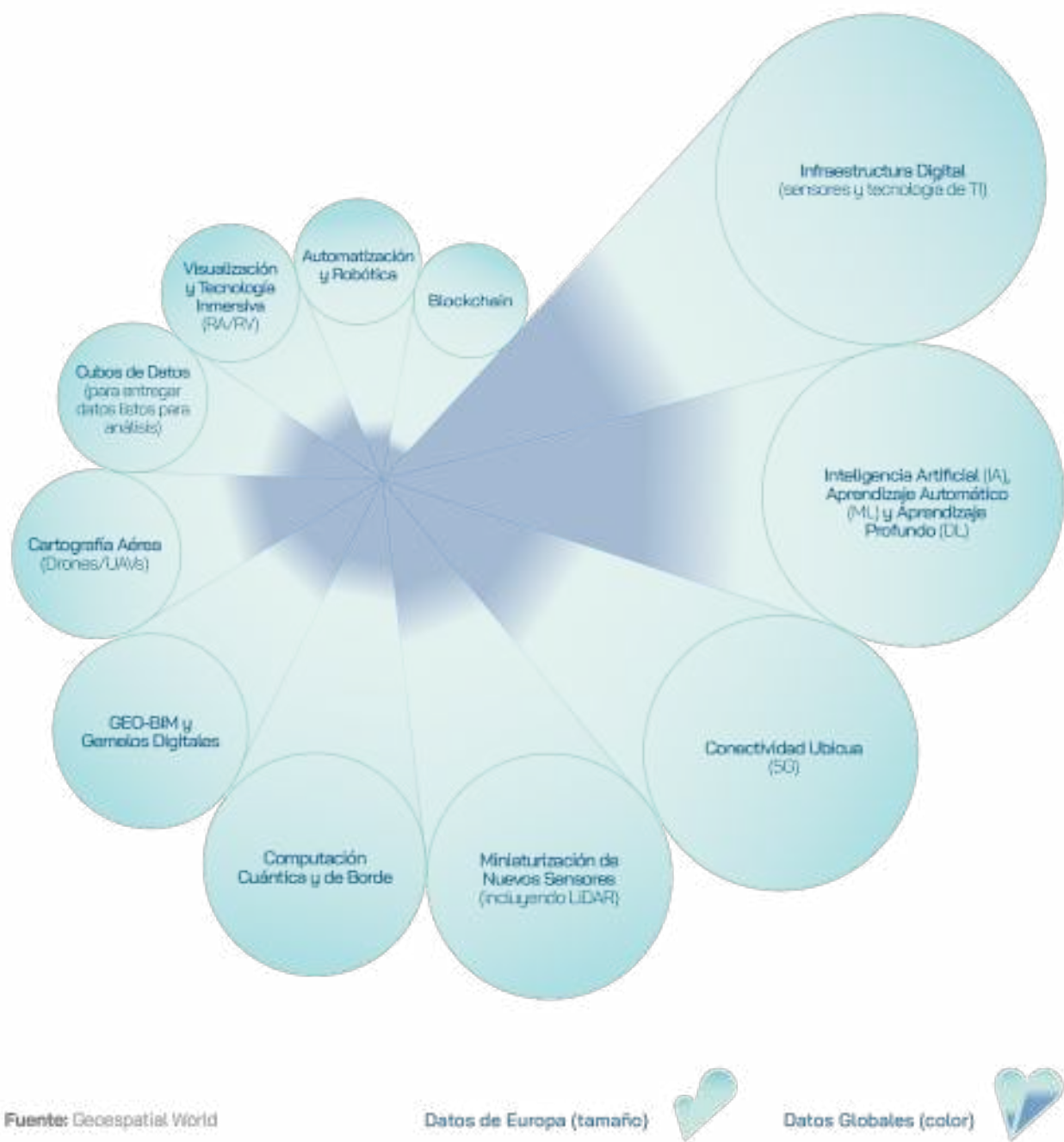
ESPAÑA

El sector de las tecnologías geoespaciales en España está enfocado principalmente a la recopilación, análisis y visualización de datos geográficos a través de sistemas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), el GPS y la teledetección. La Infraestructura de Datos Espaciales de España (IDEE) centraliza la información de las administraciones públicas y ha desarrollado herramientas como API CNIG que permite integrar de una forma muy sencilla un visualizador de mapas interactivo en cualquier página web. En el ámbito de la información satelital, nuestro país ha participado en proyectos relevantes como el del satélite español PAZ, lanzado el 22 de febrero de 2018 a bordo de un cohete Falcon 9, desde la Base Aérea de Vandenberg (California). Se trata de un satélite de tecnología radar que puede tomar más de 100 imágenes diarias de entre un metro y 25 cm de resolución, tanto diurnas como nocturnas, y con independencia de las condiciones meteorológicas. Está operado por Hisdesat y forma parte del PNOTS (Programa Nacional de OT por satélite).

Una de las compañías históricas del sector en España desde su fundación a mediados de los años 80 es GMV Innovating Solutions. Proporciona soluciones geoespaciales de alta tecnología a un amplio espectro de sectores, desde el espacio y la defensa hasta los sistemas de transporte inteligentes y la ciberseguridad. Entre las empresas de base tecnológica más interesantes de nuestro país destaca FlyPix AI, especializada en la transformación de datos geoespaciales en información procesable mediante inteligencia artificial (IA). Su objetivo es mejorar la detección, localización y la monitorización de objetos, haciendo que las imágenes geoes-



Principales Impulsores Tecnológicos de la Industria Geoespacial Europea



paciales complejas sean comprensibles y útiles para distintas aplicaciones. Aistech Space, por su parte, aprovecha las imágenes satelitales de alta resolución para mejorar las prácticas agrícolas, la monitorización ambiental y la gestión de desastres. Al integrar datos satelitales con sensores terrestres y otras entradas de información, puede desarrollar modelos que proporcionen información práctica sobre la salud de los cultivos, el uso del agua y la gestión de nutrientes.

En el caso de, Aistech Space su especialidad son las imágenes térmicas desde el espacio. Gracias a ello, puede estimar el contenido de agua en la vegetación, realizar una detección precisa de incendios y monitorizar las condiciones de la superficie de la Tierra en cualquier condición de iluminación. CARTO es pionera en el análisis y visualización de datos espaciales directamente en la nube. Su tecnología puede integrarse con las principales soluciones de almacenamiento de datos como BigQuery, Snowflake, Redshift o Databricks. Ha creado una interfaz intuitiva de arrastrar y soltar que ayuda a desarrollar canales de análisis detallados y democratizar el acceso al procesamiento avanzado de datos espaciales. Con la ayuda también, como en el caso anterior, de la IA, la barcelonesa EarthPulse consigue simplificar la complejidad de las imágenes satelitales para transformarlas en conocimientos prácticos para diferentes sectores. Su tecnología, con herramientas avanzadas como SPAI (Satellite Processing Application Interface), se utiliza para evaluar el impacto de los desastres naturales, ayudar en los esfuerzos de conservación y mejorar la gestión de infraestructuras.

La plataforma digital de Geocento ofrece una puerta de entrada única a más de 250 satélites, y ha generado un sistema basado en créditos para la adquisición de imágenes, que incluye capacidades avanzadas para análisis derivados y aplicaciones de valor añadido, con soluciones como *EarthImages NEO*. Imageryst, por su parte, transforma imágenes satelitales y de drones en conocimientos geoespaciales procesables aprovechando el poder de la teledetección y la IA. Un caso singular es el de Influunt AI, que se ha especializado en el campo de la inteligencia de aguas superficiales. Utiliza datos satelitales de vanguardia y algoritmos de IA para proporcionar información integral sobre la dinámica del agua superficial para sectores como la gestión ambiental, la agricultura y la planificación urbana.

La innovación de isardSAT, +D con sede en Barcelona, consiste en procesar datos de instrumentos de microondas, que tienen diversas aplicaciones ambientales e hidrológicas: puede hacer seguimiento de sequías y evaluar los efectos del cambio climático en el hielo y las masas de agua. A través de su unidad de servicios, Lobelia Earth, está calibrando riesgos y oportunidades vinculados a escenarios climáticos, lo que ayuda en la planificación estratégica de organismos gubernamentales y empresas del sector privado.

Relación de notas

¹Landsat science (Sin fecha) NASA. Disponible en: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/> (Consultado el 28/07/2025).

²Landsat 9 (2022) NASA. Disponible en: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/> (Consultado el 28/07/2025).

³(2025). ARSET - Introduction to NASA Earth Observations and Tools for Wildfire Monitoring and Management. NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET). Disponible en: <https://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/english/arset-introduction-nasa-earth-observations-and-tools-wildfire>

⁴Marsh, A. (2022) Landsat proved the power of Remote Sensing, IEEE Spectrum. Disponible en: <https://spectrum.ieee.org/landsat> (Consultado el 28/07/2025).

⁵UCS Satellite Database (2023) Union of Concerned Scientists. Disponible en: <https://www.ucs.org/resources/satellite-database> (Consultado el 28/07/2025).

⁶SentiWiki (Sin fecha) SentiWiki Home. Disponible en: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentiwiki> (Consultado el 28/07/2025).

⁷Reichstein, M. et al. (2025) Deep learning and process understanding for data-driven Earth System Science [Preprint]. doi:10.5194/egusphere-egu24-15874.

⁸Zhu, X.X. et al. (2017) ‘Deep learning in remote sensing: A comprehensive review and list of resources’, IEEE

Geoscience and Remote Sensing Magazine, 5(4), pp. 8–36. doi:10.1109/mgrs.2017.2762307.

⁹(Sin fecha) Google Earth engine. Disponible en: <https://earthengine.google.com/> (Consultado el 28/07/2025).

¹⁰EO4HR: Earth observation for human rights (Sin fecha a) EO4HR: Earth Observation for Human Rights | Activities Portal. Disponible en: <https://activities.esa.int/4000138000> (Consultado el 28/07/2025).

¹¹Drones in the service of human rights (2020) Human Rights Watch. Disponible en: <https://www.hrw.org/news/2017/12/11/drones-service-human-rights> (Consultado el 28/07/2025).

¹²Minoo Rathnasabapathy, Nikolai Khlystov, “10 new tech trends transforming Earth observation and climate Intelligence”, World Economic Forum, 16 de septiembre de 2024

¹³Prachi Kawade, “Las implicaciones del aumento de los datos de observación de la Tierra”, Analysys Mason, 31 de octubre de 2023, consultado el 30/07/2025

¹⁴“Amplifying the Global Value of Earth Observation”, World Economic Forum / Deloitte, mayo de 2024

¹⁵“EO and GNSS Market Report”, EUSPA, 2024, doi: 10.2878/73092

¹⁶“EARSC Industry Survey 2024”, EARSC

¹⁷Arthur Anglin, “Earth observation: A trillion-dollar opportunity for sus-

tainable economic growth”, Deloitte, 2 de septiembre de 2024, consultado el 30/07/2025

¹⁸“Biodiversity - our strongest natural defense against climate change”, un.org, n. d.

¹⁹cbd.int/gbf

²⁰“The Global Risks Report 2025”, World Economic Forum, enero de 2025

²¹destination-earth.eu

²²mitibmwatsonailab.mit.edu

²³“Earth Observation can help tackle global challenges from space – here’s how”, World Economic Forum, 25 de marzo de 2025

²⁴“Global Future Council on Space Space for Net Zero”, World Economic Forum, septiembre de 2021

²⁵europar.leuropa.eu/news/en/press-room/20221107IPR49611/sustainable-economy-parliament-adopts-new-reporting-rules-for-multinationals

²⁶https://green-forum.ec.europa.eu/nature-and-biodiversity/deforestation-regulation-implementation_en

²⁷“The Executive’s Playbook on Earth Observation”, World Economic Forum / Deloitte, enero de 2025

²⁸tradeinspace.com

²⁹“Global market for commercial Earth Observation data and services to reach \$7.6 billion by 2032”, Euroconsult, 28 de noviembre de 2023

³⁰Yang Li, Haibo Feng, How geospatial technologies are transforming urban net-zero energy buildings: A comprehensive review of insights, challenges, and future directions, Journal of Building Engineering, 15 de junio de 2025, doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112357

³¹Mehul Doshi, “How geospatial AI can help inform our land use choices”, Gobierno de Reino Unido, 14 de noviembre de 2024

³²gov.uk/government/publications/geospatial-ai-for-land-use-by-the-alan-turing-institute

³³Christopher S. Bretherton, Old Dog, New Trick: Reservoir Computing Advances Machine Learning for Climate Modeling, Geophysical Research Letters, 30 de agosto de 2023, doi.org/10.1029/2023GL104174

³⁴Bruno Sánchez-Andrade Nuño, “How AI is revolutionizing Earth observation”, World Economic Forum, 21 de octubre de 2024

³⁵Karsten Schroer, Bishesh Adhikari, Iza Moise, “Revolutionizing earth observation with geospatial foundation models on AWS”, AWS, 29 de mayo de 2025, consultado el 25/07/2025

³⁶Bernardo M. Flores, Critical transitions in the Amazon forest system, Nature, 14 de febrero de 2024, doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0

³⁷Douglas Phillips, “Microsoft Planetary Computer Pro: Unlocking AI-powered geospatial insights for enterprises across industries”, Microsoft, 17 de junio de 2025, consultado el 25/07/2025

³⁸David Schottlander, “Insights into population dynamics: A foundation model for geospatial inference”, Google, 14 de noviembre de 2024, consultado el 30/07/2025

³⁹Shushman Choudhury et al. Towards a Trajectory-powered Foundation Model of Mobility, Geolndustry’24, octubre de 2024, doi.org/10.1145/3681766.3699610

⁴⁰atsdr.cdc.gov/place-health/php/svi/index.html

⁴¹un.org/en/climatechange/early-warnings-for-all

⁴²Kareff Rafisura, Ladislav Charouz, “Geospatial Innovation Is Transforming Climate Adaptation in Asia”, 13 de noviembre de 2024, Earth.org

⁴³Srabani Das et al. Applications of Geospatial and Information Technologies Toward Achieving Sustainable Development Goals, en Application of Remote Sensing and GIS in Natural Resources and Built Infrastructure Management, enero de 2023, doi: 10.1007/978-3-031-14096-9_1

⁴⁴“Connecting maps, data and health: introducing the WHO European Geospatial Coordination Hub”, OMS, 5 de enero de 2024

⁴⁵element84.com

⁴⁶ntrs.nasa.gov/citations/20200000374

⁴⁷developmentseed.org

⁴⁸earthdata.nasa.gov

⁴⁹esri.com/en-us/disaster-respon-

se/overview

⁵⁰ worldview.earthdata.nasa.gov

⁵¹ unep.org/explore-topics/environmental-rights-and-governance/what-we-do/monitoring-and-assessment/global

⁵² “2024 Geospatial Trends”, Comisión Europea, octubre de 2024

⁵³ stacspec.org/en

⁵⁴ ceos.org/ard

⁵⁵ umbra.space/open-data

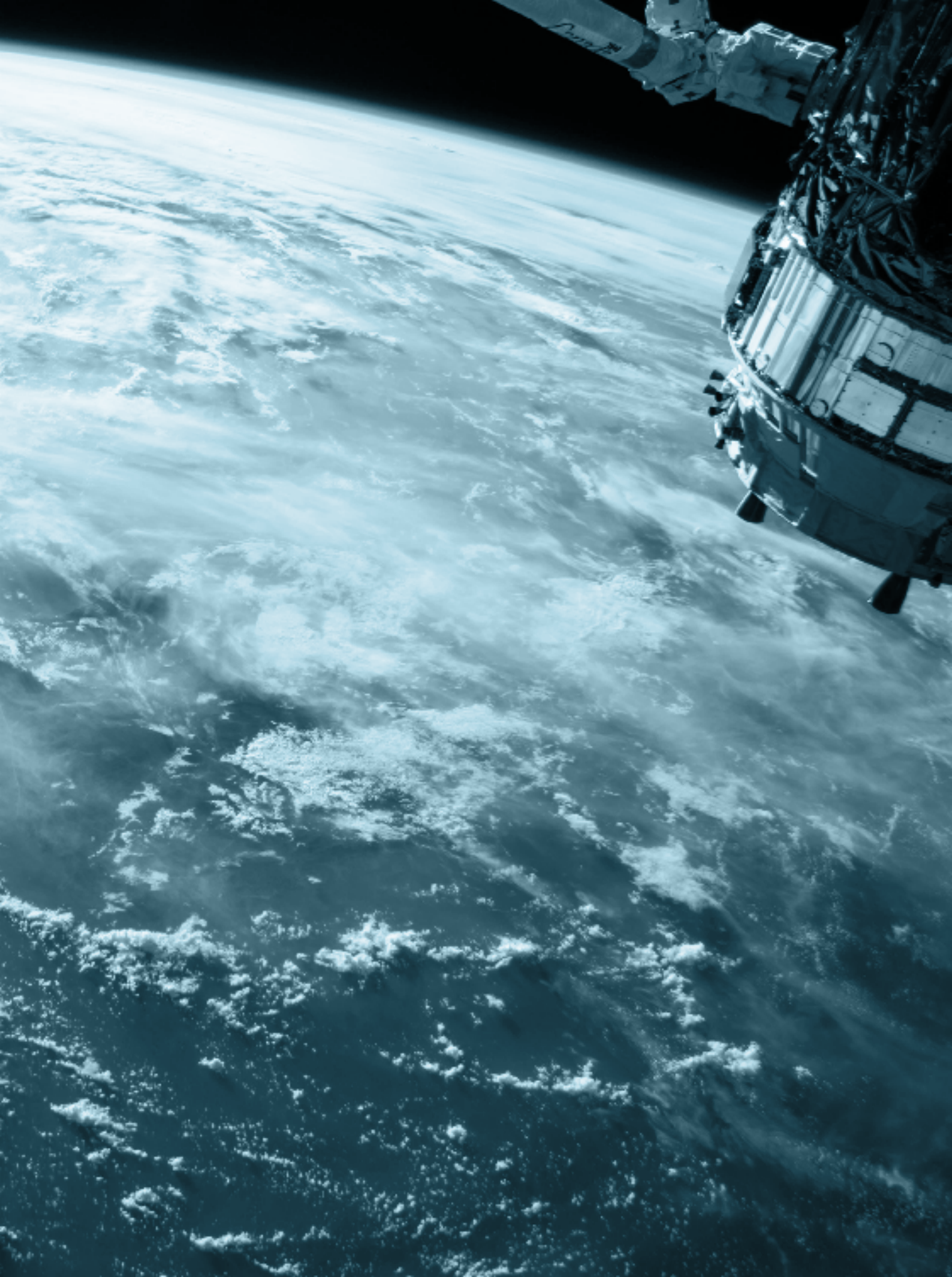
⁵⁶ Christy Monaco, “The Vital Role of Undersea Cable Infrastructure and the Importance of Geospatial Standards”, OGC, 20 de mayo de 2025, consultado el 30/07/2025

⁵⁷ copernicus.eu/en

⁵⁸ landsat.gsfc.nasa.gov/

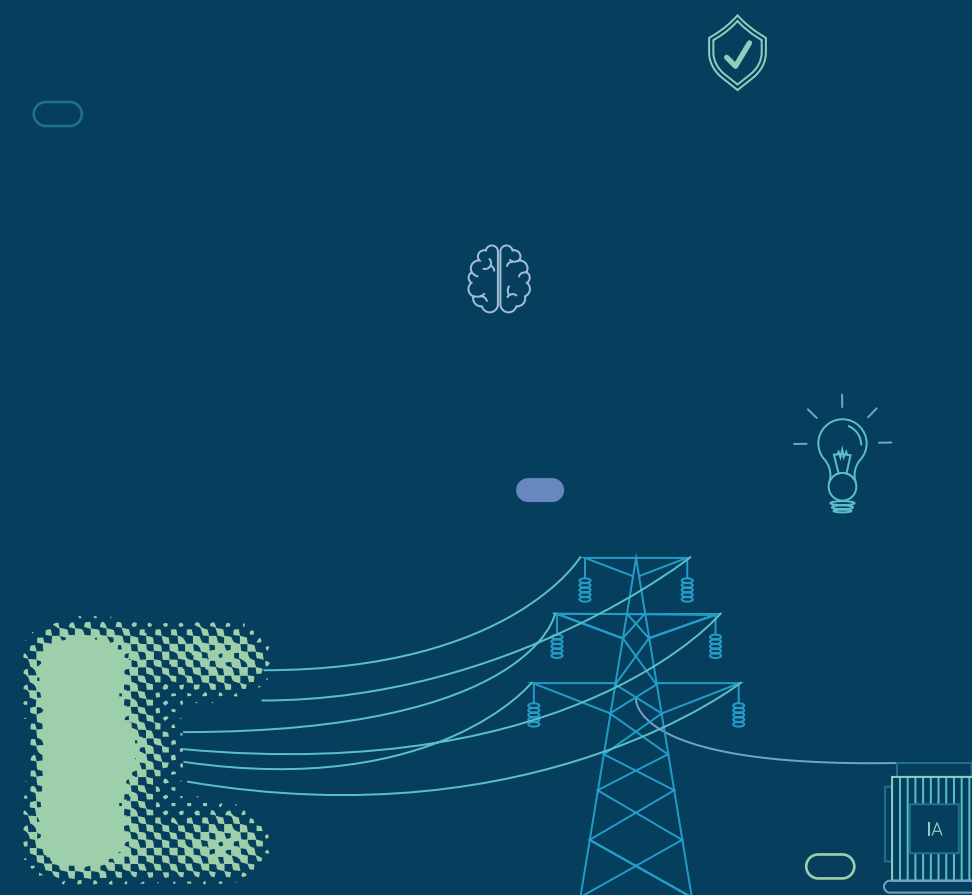
⁵⁹ “2022 annual report”, Digital Earth Africa, 25 de enero 2023.

⁶⁰ Falko Schoklitsch, “Utilizing communication satellites to survey Earth”, Phys.org, 7 de marzo de 2025, consultado el 30/07/2025



10

Redes eléctricas seguras e inteligentes



Introducción

Las redes eléctricas son los vasos sanguíneos de la civilización moderna. La mayoría de los sistemas que utilizamos en nuestro día a día dependen de un modo u otro de que la electricidad llegue hasta ellos y cualquier fallo, como el que pudimos experimentar en la península ibérica el día 28 de abril de 2025, es una muestra lo vital que es este suministro constante para la civilización. En un gran número de viviendas, sin electricidad no hay agua caliente, ni posibilidad de cocinar, ni calefacción, ni comunicación con los seres queridos, por lo que es necesario garantizar que esas situaciones no vuelvan a ocurrir.

Por ello, el sistema está viviendo una transición hacia un futuro más resiliente, eficiente y sostenible, lo que supone uno de los mayores desafíos y oportunidades del siglo. Esta transición pasa por la correcta implementación de sistemas redundantes e inteligentes, donde la inteligencia artificial, el almacenamiento químico y la ciberseguridad trabajen en conjunto para convertirse en los pilares de una arquitectura eléctrica moderna.

De la simple infraestructura a la energía inteligente

POR DENTRO

Las primeras centrales eléctricas funcionaban con corriente continua, por tanto, debían ubicarse en zonas muy cercanas al suministro. Es decir, los generadores se situaban en edificios aledaños o, directamente, en el interior de las fábricas o lugares donde se necesitaba electricidad. Este hecho limitaba en gran medida el suministro eléctrico ya que, para generar electricidad, se necesita hacer girar turbinas que permitan hacer girar bobinas en el interior de un campo magnético. Hacían falta ríos que moviesen las turbinas o se requería la quema constante de carbón para aprovechar los principios de la máquina de vapor.

En España, el primer uso de electricidad para alumbrado documentado fue obra del entonces catedrático de química general de la Universidad de Santiago, Antonio Casares, en abril de 1951¹. El profesor instaló en el claustro de la Universidad un arco voltaico de dos barras de grafito alimentado por 50 baterías. Al caer la noche, Casares conectó el aparato que iluminó, para admiración del público y de la prensa de la época, el patio y la torre de la iglesia de la Universidad.

Repetiría el experimento el 24 de julio de 1852, antes de las fiestas de Santiago, en una de las fachadas de la catedral tras reunir a una gran parte de la población. Tal fue el asombro del público que, según recoge el libro *La chispa mágica* de Armando Cotarelo, uno de los bibliotecarios de la universidad exclamó: “*A noite está varrida da terra*” (la noche está barrida de la tierra). Tras él, varios químicos y farmacéuticos emplearon sistemas similares para iluminar sus negocios. Y, poco a poco, la electricidad fue haciendo acto de presencia en distintas

fábricas. Posteriormente, en 1875, se inauguró la primera central eléctrica comercial en Barcelona. Dicha central se construyó para dotar de electricidad a la empresa de motores *La Maquinista Terrestre y Marítima* que, a su vez, se convirtió en el primer cliente de una central eléctrica en España.

No sería hasta 1881, cuando se vería el primer alumbrado público en funcionamiento en Comillas, Cantabria². Allí, el Marqués Antonio López y López, un empresario que había hecho fortuna en Estados Unidos, quiso iluminar con farolillos eléctricos la visita de Alfonso XII y su esposa María Cristina. Y cinco años más tarde, el primer alumbrado público permanente se instaló en Gerona. Ese mismo año, en la exposición universal de Chicago, Nikola Tesla demostró la superioridad de la corriente alterna a la hora de transporte de electricidad.

El avance no tardó en materializarse en España. La primera vez que se transportó electricidad a larga distancia fue en Zaragoza en 1893³. La línea recorría tres kilómetros desde el lugar de producción de energía hidráulica: el Molino de San Carlos, hasta el centro de la ciudad. Para esta obra de ingeniería se instaló el generador hidráulico más potente de la época en España. De este modo se demostró que era posible alejar la producción eléctrica de las poblaciones y alejar el humo derivado de la quema de combustibles, o construir presas hidroeléctricas en los lugares idóneos por orografía, no por situación. Así pues, en 1909 se construyó la primera gran línea eléctrica entre el salto del Molinar, en el río Júcar, y Madrid, a una distancia de 240 km en una tensión de 60.000 voltios.

Tras estos avances, España se fue electrificando y modernizando. La noche, efectivamente, fue barrida poco a poco, según el cableado llegaba a cada una de las poblaciones de la península. Se construyeron más presas; centrales de gas, carbón y petróleo; la energía nuclear llegaría en los años 80 y, desde entonces, han ido entrando en escena lo que actualmente genera la mayor parte de la electricidad de nuestro país: las energías renovables eólica y fotovoltaica. La electricidad generada se ha podido distribuir a cada rincón de España mediante una red de cables que también ha sido partícipe de la modernización. El paisaje se ha llenado de tendidos eléctricos, y en el fondo del mar descansan cables submarinos que nos conectan con las islas y con Marruecos. En el Gráfico 1 aparecen recopilados los principales componentes de las redes eléctricas.

También se han establecido sistemas de seguridad para absorber la volatilidad de las fuentes renovables y la proliferación de una generación eléctrica cada vez más descentralizada. Estas nuevas redes inteligentes se denominan “*Smart grids*” y permiten, gracias a la integración de tecnología digital, una comunicación constante y bidireccional entre los lugares productores de electricidad y los consumidores. De este modo, se pueden distribuir los flujos eléctricos de forma más eficiente y destinar los excesos a sistemas de almacenamiento con los que garantizar la producción en situaciones menos favorables.

Como indica la Comisión Europea, en 2050 se espera lograr una neutralidad climática. Sin embargo, se estima que un 40% de las redes eléctricas europeas tienen 40 años o más y no tienen la flexibilidad necesaria para responder al incremento de las demandas de la electrificación ni con la integración de las fuentes de energía eléctrica renovable. Por ello, es menester modernizar la red para lograr la completa descentralización de la producción eléctrica⁴. Esta modernización ha de superar ciertas limitaciones y retos tecnoeconómicos, como es el efecto del aumento de tensión, las pérdidas económicas derivadas de las restricciones para hacer frente a la congestión de la red y las cuantiosas inversiones necesarias para garantizar una transición energética verde eficiente⁵.

Una de las claves para esta transición es la estandarización de protocolos y de sistemas. Por ello, la Unión Europea emitió los mandatos de normalización de contadores inteligentes M/441 en 2009 y el mandato M/490 para *smart grids* en 2011. Desde entonces, distintos grupos de expertos han seguido contribuyendo al desarrollo de nuevas normas y actualizando las existentes. Entre los éxitos de esta iniciativa está SAREF (*Smart Appliances Reference*)⁶, se encuentra un lenguaje común creado en 2015 para la normalización del internet de las cosas (IoT). Este sistema, que comenzó a aplicarse en 2017, ha favorecido que un gran número de aparatos eléctricos conectados a la red puedan comunicarse entre sí, creando los ecosistemas inteligentes.

Posteriormente, SAREF ha seguido evolucionando para convertirse en el eje central de distintos sectores, incluido el energético, para allanar el camino para un IoT interoperable. Otro de sus éxitos es el primer Reglamento de Ejecución (UE) 2023/1162 sobre normas de interoperabilidad para el acceso a los datos de medición y consumo, creado en junio de 2023, que garantiza un lenguaje común para todos los operadores eléctricos. Además, en la actualidad se está trabajando en un acto de ejecución para mantener el equilibrio energético dependiendo de la producción y la demanda.

Aunque, sin duda, una de las tecnologías que más puede revolucionar el sector energético es la implementación de la inteligencia artificial (IA). Según la Comisión Europea, puede transformar la infraestructura energética del continente, aunque dicha transformación deba



realizarse teniendo en cuenta la protección de los datos, posibles errores y riesgos de ciberseguridad.

La IA puede tener un papel especialmente importante a la hora de la optimización de la red. Una IA bien entrenada puede ayudar a predecir los patrones de producción y consumo eléctrico y, sobre todo, a minimizar el impacto de variabilidad en la generación eléctrica por parte de las renovables. Sin embargo, esta implementación sólo será posible si, a su vez, se instalan suficientes sensores o medidores inteligentes que puedan obtener datos de la red en tiempo real. De este modo, se podrán detectar caídas o subidas de tensión producto de inclemencias del tiempo o de ciberataques.

El uso de la IA no queda únicamente en su implementación en las redes en sí. La IA ya se está empleando por parte de las energéticas E.ON o la italiana Enel para la vigilancia del estado físico de su red. Empleando datos de sistemas satelitales de observación, la empresa con sede en Fráncfort monitoriza el clima, incendios y corrimientos de tierra que puedan poner en peligro el tendido eléctrico. Así, es capaz de redirigir el flujo a otros lugares y garantizar el suministro en todo momento. Del mismo modo, espera utilizar este poder computacional para actuar ante otras posibles amenazas y tener, en todo momento, la certeza de que la red eléctrica permanece estable.

Aunque todas estas soluciones de IA vienen con un coste asociado que hay que valorar. Se espera que la proliferación de centros de datos que hacen posible el establecimiento de modelos de IA pueda tener un fuerte impacto en el consumo eléctrico. La UE tiene previsto triplicar su capacidad de procesamiento de datos en los próximos 5-7 años, por lo que la Agencia Internacional de Energía estima que las emisiones de carbono derivadas del consumo eléctrico de los centros de datos alcanzarán las 320 megatoneladas en 2030 ⁷. Sin embargo, un informe del Boston Consulting Group de 2023⁸ indica que la aplicación de la IA podría ayudar a evitar del 5 al 10% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero para ese mismo año. A estas mismas conclusiones llegó un estudio del 2025 de la Escuela de Economía y Ciencia Política de Londres⁹.

Por ello, se está elaborando una hoja de ruta acerca de la digitalización y la IA en los centros de datos para 2026. En

ella se incluirán medidas para facilitar la integración sostenible de los centros de datos en el sistema energético y se abordarán otras cuestiones relacionadas con el despliegue a gran escala de centros de datos en la UE, como la optimización de la red eléctrica, la eficiencia energética y la flexibilidad de la demanda.

Entre todas las medidas, también se valorarán nuevas propuestas de almacenaje químico de la electricidad para que actúen como amortiguador en el caso de que las renovables no puedan garantizar el suministro. Entre estas propuestas destaca el metanol verde, cuya producción ayuda en la descarbonización y su versatilidad permite que pueda ser utilizado en motores de combustión interna, para alimentar pilas de combustible, o como materia prima para la industria.

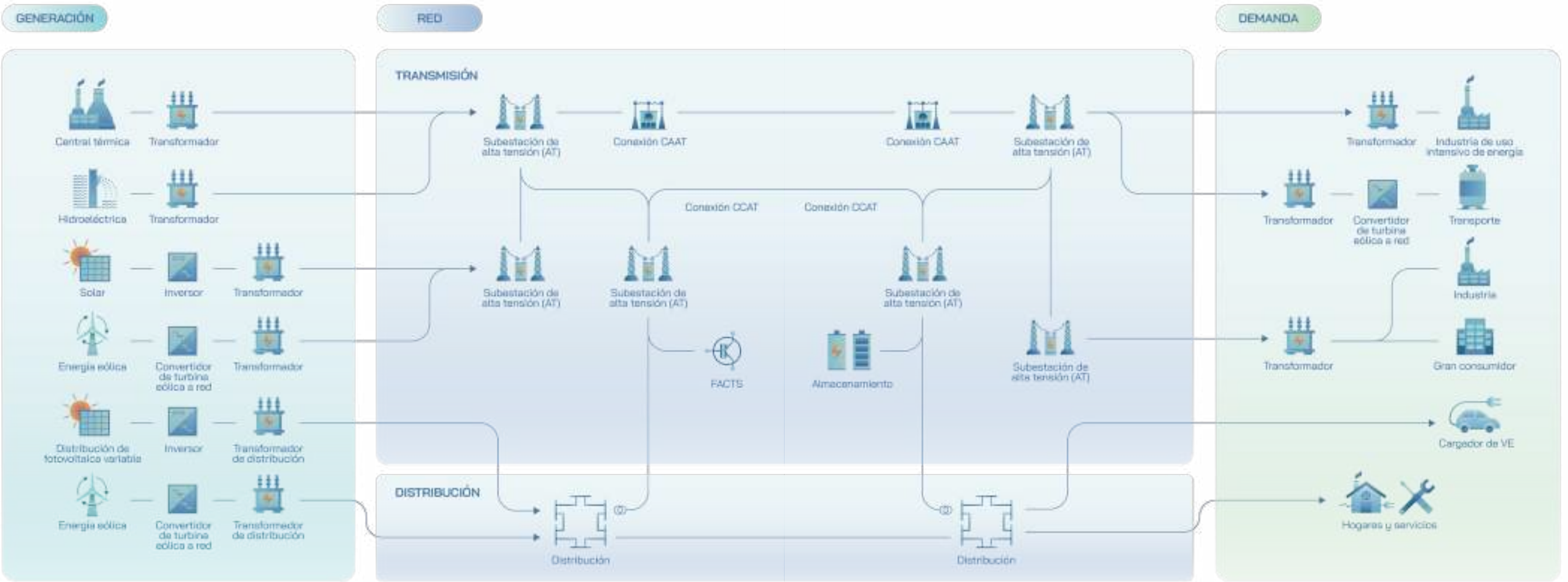
El metanol verde fue abordado en profundidad en el capítulo 9 del informe INTEC2024, donde se explicó en detalle desde su producción hasta sus posibilidades¹⁰. Centrándonos concretamente en su rol en el futuro de la red eléctrica, el metanol verde puede ser un factor decisivo en la descarbonización completa planteada por la UE para el año 2050.

Entrando en detalle acerca de su estructura, el metanol o alcohol metílico (CH₃OH) es el alcohol con la estructura molecular más sencilla. Es líquido a temperatura ambiente y muy inflamable, por lo que también se le conoce como “alcohol de quemar”. En industria, el metanol se emplea como disolvente, anticongelante o como precursor de otros productos químicos básicos.

Pero a este compuesto químico se le apoda “verde” cuando, para producirlo, únicamente se utilizan métodos renovables y que no generan emisiones de gases contaminantes. Normalmente se clasifica en dos tipos: biometanol si se genera a partir de fuentes sostenibles de biomasa, como productos ganaderos o desechos forestales; o e-metanol si se produce a partir de hidrógeno verde (que a su vez es producido por métodos renovables) y dióxido de carbono capturado. El resultado final de ambos métodos es el mismo: metanol. La única variación es su método de obtención.

Para la industria eléctrica interesa especialmente el e-metanol, ya que para su producción se necesita hidrógeno gas y CO₂. Para obtener el hidrógeno gas se puede emplear el exceso de producción de electricidad en la separación del agua (H₂O) en oxígeno e hidrógeno¹¹. Una vez obtenido el hidrógeno, se puede mezclar con CO₂ capturado de otras industrias como las plantas cementeras, acereras o estaciones eléctricas de quema de combustibles fósiles para crear el metanol. De este modo, el gas que iba a ser liberado a la atmósfera obtiene un nuevo uso. Aunque es cierto que, si este metanol se utiliza como combustible, el CO₂ acaba en la atmósfera igual, pero con varias ventajas importantes. Primero, se le da un nuevo uso al carbono que de otro modo se habría expulsado, obteniendo el doble de rendimiento. Además, puede usarse en sustitución de los combustibles fósiles con mínimas modificaciones y, por último, no produce otros gases contaminantes como los óxidos de nitrógeno o de azufre. Por ello, es una opción interesante y, además, escalable, como muestra el desarrollo de la tecnología.

Componentes tecnológicos clave de las redes eléctricas



Notas:
FACTS = sistema flexible de transmisión de corriente alterna
CAAT = corriente alterna de alta tensión
CCAT = corriente continua de alta tensión

La primera planta en generar metanol verde de este modo abrió en Islandia en el año 2012, y generaba unas 4.000 toneladas de metanol. Esta cantidad es minúscula comparada con una planta de producción de metanol a partir de combustibles fósiles, que puede llegar a producir millones de toneladas al año. Pero poco a poco se van haciendo avances y las nuevas plantas ya pueden crear del orden de cientos de miles de toneladas. Un claro ejemplo es la mayor planta de metanol verde de Europa, capaz de producir 300.000 toneladas de este combustible. El proyecto, que van a desarrollar Cepsa y C2X en Huelva, está proyectado para que comience a operar en 2028. Existen otros proyectos en marcha en otras comunidades, tanto para la generación de e-metanol, como de biometanol.

En diciembre de 2015, la red eléctrica ucraniana sufrió un ciberataque que provocó que 100 000 personas se quedaran sin luz durante 10 horas. Tras el análisis del ataque se pudo demostrar que unos hackers habían logrado tomar control de la interfaz hombre-máquina en tres plantas de producción eléctrica al explotar una entrada en un software vulnerable. Una vez dentro, los hackers fueron tomando el control de los distintos sistemas informáticos de las centrales y bloqueando su uso a cualquier otro usuario. Para restablecer los sistemas, los informáticos tuvieron que desconectar los distintos sistemas informáticos e iniciarlos de forma manual. Una vez lo lograron, la energía volvió rápidamente.¹²

Con sistemas más informatizados, y con una mayor descentralización de la red, este tipo de ataques suponen un mayor riesgo, ya que “reiniciar los sistemas manualmente” puede ser mucho más complejo. Por ello, diversas universidades en compañía de empresas de distribución energética están desarrollando nuevos estándares y tecnologías con los que evitar las vulnerabilidades. Todas ellas se basan en 5 principios: Identificar vulnerabilidades, proteger los sistemas esenciales, detectar los ataques, responder a los mismos y recuperar la energía con la mayor celeridad.¹³

Aunque sin duda, algo esencial para que las medidas sean exitosas es que haya una colaboración estrecha y transparente entre gobiernos, empresas de servicios públicos y especialistas en ciberseguridad. De este modo se podrán implementar medidas preventivas que



Indicadores clave de rendimiento para la transición energética de la UE27

	Histórico	Escenario Energético Planificado			Escenario Energético de Descarbonización		
	2021	2030	2040	2050	2030	2040	2050
KPI.01 ENERGÍAS RENOVABLES (ELECTRICIDAD)							
Generación de electricidad con energía renovable (TWh/año)	957	2.254	2.920	3.538	2.271	3.312	4.253
Cuota de energía renovable en la generación de electricidad (%)	36%	71%	75%	78%	70%	82%	88%
Capacidad instalada de energía renovable (GW)	491	1.246	1.717	1.993	1.247	1.919	2.456
Cuota de energía renovable en la capacidad instalada (%)	52%	79%	86%	87%	79%	88%	91%
KPI.02 ENERGÍAS RENOVABLES							
Cuota de energía renovable en el consumo final bruto de energía (%)	20%	39%	56%	70%	43%	68%	85%
Cuota de energía renovable en el consumo final de energía (%) - solo directa	10%	15%	17%	17%	16%	17%	17%
Uso moderno de bioenergía (EJ)	6.0	8.1	8.7	8.5	8.0	8.5	7.6
KPI.03 INTENSIDAD ENERGÉTICA							
Tasa de mejora de la intensidad energética (%)	18%	2,5%	2,3%	2,0%	3,2%	2,8%	2,4%
KPI.04 ELECTRIFICACIÓN EN SECTORES DE USO FINAL (DIRECTA)							
Tasa de electrificación en el Consumo Final Total de Energía (TFEC) (%)	22%	30%	46%	58%	33%	52%	64%
KPI.05 HIDRÓGENO LIMPIO Y DERIVADOS							
Producción de hidrógeno limpio (Mt)	< 1	17	76	142	19	96	192
KPI.06 CAC, BECCS Y OTROS							
CO2 capturado de CAC, BECCS y otras medidas de eliminación (Mt)	< 10	49	96	121	45	96	116

Notas:
BECCS = bioenergía con captura y almacenamiento de carbono; CCS = captura y almacenamiento de carbono; CO2 = dióxido de carbono; EJ = exajulio; GW = gigavatio; KPI = indicador clave de rendimiento; Mt = millones de toneladas; TFEC = consumo final total de energía; TWh = teravatio hora.

Fuente: Irena

mitiguen estos riesgos y mantengan la fiabilidad y la seguridad de los sistemas eléctricos.

Pero la ciberseguridad no es el único riesgo. El 28 de abril de 2025 se produjo un gran apagón en la península ibérica que dejó sin luz a gran parte de España y Portugal. En este caso concreto, el cero eléctrico no tuvo que ver con un ciberataque, si no que fue un fenómeno de sobretensiones en cascada que no se pudieron amortiguar. Según el informe presentado por el gobierno, las primeras sobretensiones provocaron la desconexión de las centrales generadoras y, a su vez, se produjo una caída en la frecuencia que agravó el problema, desconectando al resto de generadores por subfrecuencia. Todo el proceso se produjo en apenas 5 segundos. Como indica el Comité para el análisis de las circunstancias que concurrieron en la crisis de electricidad del 28 de abril de 2025¹⁴, aunque esta situación no fue debida a una falta de firmeza o de capacidad, el cero eléctrico mostró la importancia de las herramientas ligadas a la seguridad del suministro. Por ello, se propuso minimizar las trabas burocráticas para su implementación.

Además, Red Eléctrica realizó su propio informe en el que indicó 15 recomendaciones para que se vuelva a dar el improbable cúmulo de circunstancias que apagaron la península. Entre ellas destacan controles dinámicos de la tensión, mecanismos que reduzcan las oscilaciones en el flujo eléctrico y un mayor control y observación¹⁵.

En 2025 se cumplen 150 años de la generación de energía eléctrica. Este invento, que comenzó como unos años antes como una curiosidad con la que asombrar al público, se ha convertido en un pilar fundamental de la sociedad moderna. Aunque nuestra dependencia ante la electricidad también es una vulnerabilidad que conviene atajar antes de que se convierta en un problema. Por ello, mantener la red actualizada y acorde a los tiempos venideros es uno de los principales retos del siglo XXI.

Para lograr los objetivos de descarbonización propuestos en las últimas décadas, tal y como recoge el Gráfico 2, la inteligencia artificial puede ser de gran ayuda a la hora de optimizar las redes eléctricas. Sin embargo, su implementación ha de ser realizada con sumo cuidado y teniendo en cuenta que las bases de datos necesarias para su funcionamiento también pueden consumir recursos muy valiosos. Por otro lado, para lograr una red resiliente y segura, la implementación de energías de amortiguación, como el almacenamiento químico de la electricidad en forma de metanol verde, y la actualización de los protocolos de seguridad, van a ser agentes clave para el futuro de la red eléctrica. Esta red, que se espera descentralizada y de producción variable, va a ser sin duda una muestra de un cambio hacia un mundo más sostenible.

Como puente entre el contexto histórico y la situación actual, conviene enmarcar la modernización de la red en un proceso más amplio de digitalización, descarbonización e integración de recursos distribuidos.

La nueva red eléctrica que necesita un planeta ‘net zero’

EN ACCIÓN

La transición hacia un mundo con cero emisiones netas debe estar respaldada por redes eléctricas más extensas, robustas e inteligentes, ya que el consumo mundial de electricidad debe crecer un 20% más rápido en la próxima década que en la anterior¹⁶. Un análisis de modelos llevado a cabo por el MIT identifica vías rentables para la descarbonización de los sistemas eléctricos y sostiene que se pueden reducir las emisiones entre un 97% y un 99% con respecto a los niveles de 2005 en Estados Unidos, sin comprometer la confiabilidad de la red¹⁷. Como consecuencia de ello, se proyecta que la demanda mundial de electricidad pase, de poco menos de 25.000 TWh en 2021, a casi 54.000 TWh en 2050. La Unión Europea (UE) calcula que el consumo de electricidad en el continente se incrementará en aproximadamente un 60% y la capacidad de transmisión transfronteriza se duplicará hasta 2030.

Según la Agencia Internacional de la Energía, eso implicará añadir o renovar más de 80 millones de kilómetros de redes hasta 2040, el equivalente a toda la infraestructura mundial existente, y duplicar el ritmo de inversión en redes eléctricas, que debería superar los 600.000 millones de dólares anuales, con énfasis en la digitalización y modernización de las redes de distribución. La UE ha elevado la estimación de gasto anual hasta 2030 a 65.000-100.000 millones de euros¹⁸, con diferencias sustanciales entre países: Alemania, por ejemplo, necesitará invertir más del triple que Francia en su red de distribución hasta 2050.

Para satisfacer el citado incremento de la demanda, dejando atrás el modelo heredado y cumpliendo con

los objetivos de la transición energética, se requerirá que la inversión sea aún mayor, de aproximadamente un billón de euros al año hasta 2050¹⁹, 2,5 billones de dólares sólo hasta 2035, según estimaciones de McKinsey²⁰. La innovación tecnológica ha obligado a revisar muchas planificaciones, en ese sentido. Por ejemplo, durante mucho tiempo se pensó que los mecanismos de gestión existentes solo podrían manejar la generación renovable hasta niveles de penetración del 20%²¹, pero el consenso hoy es que la energía eólica y la solar fotovoltaica deben protagonizar más del 80% del aumento total de la capacidad energética en las próximas dos décadas, en comparación con menos del 40% en las últimas dos. Un escenario de cero emisiones netas en 2050 exige que este porcentaje sea incluso superior, del 90%.

Para que se perciban los efectos de esa inversión, se necesitan nuevos corredores de transmisión que conecten los proyectos solares fotovoltaicos que deberán construirse en el desierto y las futuras turbinas eólicas marinas, en ambos casos situados lejos de los centros de demanda como ciudades y áreas industriales. Será preciso duplicar asimismo la flexibilidad del sistema hasta 2030 para que esto no afecte a la estabilidad del suministro. La factura del *aggiornamento* de las redes, si debe hacerse integrando más energía renovable, necesariamente va a ser más alta.

El ritmo de implementación de las nuevas inversiones y de penetración de las tecnologías verdes está siendo inferior, no obstante, al que plantean todas estas proyecciones. La realidad actual del mercado dista mucho de esos objetivos. Al menos 3.000 gigavatios (GW) de proyectos de energía renovable, de los cuales 1.500 GW se encuentran en etapas avanzadas, esperaban conexión a las redes a finales de 2023, convertidas en un cuello de botella para la transición hacia un mundo de cero emisiones netas. La inversión en generación sin emisiones ha crecido rápidamente, casi duplica de hecho a la capacidad instalada en 2010, pero el gasto mundial en redes apenas ha variado y se mantiene estable en torno a los 300.000 millones de dólares anuales. En momentos de crisis energética como los vividos a raíz de la invasión de Ucrania, esa lentitud ha acentuado la dependencia de muchos países del gas natural cuyas importaciones mundiales podrían incrementarse en 80.000 millones de metros cúbicos (bcm) anuales a partir de 2030 si persiste el retraso inversor; al igual que las del carbón, que podrían ser superiores a las actuales en casi 50 millones de toneladas.

Lo llamativo es que las tecnologías dirigidas a mejorar la red no siempre están incluidas en el proceso de planificación energética de las autoridades reguladoras nacionales, a pesar de que su integración en el sistema puede aumentar potencialmente la capacidad total de la red entre un 20% y un 40%. Sin mejoras, el riesgo de interrupciones del servicio se eleva -cuestan ya alrededor de 100.000 millones de dólares al año, el 0,1% del PIB mundial- y crecen los problemas de congestión de la red. En Alemania, los costes provocados por estos últimos alcanzaron los 4.000 millones de euros anuales en 2022 y en Estados Unidos pasaron de 6.000 millones de dólares a casi 21.000 en tres años.



Aunque a menor ritmo del deseable, durante las últimas cinco décadas, la red eléctrica mundial ha experimentado un crecimiento continuo, que se puede cifrar en aproximadamente un millón de kilómetros al año. La mayor parte de esta expansión se ha producido en las redes de distribución (conectan con los usuarios finales: hogares, industrias, instalaciones, etc.) y representan aproximadamente el 93% de la longitud total del sistema eléctrico, frente al 7% de las líneas de transmisión (conectan los puntos de generación de energía con las redes de distribución próximas a los usuarios). La digitalización ha cobrado cada vez más importancia, hasta representar aproximadamente un 20% de la inversión en 2022. La AIE considera que el gasto en redes inteligentes debería duplicarse con creces hasta 2030 para alinearse con el Escenario de Cero Emisiones Netas en 2050²², especialmente en las economías emergentes y en desarrollo (EMDE).

Con una longitud de más de un millón de kilómetros, la infraestructura eléctrica de la UE es la más extensa e integrada del mundo, pero el 40% de sus redes de distribución tienen más de 40 años de antigüedad. El Plan de Acción de la UE 'Digitalización del Sistema Energético'²³ prevé que, de los alrededor de 584.000 millones de euros de inversiones en la red eléctrica europea hasta 2030, 170.000 millones se destinen a la digitalización. En esa partida, se incluyen medidores inteligentes, gestión automatizada de la red, tecnologías digitales para la medición y mejora de las operaciones sobre el terreno.

Los retrasos que sufren más de una cuarta parte de los proyectos eléctricos de interés común (PCI) de Europa, para la ampliación y mejora de la red, no son sólo, ni siquiera principalmente, achacables a los operadores. Las nuevas infraestructuras suelen tardar entre cinco y 15 años en ejecutarse debido a los problemas en la obtención de permisos, que suelen involucrar a múltiples autoridades y jurisdicciones a lo largo de toda la ruta. Es cinco veces más tiempo que los nuevos proyectos de energías renovables y hasta siete veces más que las nuevas infraestructuras de carga de vehículos eléctricos.

Se estima que la construcción de la línea de corriente continua Ultranet de 340 km de longitud en Alemania requiere alrededor de 13.500 permisos. La Red Europea de Gestores de Redes de Transporte de Electricidad (ENTSOe) elabora cada dos años un plan decenal de desarrollo de la red no vinculante, un plazo considerado por la Agencia Europea para la Cooperación de los Reguladores de la Energía (ACER) excesivo, ya que conduce a análisis basados en datos obsoletos. En esas circunstancias, se complica la tarea de deshacer el nudo gordiano de la burocracia.

La fragmentación de actores es otro de los condicionantes fundamentales para la modernización de la red eléctrica europea. Algo más de dos tercios de las nuevas inversiones deben realizarse en la red de distribución, donde los operadores deben proporcionar los equipos, incluidos los medidores inteligentes y los sistemas de almacenamiento local. En la UE existen 30 operadores de sistemas de transmisión (OST), porque Alemania tiene cuatro y Austria dos, pero

miles de operadores de sistemas de distribución (OSD). Las redes que gestionan estos últimos representan la mayor parte de la infraestructura, lo que se refleja en el valor de los activos y dificulta más las dinámicas de integración. Por ejemplo, la red operada por el mayor OSD francés, ENEDIS, tiene un valor de 54.000 millones de euros, mientras que la base de activos del principal OST del país, RTE, es de 17.000 millones de euros²⁴.

La Comisión Europea está impulsando, sin demasiado éxito por el momento, iniciativas para favorecer la colaboración. Promueve la creación de un gemelo digital de la red eléctrica europea²⁵ a través del proyecto TwinEU (Digital Twin for Europe) que impulsa la federación de gemelos locales del sistema eléctrico. Asimismo, la política de Redes Transeuropeas de Energía (RTE-E)²⁶ anima a la cooperación regional a través de 11 corredores geográficos prioritarios, entre los que se encuentran los de electricidad, y en tres áreas temáticas prioritarias, incluidas las redes eléctricas inteligentes. La interconectividad es clave para garantizar la seguridad y la fiabilidad energéticas: la integración de los mercados eléctricos europeos podría reportar un beneficio estimado de hasta 34.000 millones de euros anuales²⁷ a los ciudadanos.

La reacción europea se enmarca en un cambio de velocidad global vinculado no sólo al desafío climático, sino también a la competitividad de las economías. China ha modernizado y ampliado sus redes eléctricas con inversiones por valor de 442.000 millones de dólares durante el período 2021-2025. China Southern Power Grid tenía previsto aportar 99.000 millones, a los que hay que sumar las contribuciones de algunas empresas regionales.

El Programa de Asociación Innovadora para la Resiliencia de la Red (GRIP)²⁸ de Estados Unidos contemplaba líneas de ayuda por valor de 10.500 millones de dólares para apoyar la modernización y expansión de las redes eléctricas, repartidos en 2.500 millones para la resiliencia de la red, 3.000 millones para redes inteligentes y 5.000 millones para innovación en la red. El Banco Mundial²⁹, junto con el Organismo Multilateral de Garantía de Inversiones (MIGA), la Corporación Financiera Internacional (CFI) y otras agencias de desarrollo, anunció una iniciativa para promover la inversión privada en sistemas de energía renovable distribuida (EDR) para electrificar áreas específicas en África de manera rápida y eficiente.

Las tecnologías digitales se han convertido en fundamentales en cualquier estrategia de modernización. Abren la puerta a una gestión más eficiente y hacen más predecible la dirección de los flujos energéticos en un mundo en el que convivirán un número creciente de recursos distribuidos, desde vehículos eléctricos a plantas de energía renovable y bombas de calor eléctricas. La transformación digital permite establecer una estrategia basada en datos y eso facilita el equilibrio entre la oferta y la demanda, el intercambio de información entre los OST y los OSD, la optimización de la distribución energética y la predicción de tendencias de consumo³⁰. El ritmo lento en la digitalización de las redes de distribución está limitando ya, de hecho, la disponibilidad de datos en tiempo real, y eso ralentiza todo el proceso de modernización, ya que esos datos en tiempo real son los que consiguen precisamente que el gasto en la mejora de la infraestructura de red existente se reduzca³¹.

El internet de las cosas es una de las grandes palancas de transformación digital de las redes energéticas, a través de dispositivos como los medidores inteligentes residenciales. Las innovaciones en circuitos integrados, en procesamiento de información en el borde (*edge*) y en IA, como las que incorporan los medidores inteligentes de segunda generación, pueden ayudar a reducir la tensión en las redes de comunicación, mejorar las respuestas en tiempo real a las fluctuaciones de la red y mejorar la seguridad y la privacidad de los datos.

Su implantación ha avanzado en los últimos años, y llega incluso al 100% en algunas economías, como China, pero sigue siendo todavía muy baja en muchos países. A finales de 2023, se habían instalado 1.060 millones de medidores inteligentes de electricidad, agua y gas en todo el mundo³², con una penetración media global del 43%. Los países de América del Norte cuentan con el mercado de medidores inteligentes de electricidad más maduro, con una penetración de casi el 77%, y algunas naciones de Asia Oriental también presentan altas tasas. En la UE, quince países, uno de ellos España, tienen una tasa de implantación de contadores inteligentes superior al 80%³³, pero Alemania, con algo más de 50 millones de puntos, muestra uno de los ratios de adopción más bajos, con menos del 10%. Su Gobierno ha tomado medidas para acelerar las implementaciones y espera alcanzar un despliegue completo en 2032.

Se espera que la base instalada de estos dispositivos supere las 1.750 millones unidades en 2030 con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 6%. Sólo en el caso de Europa, la inversión en sistemas de medición inteligente podría alcanzar los 47.000 millones de euros hasta 2030. En el caso de que se instalen 266 millones de dispositivos, la tasa de penetración se elevaría al 92%. La Comisión estima que ofrecen un ahorro de 270.000 euros en electricidad por punto de medición, distribuido entre consumidores, proveedores y operadores.

Para maximizar el potencial de medición que ofrecen los contadores inteligentes, la Comisión Europea³⁴ decidió mejorar el acceso a ellos mediante la introducción de requisitos de interoperabilidad y acceso no discriminatorio.

La electrificación imparables de la economía, tanto en lo referido a la generación donde se produce una expansión de energías renovables intermitentes (eólica, solar fotovoltaica...) como en la electrificación creciente en los usos finales (EV, bombas de calor, centros de datos...) unido al delicado equilibrio entre generación y consumo que tiene el sistema, nos lleva a que la gestión de las redes de distribución sea cada vez más compleja y exigente. El apagón del 28 de abril de 2025 en la Península Ibérica fue un serio aviso en ese sentido. (...)

Fernando Temprano

Estas medidas, unidas a la Ley de Datos, que entró en vigor en septiembre de 2025, empoderan a los consumidores para participar activamente en la transición energética y permiten a los proveedores energéticos desarrollar nuevos servicios.

Como infraestructura de apoyo, el Espacio Común Europeo de Datos Energéticos aparece incluido en el Programa Europa Digital³⁵. Europa promueve, además, un código de conducta³⁶ para electrodomésticos energéticamente inteligentes, a fin de permitir la interoperabilidad e impulsar su participación en esquemas de respuesta a la demanda. Se presentó en la mayor feria industrial del continente, la Hannover Messe, con el compromiso de diez fabricantes y una compañía de sistemas de gestión energética.

La inteligencia artificial (IA) desempeñará un papel cada vez más fundamental en la integración de las energías renovables, la estabilización de las redes energéticas y la reducción de los riesgos financieros asociados a la inestabilidad de la infraestructura³⁷. Su proliferación ha permitido introducir modelos de previsión que van más allá de los patrones de uso tradicionales³⁸. La llegada de la red inteligente (SG) marca un cambio de paradigma en el suministro eléctrico³⁹. Integra tecnologías modernas de telecomunicaciones y sensores y permite optimizar las estrategias de suministro eléctrico. A diferencia de la red unidireccional tradicional, introduce un marco bidireccional que facilita el flujo bidireccional de información y electricidad. El Departamento de Energía (DOE) sostiene que, si las redes eléctricas modernas fueran un 5% más eficientes de lo que son actualmente, el ahorro de energía sería igual al efecto de eliminar las emisiones de 53 millones de automóviles.

La gestión se volverá *seamless* gracias a la IA. El proyecto SGs for Small Grids de Green Empowerment⁴⁰ busca acercar la tecnología inteligente de código abierto a ingenieros y técnicos en comunidades remotas. Trabaja con socios regionales para construir microrredes de energía renovable con comunidades indígenas en el sur de Asia. En el otro extremo del planeta, y en virtud de un contrato de flexibilidad con el operador de red holandés Liander, la empresa alimentaria PepsiCo comprará energía para su fábrica de patatas fritas en Broek op Langedijk solo cuando haya suficiente capacidad de suministro y transporte disponible en la red⁴¹.

La reconfiguración de estos mecanismos permitirá superar problemas operativos añadidos a los mencionados anteriormente. Por ejemplo, los altos costes de transformación de las redes son uno de los principales frenos al despliegue de sistemas de almacenamiento de energía, concebidos para guardar el exceso de producción de las fuentes de generación renovable durante las horas valle y liberarlo durante las horas punta. Compañías como la finlandesa Wärtsilä han diseñado sistemas de baterías de formación en red (*grid forming*) que permiten concebir un almacenamiento de energía distribuido y propician la generación flexible de electricidad. Wärtsilä ha creado en la isla portuguesa de Graciosa una solución híbrida en *grid forming* que integra generación eólica, solar, almacenamiento y térmica y anunciaba a mediados de 2025 un proyecto similar en Shetland Islands (Escocia)⁴². Su modelo permite integrar áreas geográficas distintas en un sistema energético más amplio, de forma que puedan desconectarse fácilmente de él para garantizar el equilibrio y la resiliencia de la red. Según esa visión, esas áreas geográficas *conectables* y *desconectables* pueden ser islas, calles, barrios o ciudades autosuficientes.

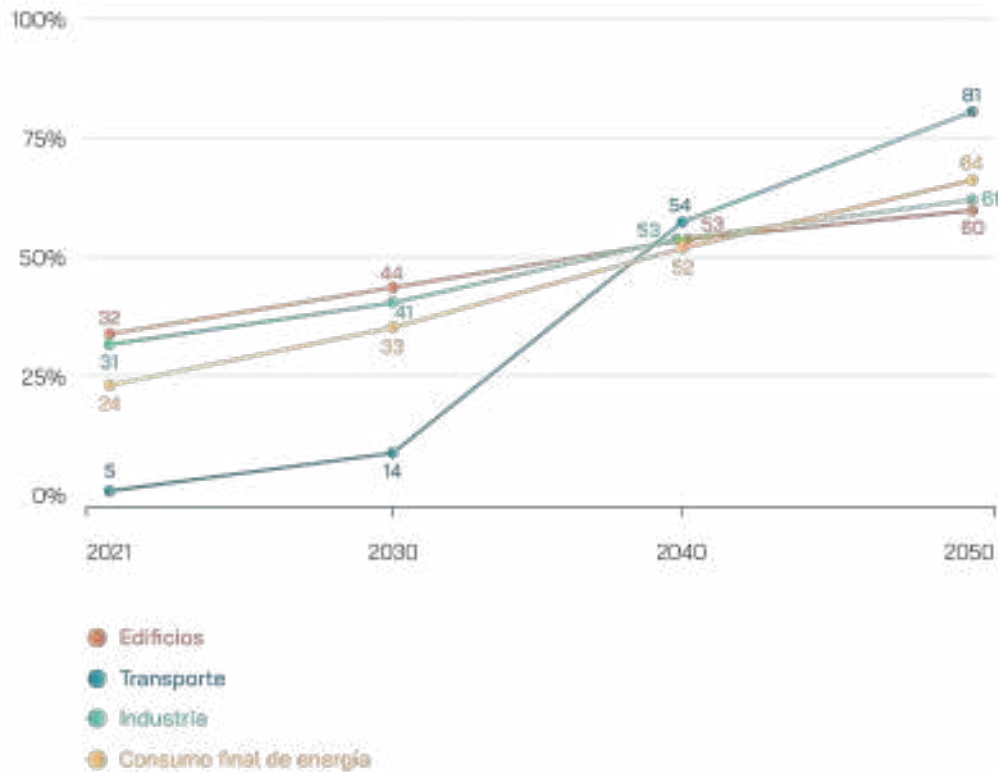
Históricamente, la precariedad tecnológica ha convertido a las líneas de baja tensión, ubicadas en la red de distribución de última milla, en el punto ciego de las redes eléctricas⁴³. No tenía sentido equipar con sensores a líneas que atendían a pocos clientes y con un bajo volumen de energía en tránsito. Sin embargo, con la generación fotovoltaica distribuida y los nuevos paradigmas de demanda, que incluyen la carga de vehículos eléctricos, las bombas de calor y la electrificación general, el 90% de los operadores de red europeos planean modernizar las redes de baja tensión⁴⁴. Eso acentuará la convergencia de intereses entre las áreas de transmisión y de distribución.

Uno de los campos tecnológicos de interés es, en ese sentido, el de los módulos de autorreparación con IA de la sala de control de los operadores, que pueden analizar el estado de la red y encontrar nuevas rutas para transportar y redistribuir la electricidad. En caso de corte de suministro eléctrico, ahora es posible reconectar la automatización de aproximadamente el 99% de los clientes afectados en menos de dos minutos. Si el problema es la congestión de la red, los algoritmos de calificación dinámica de línea (DLR) indican si es posible explotar una línea por encima de su capacidad nominal, incluso por encima del 110%.

En lo que se refiere a las líneas de transmisión eléctrica, las principales áreas de innovación tecnológica abordan la digitalización de equipos, como los transformadores de potencia, la automatización de subestaciones y el desarrollo de sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS), así como los sensores avanzados como unidades de medición para agilizar las operaciones. La digitalización de las subestaciones es fundamental en la transformación continua de los sistemas energéticos. En este contexto, la norma IEC 61850 se ha consolidado como la referencia global para el intercambio de datos de nueva generación⁴⁵.

Tasa de electrificación de la UE27 por sectores y en total en el escenario de descarbonización energética (DES)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed diam nonummy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat. Ut wisi



Fuente: Irena

Junto a ello, las interconexiones a gran escala siguen siendo uno de los principales focos de inversión y de innovación, con proyectos en marcha en Europa, China, Norteamérica, India y Australia. Su principal valor reside en que ayudan a equilibrar la oferta y la demanda entre regiones, porque dan acceso a recursos energéticos remotos. En la UE, el plan REPowerEU⁴⁶ incluye el desarrollo de interconectores y el enorme complejo eólico-solar de 455 GW que estará operativo en 2030 en China, contempla la construcción de infraestructura de corriente continua de alta tensión (HVDC) y CC de ultraalta tensión (UHVDC).

Los sistemas de transmisión eléctrica se consideran infraestructuras nacionales críticas. Para el Departamento de Energía de Estados Unidos, el suministro confiable de electricidad es una cuestión clave para la economía, la seguridad nacional e incluso la salud⁴⁷ y la Ley de la Industria Net-Zero (NZIA) de la EU designa a las tecnologías de red como estratégicas. Por ese motivo, cada vez más, los ciberataques se perciben como una amenaza para su integridad. El Registro Nacional de Riesgos del Reino Unido de 2023 sitúa la probabilidad de un ciberataque a infraestructuras críticas entre el 5% y el 25%, con un impacto potencial de cientos de millones de libras en pérdidas.

En los últimos años, el número de incidentes cibernéticos ha aumentado junto con el avance de la digitalización. Se han registrado numerosos casos de ciberataques a infraestructuras clave que han causado perturbaciones sociales significativas en todo el mundo. El primer código de red de la UE sobre ciberseguridad para el sector eléctrico⁴⁸, se publicó en mayo de 2024 y establece normas sectoriales específicas para la ciberseguridad de los flujos transfronterizos de electricidad, incluidos los requisitos mínimos comunes, la planificación, la supervisión, la presentación de informes y la gestión de crisis.

La infraestructura eléctrica es muy especial, necesita un control muy preciso y muy rápido. Por eso, los sistemas de transporte se gestionan a 50 o 60 Hz, de modo que se pueda balancear instantáneamente la carga en regiones muy amplias, ajustando la demanda a la producción⁴⁹. El proceso actual de interconexión de la red eléctrica implica la incorporación de muchísimos dispositivos energéticos nuevos en varios puntos de la red, tanto de transmisión como de distribución. Todos ellos pueden convertirse en accesos potenciales de los hackers al sistema eléctrico, porque todo ese proceso se controla a través de software y comunicación.

Las subestaciones eléctricas son sistemas muy sofisticados, en los que una parte del control y la información se ha migrado a la nube, pero algunos procesos se mantienen completamente cerrados e incluso aislados, sin conexión a internet. Una parte de la innovación actual busca evitar que el ataque se produzca en el momento de la actualización del software de esos espacios cerrados por parte del proveedor tecnológico. Investigadores de Georgia Tech han puesto la barrera de defensa, por ejemplo, en el lado del hardware y han diseñado unas cadenas de compuertas lógicas (físicas) en

(...)
Por minimizar los riesgos es necesario desarrollar e incorporar un mix de tecnologías dirigido al desarrollo de redes eléctricas más inteligentes, digitalizadas, capaces de gestionar flujos bidireccionales y con criterios de programación y métricas que permitan anticipar de forma precisa y rápida los riesgos de la red. Todo ello será indispensable para contar con un sistema eléctrico robusto y equilibrado.

|
Fernando Temprano

el propio silicio, que se insertan cuando se fabrica el chip computacional que se introducirá en la subestación eléctrica. De ese modo, han conseguido que cada chip genere una secuencia de bits de 128 bits única, imposible de hackear vía software⁵⁰.

Como otros órdenes de la economía, la dependencia de terceros países en la cadena de suministro provoca que, en tiempos de turbulencias, los promotores de proyectos de redes en Europa se hayan tenido que enfrentar a plazos largos para adquirir componentes específicos o al aumento de los precios de las materias primas. La escasez mundial de cobre prevista para esta década podría provocar un aumento repentino de los precios en plena llamada a duplicar el número de transformadores.

Es otro de los condicionantes que pueden convertir la transformación digital de las redes eléctricas en un factor inflacionista, que acabe impactando en la factura de los consumidores. A finales de 2024, los precios minoristas de la electricidad para la industria en la UE eran más del doble que en EEUU y el doble que en China. En el ámbito minorista más del 10% de los europeos se ven afectados por la pobreza energética.

En este contexto, es necesario un diseño cuidadoso de las tarifas de red para fomentar el uso de redes inteligentes e incentivar a los consumidores a optimizar el uso de la capacidad de la red existente mediante indicadores de tiempo y ubicación. Los costes de la red pueden ser una parte sustancial de las facturas finales de los consumidores: en 2023, los costes de la red representaron el 25% de los costes de electricidad medio para los hogares de la UE, según Eurostat.

ACER sugiere un proceso de planificación basado en la identificación de las necesidades del sistema y en escenarios que contemplen de forma armonizada la transformación digital de la red eléctrica con otras grandes iniciativas estratégicas como la expansión de la red de hidrógeno, de la capacidad de almacenamiento, de la infraestructura de recarga para vehículos eléctricos y de la captura de CO2. Un mayor comercio transfronterizo de electricidad podría favorecer también la convergencia de los precios de la electricidad en los países de la UE, lo que conduciría a una reducción de los precios medios y de la volatilidad⁵¹.

Asegurar la financiación de las inversiones será clave para el éxito del proceso de modernización de las redes. El principal fondo de la UE para infraestructura energética es el Mecanismo Conectar Europa-Energía (CEF-E). Se están explorando también fórmulas de financiación mediante emisiones de capital, como las que ya se han utilizado en el caso de las infraestructuras de transporte. En ese sentido, la fragmentación del mercado de capitales europeo sigue siendo un factor limitante y podría impulsar a los principales operadores de redes a captar capital en Estados Unidos y China.

En última instancia, será esencial desarrollar una reserva de talento, garantizar la integración de las competencias digitales en los programas de estudio del sector eléctrico y gestionar el impacto de la transición energética y el aumento de la automatización en los trabajadores mediante la capacitación y la formación práctica. Los actores de la industria energética europea y la Comisión han puesto en marcha una Alianza a Gran Escala (LSP)⁵² para impulsar el desarrollo del talento en el sector, después de la advertencia de una posible escasez de profesionales cualificados recogida en el Informe de Progreso de Competitividad de 2023 sobre tecnologías de energía limpia⁵³.

Un ecosistema de startups ‘eléctrico’ para reinventar las redes

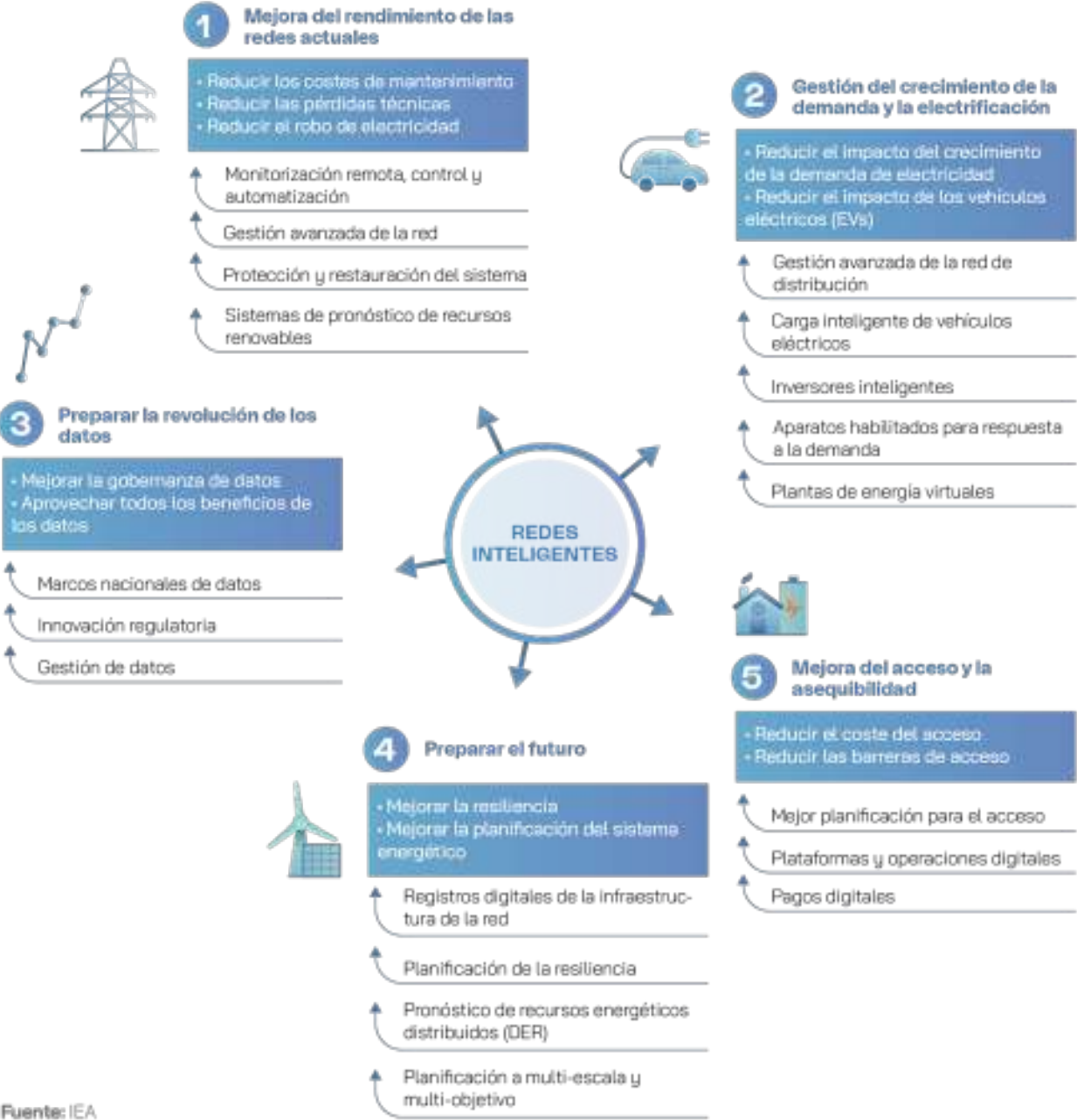
ESPAÑA

El dinamismo del emprendimiento de base tecnológica es una de las notas características de España en el ámbito de las nuevas redes eléctricas. Algunos ejemplos de compañías emergentes permiten formarse una imagen del impulso que está recibiendo el sector. La startup Splight está especializada en la optimización de redes con inteligencia artificial (IA) para democratizar el acceso a la energía. Su tecnología Dynamic Congestion Management (DCM) ayuda a las compañías energéticas a aprovechar la infraestructura existente ante el doble reto de evitar la congestión y facilitar la conexión de energías renovables, de modo que actúen como soluciones para mejorar la flexibilidad de la red. La IA de Splight se plantea como una apuesta para maximizar la capacidad de la infraestructura actual, para que la calidad del servicio no dependa de la construcción de nuevas líneas de transmisión. La compañía emergente captó 12 millones de euros en una ronda en la que participaron Elewit y Draper B1, además de inversores internacionales como NOA, Fen Ventures, Ascent Energy Ventures y Fundación UC Berkeley, entre otras.

El ámbito académico también es una fuente de emprendimiento en el sector. ENFASYS es una *spin-off* de la Universidad de Oviedo que aprovecha la investigación realizada por el grupo LEMUR tanto en hardware como en el desarrollo de librerías de software y aplicaciones orientadas al control y monitorización de redes eléctricas. Uno de sus proyectos ha consistido en el desarrollo de un sistema completo para el prototipado rápido de sistemas de control en microrredes y redes de distribución eléctrica. La plataforma resultante permite la integración de energías renovables y sistemas de



Componentes tecnológicos clave de las redes eléctricas



Fuente: IEA

almacenamiento de energía mediante baterías en la red eléctrica. Una vez incorporadas, facilita la evaluación, mediante simulación, de conceptos de optimización energética y económica.

Otra *spin-off*, también de la Universidad de Oviedo, Plexigrid, paquetiza desde su creación en 2020 software que ayuda a las distribuidoras eléctricas a ahorrar tiempo, optimizar y mejorar la supervisión y operaciones en baja tensión, la planificación y análisis de la red, la gestión de flexibilidad y la gestión de recursos energéticos distribuidos, mediante una plataforma de datos agregada. Plexigrid ha captado 6,5 millones de euros de la mano de TheVentureCity, Polar Structure y Vargas Holding. Surgida de la UPC, por último, eRoots mejora la resiliencia de las redes eléctricas con un enfoque en la integración de energías renovables. Para ello, ha desarrollado software con herramientas computacionales y de análisis de la red, y ofrece servicios de consultoría e I+D.

Complementaria a la propuesta de valor de Plexigrid puede situarse la de Adaion, que ha desarrollado una plataforma para digitalizar la red eléctrica con el objetivo de facilitar a las distribuidoras la planificación, interoperabilidad y mantenimiento mediante el análisis de datos, la creación de *digital twins* y la aplicación de IA. Nacida en 2023, Adaion es el primer producto de Turning Tables, que opera desde 2016 y ha conseguido captar 2,3 millones de euros de la mano de IPW y Fondo Bolsa Social.

En el caso de Bamboo Energy, *spin-off* del IREC y constituida en 2020, su solución permite que los agregadores y minoristas independientes administren de manera eficiente los recursos de flexibilidad distribuidos. Para ello, ha creado una plataforma de gestión de la flexibilidad y análisis de datos dotada de una arquitectura modular e IA aplicada. Cuenta entre sus inversores a IDAE y EIT InnoEnergy. También de Barcelona procede la startup Bia, en cuyo capital han entrado Bridgestone, Wayra, Rockstart y EIT InnoEnergy. Utiliza IA para que las empresas puedan cargar sus vehículos eléctricos de la forma más eficiente y para que las distribuidoras y comercializadoras mejoren las redes en términos de sostenibilidad, análisis de datos y predicción.

Por último, otra empresa española de base tecnológica implicada en la mejora de las redes de energía es Ingelectus. Cuenta con la suite de aplicaciones InPWR, diseñadas para optimizar la operación y garantizar la estabilidad de plantas renovables. Por su parte, la startup Silbat aprovecha el alto calor latente del silicio para lograr no sólo densidad energética, sino también una reducción de costes, y permitir que las plantas de energía renovable funcionen las 24 horas del día de forma rentable.

Relación
de notas

¹ IMDEA Energía. (2017) El Primer Experimento con Luz Eléctrica en España - Energía Y Sostenibilidad, Energía y Sostenibilidad -. Disponible en: <https://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2017/07/24/133583> (Consultado el 31/07/2025).

² Redacción (2021) Comillas, Primera Localidad española con Luz Eléctrica en 1881, Info Cantabria. Disponible en: <https://infocantabria.es/comillas-celebra-esta-semana-ser-la-primer-localidad-espanola-en-disponer-de-luz-electrica-en-sus-calles/> (Consultado el 31/07/2025).

³ Ordóñez Gracia, M. (2023) Los albores de la Industria Eléctrica. El Agua Nos Trajo La Luz, Aragón Digital. Disponible en: <https://www.aragondigital.es/articulo/anteayer-fotografico-zaragoza-no/los-albores-de-la-industria-electrica-el-agua-nos-trajo-la-luz/20220922095127802169.html> (Consultado el 31/07/2025).

⁴ Ai and Generative AI: Transforming Europe’s Electricity Grid for a sustainable future (Sin fecha) Shaping Europe’s digital future. Disponible en: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ai-and-generative-ai-transforming-europes-electricity-grid-sustainable-future> (Consultado el 31/07/2025).

⁵ Monaco, R. et al. (2023) Digitalization of power distribution grids: Barrier analysis, ranking and Policy Recommendations [Preprint]. doi:10.2139/ssrn.4665103.

⁶ The Smart Applications Reference

Ontology (saref) (Sin fecha) SAREF Portal. Disponible en: <https://saref.etsi.org/> (Consultado el 31/07/2025).

⁷ (Sin fecha) Energy and AI – Analysis - IEA. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai> (Consultado el 31/07/2025).

⁸ Danouni, A. et al. (Sin fecha) Accelerating climate action with AI. Disponible en: <https://web-assets.bcg.com/72/cf/b609ac3d4ac-6829bae6fa88b8329/bcg-accelerating-climate-action-with-ai-nov-2023-rev.pdf> (Consultado el 31/07/2025).

⁹ New Study finds AI could reduce global emissions annually by 3.2 to 5.4 billion tonnes of carbon-dioxide-equivalent by 2035 (2025) Grantham Research Institute on climate change and the environment. Disponible en: <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/news/new-study-finds-ai-could-reduce-global-emissions-annually-by-3-2-to-5-4-billion-tonnes-of-carbon-dioxide-equivalent-by-2035/> (Consultado el 31/07/2025).

¹⁰ MalloI, E. (2024) El despertar del metanol verde. Disponible en: <https://frdelpino.es/ciencia-y-sociedad/9-el-despertar-del-metanol-verde/> (Consultado el 31/07/2025).

¹¹ Metanol Verde: El combustible para acelerar La Transición Energética del Transporte Marítimo (Sin fecha) Iberdrola. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/metanol-verde> (Consulta-

do el 31/07/2025).

¹² Graham, J., Turner, M. and Elmaghraby, A. (Sin fecha) Cybersecurity for the smart grid - IEEE smart grid, IEEE Smart Grid Bulletin Compendium. Disponible en: <https://smart-grid.ieee.org/bulletins/july-2016/cybersecurity-for-the-smart-grid> (Consultado el 31/07/2025).

¹³ Paul, B. et al. (2024) ‘Potential smart grid vulnerabilities to cyber attacks: Current threats and existing Mitigation Strategies’, Heliyon, 10(19). doi:10.1016/j.heliyon.2024.e37980.

¹⁴ (Sin fecha a) Versión no confidencial del informe del comité para el análisis de las circunstancias que concurrieron en la crisis de electricidad del 28 de abril de 2025. Disponible en: <https://www.lamoncloa.gob.es/consejodeminitros/resumenes/Documents/2025/Informe-no-confidencial-Comite-de-analisis-28A.pdf> (Consultado el 31/07/2025).

¹⁵ Redeia (Sin fecha) Red Eléctrica presenta SU informe del incidente del 28 de abril y propone recomendaciones, Red Eléctrica. Disponible en: <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2025/06/red-electrica-presenta-su-informe-del-incidente-del-28-de-abril-y-propone-recomendaciones> (Consultado el 31/07/2025)

¹⁶ “Electricity Grids and Secure Energy Transitions”, IEA, noviembre de 2023

¹⁷ “The Future of Energy Storage”,

MIT, 3 de junio de 2022

¹⁸ “How can DSOs rise to the investments challenge? Implementing Anticipatory Investments for an efficient distribution grid”, Eurelectric, 21 de marzo de 2024

¹⁹ “Regional Energy Transition Outlook European Union”, IRENA, 2025

²⁰ Nadim Chakroun et al. “Net zero by 2035: A pathway to rapidly decarbonize the US power system”, McKinsey, 14 de octubre de 2021

²¹ “Western wind and solar integration study”, GE Energy, The National Renewable Energy Laboratory, mayo de 2010

²² [iea.org/energy-system/electricity/smart-grids](https://www.iea.org/energy-system/electricity/smart-grids)

²³ energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/digitalisation-energy-system_en

²⁴ edf.fr/sites/groupe/files/2024-07/s-and-p-edf-ratings-direct-2024-07-02.pdf

²⁵ energy.ec.europa.eu/news/commission-welcomes-cooperation-between-entso-e-and-eu-dso-entity-digital-electricity-grid-twin-2022-12-20_en

²⁶ energy.ec.europa.eu/topics/infrastructure/trans-european-networks-energy_en

²⁷ Saša Butorac, European Parliamentary Research Service, “EU electricity grids”, mayo de 2025

²⁸ energy.gov/gdo/grid-resilience

ce-and-innovation-partnerships-grip-program

²⁹ [worldbank.org/en/news/press-release/2022/11/09/world-bank-group-announces-major-initiative-to-electrify-sub-saharan-africa-with-distributed-renewable-energy](https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2022/11/09/world-bank-group-announces-major-initiative-to-electrify-sub-saharan-africa-with-distributed-renewable-energy)

³⁰ Yuwei Duan, Zihan Xu, Huiyi Chen, Yue Wang, Novel machine learning approach for enhanced smart grid power use and price prediction using advanced shark Smell-Tuned flexible support vector machine, Scientific Reports, 1 de julio de 2025, doi.org/10.1038/s41598-025-05083-0

³¹ energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters_en

³² “Smart electricity meter market 2024: Global adoption landscape”, IoT Analytics, 21 de febrero de 2024

³³ “Energy retail - Active consumer participation is key to driving the energy transition: how can it happen? 2024 Market Monitoring Report”, ACER, 30 de septiembre de 2024

³⁴ eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023R1162

³⁵ commission.europa.eu/funding-tenders/find-funding/eu-funding-programmes/digital-europe-programme_en

³⁶ Joint Research Centre, “Energy Smart Appliances: launch of an EU Code of Conduct for interoperability”, Comisión Europea, 23 de abril de 2024

³⁷ “The smart grid: How AI is powering today’s energy technologies”, SAP, 25 de julio de 2024

³⁸ “The Control Room of the Future”, Capgemini, 2025

³⁹ Jadyn Powell et al. Smart grids: A comprehensive survey of challenges, industry applications, and future trends, Energy Reports, junio de 2024, doi.org/10.1016/j.egy.2024.05.051

⁴⁰ greenempowerment.org/technical-resources/smart-grid-for-small-grids/

⁴¹ Yusuf Latief, “Flexibility for potatoes: PepsiCo helps stabilise the Dutch power grid”, Smart Energy International, 7 de julio de 2025

⁴² wartsila.com/media/news/04-08-2025-wartsila-to-deliver-pioneering-grid-stability-energy-storage-project-for-zenob%C4%93-on-shetland-islands-scotland-3639176

⁴³ “Grid Edge Intelligence Portfolio”, Itron, mayo de 2025

⁴⁴ “Low-voltage Grid Management Report”, Schneider Electric, 2024

⁴⁵ “IEC 61850 Ed.2.1: A new milestone in smart grid interoperability”, Smart Energy International, 18 de junio de 2025

⁴⁶ ec.europa.eu/commission/press-corner/detail/en/qanda_22_3132

⁴⁷ “Grid Modernization and the Smart Grid”, US Department of Energy, n. d.

⁴⁸ eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401366

⁴⁹ Muhammed Zekeriya Gunduz, Resul Daz, Cyber-security on smart grid: Threats and potential solutions, Computer Networks, 12 de marzo de 2020, doi.org/10.1016/j.comnet.2019.107094

⁵⁰ Eugenio Mallol, “Santiago Grijalva (Georgia Tech): El hardware podrá actuar como fuente de confiabilidad de las redes digitalizadas”, Atlas Tecnológico, 2 de julio de 2024

⁵¹ Conall Heussaff, Georg Zachmann, “Upgrading Europe’s electricity grid is about more than just money”, Bruegel, 12 de febrero de 2025

⁵² “Commission promotes strategic partnership for skills to advance the digitalisation of the energy system”, Comisión Europea, 14 de diciembre de 2023

⁵³ “Informe de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo. Situación de la competitividad de las tecnologías energéticas limpias”, Comisión Europea, 24 de octubre de 2023

