



Informe Anticipando coordinado por:

Miguel Ángel Martín-Delgado

Catedrático de Física Teórica en la Universidad Complutense de Madrid. Coordinador General del consorcio científico QUantum Information TEchnologies MADrid (QUITEMAD).



Expertos colaboradores:

Javier Prior

Director del grupo de Tecnologías Cuánticas de la Universidad de Murcia.

Vicente Martín

Catedrático de Ciencia de la Computación de la Universidad Politécnica de Madrid. Coordinador del Grupo de Investigación en Información Cuántica. Subdirector del Centro de Simulación Computacional.



Comité Asesor del Observatorio de Tendencias en la Medicina del Futuro:

Joaquín Arenas

Director del Instituto de Investigación del Hospital Universitario 12 de Octubre (+12).

Ángel Carracedo

Director de la Fundación Pública Gallega de Medicina Genómica (Servicio Gallego de Salud) y Coordinador del Grupo de Medicina Genómica de la Universidad de Santiago de Compostela (CIBERER).

Pablo Lapunzina

Profesor Titular de Genética Humana y Jefe de grupo de investigación del Instituto de Genética Médica y Molecular (INGEMM) del Hospital Universitario La Paz (IdiPaz) y Director científico del CIBERER.

Fernando Martín-Sánchez

Subdirector Gerente del Área de Informática Médica, Estrategia Digital e Innovación del Hospital Universitario La Paz.

Nº de depósito legal: M-22220-2024

ISBN edición online: 978-84-09-65392-8

©2024 del contenido: Fundación Instituto Roche. Se permite la reproducción parcial, sin fines lucrativos, indicando la fuente y la titularidad de la Fundación Instituto Roche sobre los derechos de la obra.

www.institutoroche.es

Cómo citar este informe: *Fundación Instituto Roche. Informe Anticipando Tecnologías Cuánticas en la Medicina del Futuro. 2024.*

Con la colaboración de Ascendo Sanidad&Farma.

Contenidos

PRESENTACIÓN	5
RESUMEN EJECUTIVO	7
INTRODUCCIÓN	9
PROPIEDADES Y PRINCIPIOS DE LA FÍSICA CUÁNTICA	9
NUEVAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN EL ÁMBITO DE LA SALUD	12
Sensores cuánticos.....	12
Computación cuántica.....	13
Criptografía cuántica.....	15
APLICACIONES DE LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN SALUD	17
APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN LA INVESTIGACIÓN Y EL DISEÑO DE FÁRMACOS	18
Desarrollo de nuevas técnicas instrumentales.....	18
Identificación de dianas moleculares y descubrimiento de fármacos.....	18
Diseño de nuevos modelos de ensayos clínicos.....	19
APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN LA PRÁCTICA CLÍNICA ASISTENCIAL	20
Prevención y predicción de enfermedades.....	20
Detección temprana y diagnóstico de enfermedades.....	20
Tratamiento de enfermedades.....	21
APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN LA SEGURIDAD DEL ÁMBITO SANITARIO	22
Almacenamiento de datos a largo plazo.....	22
Análisis de datos masivos.....	22
Comunicaciones médicas y dispositivos interconectados.....	23
RETOS	25
RETOS TÉCNICOS	25
RETOS DE IMPLEMENTACIÓN Y TRASLACIÓN A LA PRÁCTICA CLÍNICA ASISTENCIAL	26
RETOS RELACIONADOS CON LA CAPACITACIÓN Y FORMACIÓN	26
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	27
RECOMENDACIONES	27
BIBLIOGRAFÍA	29

TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN LA MEDICINA DEL FUTURO





PRESENTACIÓN

Los Informes Anticipando, elaborados en el marco del Observatorio de Tendencias en la Medicina del Futuro impulsado por la Fundación Instituto Roche, surgen con el objetivo de contribuir a la generación y puesta en común de los avances en áreas de conocimiento incipiente relacionadas con la Medicina Personalizada de Precisión y que formarán parte de la Medicina del Futuro.

El Observatorio cuenta con un Comité Asesor de expertos formado por el Dr. Ángel Carracedo, el Dr. Joaquín Arenas, el Dr. Pablo Lapunzina y el Dr. Fernando Martín-Sánchez. Entre sus funciones se incluye la selección de las temáticas que abordan estos informes, la identificación de expertos y la validación de los contenidos.

Este informe que versa sobre *“Tecnologías Cuánticas en la Medicina del Futuro”* está coordinado por el **Prof. Miguel Ángel Martín-Delgado**, y en su elaboración han participado como expertos el **Prof. Javier Prior** y el **Prof. Vicente Martín**.

El **Prof. Miguel Ángel Martín-Delgado** es Catedrático de Física Teórica en la Universidad Complutense de Madrid (UCM), Doctor en Ciencias Físicas. Vocal del Consejo Rector del Centro Español de Metrología, *Fellow* de la *ELLIS Society (European Laboratory for Learning and Intelligent Systems)*, *Visiting Research Fellow* en la Universidad de Princeton y visitante invitado en numerosas instituciones de prestigio internacional. Dirige el grupo de investigación Grupo de Información y Computación Cuánticas de la UCM desde su creación en 2003. Coordinador del módulo de Información Cuántica del Máster en Física Teórica de la UCM. Es también Coordinador General del consorcio científico QUITEMAD (*QUantum Information TEchnologies MADrid* en la Comunidad de Madrid), Editor Científico de la revista *Scientific Reports* (área Física Cuántica) del *Nature Publishing Group* y Académico Correspondiente de la Real Academia de Ciencias. Sus

logros científicos en computación cuántica incluyen: los primeros algoritmos cuánticos desarrollados en España; la formulación de nuevos modelos de ordenadores cuánticos topológicos más versátiles y de mayor capacidad de cómputo llamados *‘topological color codes’* con los que se consiguió la primera corrección cuántica completa de errores en una memoria cuántica experimental; pionero en el estudio de las propiedades de los aislantes y superconductores topológicos con aplicaciones a la computación cuántica; la formulación del primer agente cuántico de IA (robótica cuántica) con ventaja cuántica probada matemáticamente; y desarrollo de nuevos algoritmos con inferencia bayesiana para IA cuántica.

El **Prof. Javier Prior** es licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Valencia y doctor por la Universidad de Murcia habiendo trabajado durante más de 10 años en el campo de las tecnologías cuánticas. El Prof. Prior ha sido investigador en las universidades de Oxford e Imperial College (Inglaterra) durante más de tres años y posteriormente se incorporó como profesor a la Universidad Politécnica de Cartagena donde compaginó su posición con la de profesor visitante en la universidad de Ulm (Alemania) durante más de 10 años. Desde 2021, es profesor del Departamento de Física de la Universidad de Murcia donde dirige el grupo de investigación en tecnologías cuánticas junto con el laboratorio de sensores cuánticos. Además, es co-fundador y organizador del ciclo de conferencias bianuales *New Trends in Complex Quantum Systems Dynamics* y editor de la revista *Scientific Reports*. Ha sido el investigador principal de 11 proyectos de investigación entre los que destacan dos acciones ERAnet (QuanERA) y un proyecto *Horizon Europa*. Su investigación ha tenido una gran influencia en los campos de la biología cuántica, mediante su interpretación del papel de la física cuántica en la fotosíntesis, y de los sensores cuánticos, explorando la naturaleza de

TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN LA MEDICINA DEL FUTURO

los detectores Nitrógeno-Vacante implantados en diamantes y donde ha desarrollado nuevos protocolos de medida con aplicaciones en el campo de la medicina.

El **Prof. Vicente Martín** es Catedrático de Ciencias de la Computación de la Universidad Politécnica de Madrid, subdirector del Centro de Simulación Computacional y coordina el Grupo de Investigación en Información Cuántica. Es también coordinador del Centro de Pruebas de Comunicaciones Cuánticas DIANA OTAN y de la Infraestructura de Comunicaciones Cuánticas de Madrid. Ha sido Investigador Principal en más de 30 proyectos de Comunicaciones Cuánticas, destacando especialmente su participación en el programa europeo Quantum Flagship,

donde lideró los trabajos relacionados con redes cuánticas. También ha coordinado el Programa Nacional de Comunicaciones Cuánticas (acciones complementarias) a nivel nacional. Ha trabajado en estándares sobre QKD (Distribución Cuántica de Claves), principalmente en ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) donde fue fundador del Grupo de Especificación Industrial sobre Distribución Cuántica de Claves Cuánticas y actual *vicechair* y en CEN (*Comité Européen de Normalisation*), donde es el coordinador del Grupo de Trabajo de Criptografía y Comunicaciones Cuánticas. Su principal interés de investigación es la integración de las Comunicaciones Cuánticas para nuevas aplicaciones en Redes de Telecomunicaciones e infraestructuras críticas.





RESUMEN EJECUTIVO

Las **tecnologías cuánticas** están transformando numerosos sectores, entre ellos el de la salud. Aunque su uso en el ámbito médico ya incluye aplicaciones consolidadas como el láser y la resonancia magnética nuclear, los recientes avances han situado a las tecnologías cuánticas como una de las **áreas emergentes con mayor potencial para revolucionar el campo de la salud**. En este contexto, destacan tres tecnologías cuánticas: los sensores cuánticos, la computación cuántica y la criptografía cuántica.

Estas tecnologías prometen mejoras significativas en la investigación clínica. Los **sensores cuánticos** permitirán una detección más precisa de biomarcadores y otros marcadores moleculares, facilitando el desarrollo de nuevas técnicas diagnósticas. La **computación cuántica**, con su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos a velocidades sin precedentes, potenciará el diseño de fármacos innovadores y optimizará los ensayos clínicos.

Por otro lado, en la práctica clínica asistencial, estas tecnologías tienen el potencial de transformar la prevención, la predicción y el diagnóstico precoz de enfermedades. También podrían mejorar la monitorización de pacientes y el tratamiento personalizado, contribuyendo a una atención sanitaria más eficaz y adaptada a las necesidades individuales de cada persona. La **criptografía cuántica**, por su parte, ofrecerá una seguridad absoluta en la protección de datos, un aspecto crítico en un entorno sanitario cada vez más digitalizado.

Sin embargo, el desarrollo de las tecnologías cuánticas se encuentra todavía en etapas iniciales de desarrollo, su integración en el sistema sanitario requiere de la generación de evidencia sólida y la creación de infraestructuras adecuadas. Además, será necesario afrontar una serie de desafíos y limitaciones técnicas de implementación y de capacitación para asegurar una integración efectiva, con el objetivo de aprovechar al máximo su potencial y trasladar sus innovaciones al ámbito de la medicina del futuro.

TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN LA MEDICINA DEL FUTURO





INTRODUCCIÓN

Las tecnologías cuánticas son aquellas que se basan en las propiedades y las características que adquiere la materia a escala microscópica, estudiadas por la física cuántica. La aplicación de las tecnologías cuánticas en medicina tiene precedentes de un amplio recorrido, como, por ejemplo, el uso del láser o las imágenes por resonancia magnética nuclear (RMN), si bien, con los avances de los últimos años en este campo, se han posicionado como unas de las tecnologías emergentes con mayor potencial e impacto en la medicina del futuro. En este sentido, cabe destacar que las Naciones Unidas han elegido **el año 2025 como el Año Internacional de las Ciencias y Tecnologías Cuánticas**, en conmemoración del centenario del descubrimiento de uno de los principios fundamentales de la física cuántica, el Principio de indeterminación de Heisenberg.¹⁻³

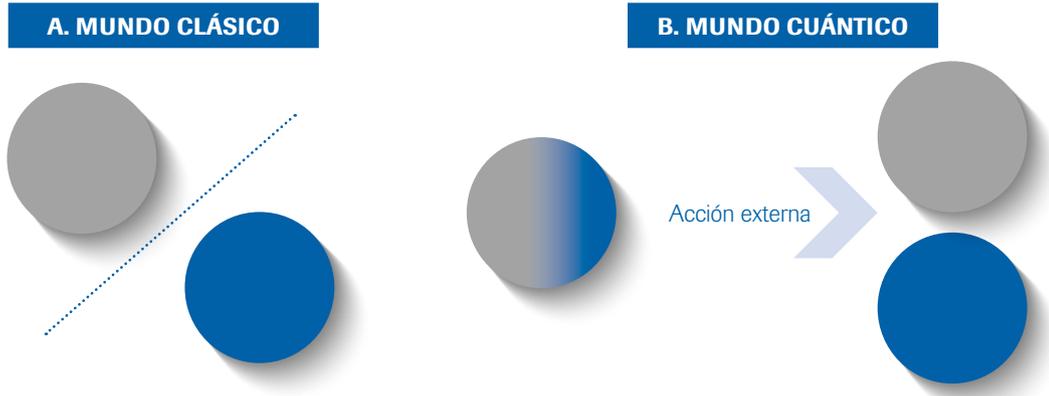
De hecho, en los últimos años, **se han producido avances significativos en el ámbito de las tecnologías cuánticas que han permitido el desarrollo de nuevos métodos para el estudio, la predicción, el diagnóstico, el tratamiento o la monitorización de las enfermedades adecuándose a las necesidades de cada persona, lo que favorecerá la implementación de la Medicina Personalizada de Precisión.** De esta manera, y gracias a la disposición de herramientas informáticas capaces de realizar análisis masivos e intercambios de datos de salud, de manera rápida, eficiente y segura, se espera que las aplicaciones derivadas de las tecnologías cuánticas revolucionen la medicina del futuro.

PROPIEDADES Y PRINCIPIOS DE LA FÍSICA CUÁNTICA

La física cuántica es una rama de la física que surgió en 1900 y se desarrolló durante el primer cuarto del siglo XX, y que estudia los fenómenos que se producen a escala atómica y subatómica. Las partículas que se encuentran a estas escalas, también denominadas partículas cuánticas, como son, por ejemplo, los átomos, los electrones o los fotones, exhiben propiedades que difieren de los microorganismos y estructuras observables a escala macroscópica. Estas **propiedades de las partículas cuánticas** les confieren un comportamiento distinto, las cuales se describe a continuación:

- **Superposición o coherencia:** una partícula cuántica puede encontrarse en varios estados a la vez, oscilando constantemente entre ellos. No obstante, si una partícula se ve afectada por una señal externa o perturbación pierde su “coherencia”, pasando a estar en un único estado. Esto impide conocer con exactitud en qué estado se encuentra una partícula cuántica en un momento determinado. Es en el momento en que se observa, cuando se perturba y adopta uno de sus estados posibles.⁴⁻⁸

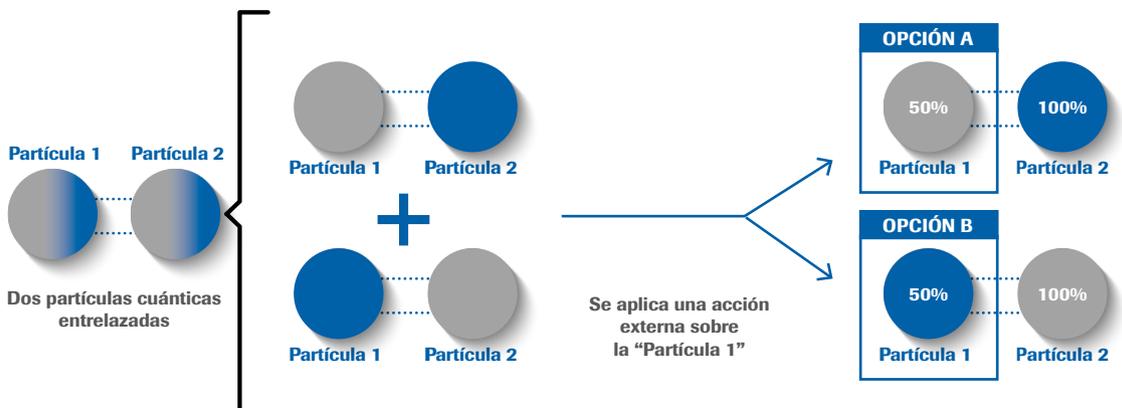
Figura 1. Superposición o coherencia cuántica.



En el mundo clásico, las partículas únicamente se pueden encontrar en un estado (gris o azul). De acuerdo con los principios cuánticos, la partícula se encuentra oscilando entre ambos estados (gris y azul), y únicamente toma uno de los estados cuando se le aplica una acción externa sobre ella.

- **Entrelazamiento:** dos o más partículas cuánticas de un sistema⁹ están fuertemente correlacionadas entre sí. Esto significa que el estado cuántico de una de las partículas está tan estrechamente ligado al estado de las demás que no se puede describir de manera independiente. De modo que, aunque las partículas se encuentren separadas, si se mide el estado de una de las partículas, instantáneamente se conoce el estado de la otra.⁴⁻⁸

Figura 2. Entrelazamiento cuántico.



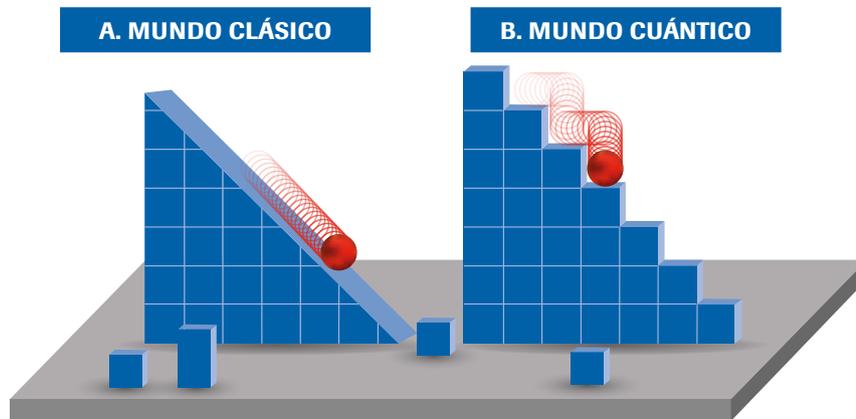
En un sistema cuántico de dos partículas entrelazadas, ambas partículas existen inicialmente en una superposición de estados, oscilando entre gris y azul. Sin embargo, al aplicar una acción externa y medir el estado, por ejemplo, de la partícula 1, esta toma uno de los dos estados posibles (gris o azul), con una probabilidad del 50% para cada caso. Si, al realizar la medición, la partícula 1 resulta estar en el estado gris, de forma instantánea, la partícula 2 tomará el estado opuesto, azul. Del mismo modo, si la partícula 1 es medida en el estado azul, automáticamente la partícula 2 estará en el estado gris. Esta correlación ocurre sin importar la distancia entre las partículas.



Además, los **principios por los que se rige la física cuántica**, y por tanto las partículas cuánticas, descritos a continuación, se diferencian significativamente de los de la física clásica, la cual describe los fenómenos producidos a escala macroscópica:

- **Principio de cuantización de la energía:** generalmente en los sistemas cuánticos, la energía únicamente puede tomar valores discretos. Esto significa que la energía de una partícula no puede variar de manera continua, sino solo en incrementos o paquetes de energía fijos, denominados “cuantos”.⁴⁻⁸

Figura 3. Cuantización de la energía.



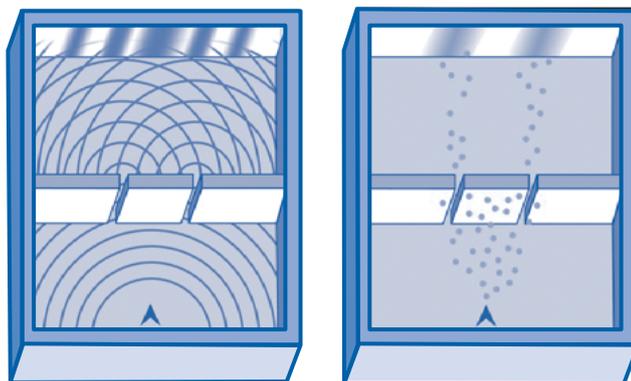
En un sistema clásico, la energía varía de manera gradual o continua y, por lo tanto, puede tomar cualquier valor. Sin embargo, en un sistema cuántico la energía únicamente toma valores fijos o discretos, de manera que varía de forma “escalonada” en lo que se conoce como los “cuantos”. Adaptada de (9).

- **Principio de indeterminación de Heisenberg:** establece que no es posible medir de manera simultánea y con precisión ciertas propiedades de una partícula, tales como su posición y velocidad, por ejemplo, ya que, al medir la posición de una partícula con gran precisión, no se puede conocer su velocidad, y viceversa. Esto implica que, en lugar de describir la trayectoria exacta de una partícula, la física cuántica proporciona una probabilidad de encontrar la partícula en un determinado lugar y con una determinada velocidad. Estas probabilidades (amplitudes)

se describen a través de la **ecuación de Schrödinger**, que permite estudiar cómo cambian las propiedades de una partícula a lo largo del tiempo de forma matemática.⁴⁻⁸

- **Principio de interferencia:** derivado del hecho de que las partículas cuánticas pueden comportarse como ondas de probabilidad, cuando dos o varias ondas interactúan o se superponen se producen un fenómeno que se conoce como “interferencias”.⁴⁻⁸

Figura 4. Principio de Interferencia.



El experimento de la doble rendija demuestra que las partículas cuánticas tienen una doble naturaleza: pueden comportarse como partículas o como ondas. Al lanzar electrones o fotones hacia una barrera con dos rendijas, se observa un patrón de interferencia en la pantalla detrás de la barrera (izquierda). Este patrón indica que las partículas pasan simultáneamente por ambas rendijas y se comportan como ondas. Sin embargo, si se intenta observar por cuál rendija pasa la partícula, su comportamiento cambia: actúa como una partícula clásica, pasando solo por una rendija y desapareciendo el patrón de interferencia (derecha). Adaptada de (10).

Cabe destacar que, aunque **los principios de la física cuántica** sean intrínsecos a la escala atómica, **pueden ser aplicados a escala macroscópica, lo que permite ampliar el potencial de muchas tecnologías.** Concretamente, en el campo de la salud, las tecnologías cuánticas permitirán detectar y medir con gran sensibilidad pequeñas variaciones en sustancias, realizar cálculos de manera rápida y precisa, y mejorar el procesamiento y manejo de grandes volúmenes de datos. Además, posibilitarán la creación de sistemas de codificación y encriptación que harán las comunicaciones mucho más seguras que las actuales.

NUEVAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN EL ÁMBITO DE LA SALUD

Como se ha señalado anteriormente, muchos de los dispositivos empleados actualmente en la práctica clínica tienen un origen cuántico, como, por ejemplo, la RMN para la realización de imágenes médicas o el láser, utilizado en diferentes aplicaciones médicas. Sin embargo, en los últimos años se han producido avances significativos que han permitido el desarrollo de nuevas tecnologías

cuánticas que pueden ser aplicadas en el ámbito de la salud. Estas tecnologías cuánticas se pueden categorizar en: **sensores cuánticos, computación cuántica y criptografía cuántica.**

SENSORES CUÁNTICOS

Un sensor es un dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, etc., y la transmite adecuadamente.¹¹ Los **sensores cuánticos permiten medir con gran sensibilidad modificaciones de las propiedades cuánticas debidas a una acción externa,** ya sea en los cuantos de energía de una partícula, en el entrelazamiento entre distintos sistemas o en la coherencia cuántica. En la actualidad, los sensores cuánticos son las tecnologías cuánticas más desarrolladas, que permiten detectar y medir variaciones mínimas de sustancias, que pasan desapercibidas por los sensores tradicionales, con gran sensibilidad, en pequeñas muestras. Además, gracias a la gran precisión de los sensores cuánticos, no es necesario repetir las mediciones para obtener resultados consistentes.

Se están desarrollando diferentes plataformas^b para la aplicación de los sensores cuánticos en el campo de



la salud y cuyos resultados están siendo prometedores, como, por ejemplo:

- **Sensores basados en centros de Nitrógeno Vacante implantados en diamantes** (diamantes NV o centros NV implantados en diamantes). Se trata de estructuras cristalinas de diamante en las que se reemplaza uno de los átomos de carbono por un átomo de nitrógeno, dejando una posición vacante adyacente, generando un “defecto” o irregularidad a nivel atómico.¹² Los centros NV son altamente sensibles a los cambios físicos de su entorno, como el calor, la luz, la presión, los campos electromagnéticos o la composición química de su entorno, entre otros. Además, este tipo de sensores basados en diamantes NV **son biocompatibles**^c y los únicos que pueden actuar a temperatura ambiente, propiedades que, actualmente, los convierten en los principales potenciales sensores cuánticos en el ámbito de la medicina.¹²
- **Sensores basados en SQUID (*superconducting quantum interference device*)**. Consisten en dispositivos compuestos por materiales superconductores con forma de anillo, separados por una pequeña capa de material aislante. Estos sensores basados en SQUID son capaces de medir cambios en los campos magnéticos con elevada sensibilidad y precisión. A diferencia de los sensores basados en diamantes NV, los sensores basados en SQUID **no son biocompatibles** y necesitan permanecer a temperaturas criogénicas (entre los -150°C y los -195°C).¹³

COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Se denomina computación clásica al uso de ordenadores y sistemas basados en los principios de la física clásica para el procesamiento de datos. En cambio, la computación cuántica es una rama de la computación que **utiliza los principios de la física cuántica para procesar información**. Se caracteriza por tener un **potencial computacional mucho mayor al de la computación clásica, pudiendo resolver problemas complejos de manera mucho más rápida y eficiente**.¹⁴⁻¹⁶

La principal diferencia entre ambas es la **unidad de información básica** que emplean. En la computación convencional, la unidad de información es el bit, el cual

puede adoptar dos valores, 0 o 1. Por medio de combinaciones de bits se genera información, que después puede ser almacenada o procesada por el ordenador. En cambio, en la computación cuántica, la unidad de información es el **cúbit**, el cual se encuentra en una superposición de ambos estados, 0 y 1, a la vez.¹⁴⁻¹⁶ Además, gracias a las propiedades cuánticas de entrelazamiento e interferencia, los cúbits permiten incrementar exponencialmente la información generada y realizar múltiples cálculos en paralelo con gran precisión, lo que contribuye a la resolución de problemas más complejos en un menor tiempo.

Para la computación cuántica es necesario emplear ordenadores cuánticos capaces de procesar los cúbits de información. Se trata de sistemas muy complejos y sensibles, que deben mantenerse en condiciones estables, temperaturas próximas al cero absoluto (-273°C) en algunos prototipos actuales y aislados del ruido externo (campos eléctricos, campos magnéticos, etc.). De hecho, cualquier modificación en estas condiciones puede afectar a las capacidades de los ordenadores cuánticos, conduciendo a la generación de errores en sus cálculos.¹⁴⁻¹⁷ Esto dificulta la disponibilidad y el empleo de ordenadores cuánticos en distintas aplicaciones y, en especial, en la práctica clínica actual.

Actualmente, hay numerosas plataformas cuánticas en desarrollo que representan diferentes enfoques en el campo de las tecnologías cuánticas. La diversidad en los tipos de cúbits y sus características es crucial para encontrar las soluciones más adecuadas para diversas aplicaciones cuánticas en el futuro. Entre las principales plataformas, se encuentran:

- **Cúbits de Iones Atrapados**: plataforma basada en el uso de átomos cargados (iones) que se encuentran retenidos en dispositivos denominados trampas de iones^d. Estos iones presentan propiedades cuánticas, como la superposición de estados y entrelazamiento. Esta plataforma sirve para construir los ordenadores cuánticos, **permitiendo realizar múltiples cálculos precisos de manera simultánea**. Asimismo, gracias al diseño de estas trampas de iones, se pueden conectar múltiples sistemas cuánticos, favoreciendo su escalado y potencial de procesamiento.¹⁸⁻²⁰
- **Cúbits Superconductores**: plataforma que utiliza circuitos basados en materiales superconductores, como el plomo o el aluminio, para transmitir la corriente

^cQue no producen reacciones alérgicas, inmunitarias, etc., al entrar en contacto con los tejidos del organismo.

^dDispositivo que utiliza campos electromagnéticos para atrapar iones.

TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN LA MEDICINA DEL FUTURO

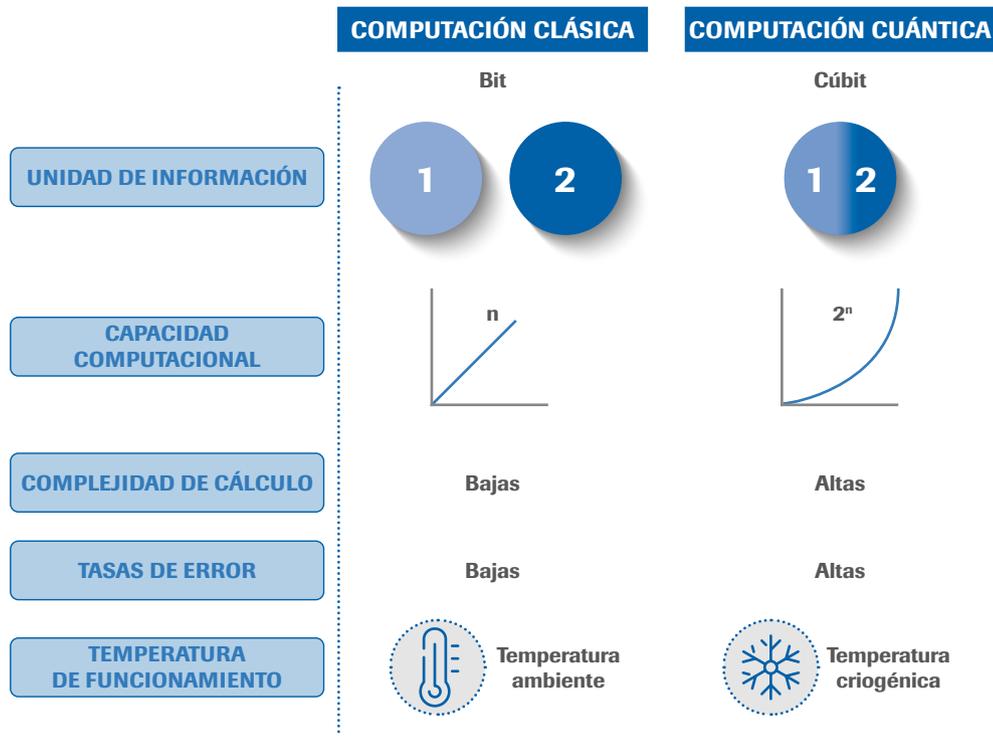
eléctrica de manera eficiente. Esta plataforma permite aumentar significativamente la transmisión de la corriente eléctrica con respecto a otros materiales convencionales, **incrementando**, a su vez, **la eficacia, la velocidad y la escalabilidad del procesamiento de la información**.²¹⁻²³

- **Cúbits de Redes Ópticas:** plataforma basada en el uso de átomos neutros que son atrapados en redes ópticas⁹. Los átomos neutros presentan propiedades cuánticas, y pueden ser manipulados para modelar su estado cuántico y **realizar diferentes operaciones rápidas y precisas**.^{24,25}

Asimismo, también destacan otras plataformas como los cúbits de espín en silicio, cúbits fotónicos, electrones individuales en diamante (centros de vacantes de nitrógeno), cúbits topológicos, cúbits de espín en moléculas, entre otras.

Se prevé que la computación cuántica sea la tecnología cuántica con mayor potencial de impacto en la medicina del futuro, debido a su capacidad para realizar cálculos rápidos y precisos, potenciando el procesamiento y el manejo de grandes volúmenes de datos y la mejora de modelos de simulación cuánticos.

Figura 5. Principales diferencias entre computación clásica y la computación cuántica.



La computación clásica y la computación cuántica difieren en varios aspectos clave. En la computación clásica, la unidad básica de información es el bit, que puede ser 0 o 1, mientras que en la computación cuántica es el cúbit, que puede representar simultáneamente 0 y 1. Esto permite que un ordenador cuántico, con n cúbits, realice cálculos en paralelo sobre 2^n combinaciones posibles, aumentando la capacidad computacional de estos ordenadores y pudiendo resolver cálculos mucho más complejos que los ordenados clásicos. Sin embargo, debido a la sensibilidad y a la naturaleza de los cúbits, los ordenadores cuánticos tienen tasas de error mucho mayores que los clásicos, que suelen ser más confiables. Además, para su correcto funcionamiento deben mantenerse en condiciones extremas, mientras que los ordenadores clásicos operan en condiciones normales. Adaptado de (16).

⁹Estructuras tridimensionales formadas por la intersección de haces de láser que permiten retener átomos.



CRIPTOGRAFÍA CUÁNTICA

La criptografía consiste en **codificar o encriptar la información mediante algoritmos y problemas matemáticos complejos**, como la factorización^f de números enteros grandes **para establecer claves y proteger la información**.²⁶ Se trata de un sistema muy seguro ya que los ordenadores actuales no tienen la capacidad computacional suficiente para descifrar estas claves. De hecho, los ordenadores más potentes en la actualidad tardarían miles de millones de años ($3,31 \times 10^{56}$ años) en descifrar una clave de 256 bits.²⁶ Sin embargo, en 1994, Peter Shor demostró matemáticamente que la computación cuántica, con su capacidad de procesar una enorme cantidad de datos y realizar cálculos de manera simultánea, sí podrá descifrar las claves de la criptografía convencional en un menor tiempo, en cuestión de minutos o segundos.²⁶⁻²⁸

La **criptografía cuántica** se basa en la **propiedad cuántica de la coherencia y el entrelazamiento para generar claves y proteger la información, por lo que, independientemente de los avances en la capacidad de computación, las claves cuánticas no podrían ser descifradas**. De esta manera, la criptografía cuántica se posiciona como una tecnología revolucionaria para la protección y seguridad de la información, y que permite crear sistemas de comunicación más seguros.^{27,28}

La principal plataforma desarrollada para la aplicación de la criptografía en el campo de la salud son los **fotones^g de guía de onda**.²⁹ Esta plataforma consiste en una estructura que confina y dirige los fotones en una dirección específica, pudiendo transmitir señales a gran velocidad y con gran alcance. En base a esta plataforma, se ha desarrollado el principal sistema de criptografía cuántica desarrollado, la **Distribución de Claves Cuánticas** (QKD, por sus siglas en inglés), diseñado por Bennett y Brassard en 1984. Está basado en el envío de fotones a través de un cable de fibra óptica entre los agentes del sistema, emisor y receptor, que establecen previamente una clave segura para codificar la información. El emisor es capaz de definir la orientación física específica de los fotones, de manera que se “fuerza” a cada partícula a adoptar un único valor (0 o 1), generando una clave a través del cable de fibra óptica al mismo tiempo en el emisor y en el receptor. El receptor lee el estado de cada fotón que recibe

y los compara con los estados de los fotones enviados, generándose la clave colaborativamente. Una vez se establece esta clave, tanto el emisor como el receptor, pueden utilizarla para cifrar y descifrar mensajes a través de algoritmos criptográficos clásicos. Dado que no es posible observar el estado cuántico de los fotones sin que este se modifique, cualquier intento de descifrar el código por parte de un agente externo (que no sea ni el emisor ni el receptor) perturbaría el sistema, inhabilitando el acceso a la información.²⁶⁻²⁸

Dada la naturaleza y la sensibilidad de la información relativa a la salud, y el gran avance en la digitalización del sector salud, la criptografía cuántica se posiciona como una posible herramienta para proteger la información y permitir el intercambio de datos entre profesionales sanitarios, investigadores y pacientes de manera segura.

A nivel nacional, cabe destacar el proyecto MadQCI (*Madrid Quantum Communications Infrastructure*), iniciado en 2009, que tiene como objetivo construir una infraestructura de comunicaciones cuánticas que cubra el área metropolitana de Madrid y se conecte con la futura red de comunicaciones cuánticas europea EuroQCI (*European Quantum Communication Infrastructure*). El proyecto no solo está enfocado en mejorar la ciberseguridad, sino también en promover la innovación tecnológica mediante la colaboración entre instituciones públicas y privadas. Entre los participantes clave se encuentran la Universidad Politécnica de Madrid, Telefónica y RedIMadrid. Actualmente, la red se extiende en un radio de 30 km y se espera que en un futuro puedan incluirse hospitales y centros de salud de Madrid a esta red para garantizar la seguridad en el intercambio de información clínica.^{28,30}

Por todo ello, los **sensores cuánticos, la computación cuántica y la criptografía cuántica** se posicionan como tecnologías emergentes con un gran potencial en la medicina del futuro. Su desarrollo e implementación permitirán **cambiar el paradigma de la investigación sanitaria y de la seguridad y privacidad de los datos en un entorno sanitario cada vez más digitalizado, así como contribuir a la Medicina Personalizada de Precisión al mejorar la capacidad de prevención, predicción y diagnóstico precoz de enfermedades, y el desarrollo de tratamientos innovadores y personalizados**.

^fConsiste en descomponer un número, un polinomio, una matriz u otros entes matemáticos como producto de otros más simples.

^gPartícula de luz con la unidad de energía más pequeña en una onda de luz. Los fotones no se pueden dividir y oscilan en dos direcciones perpendiculares al mismo tiempo.

TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN LA MEDICINA DEL FUTURO



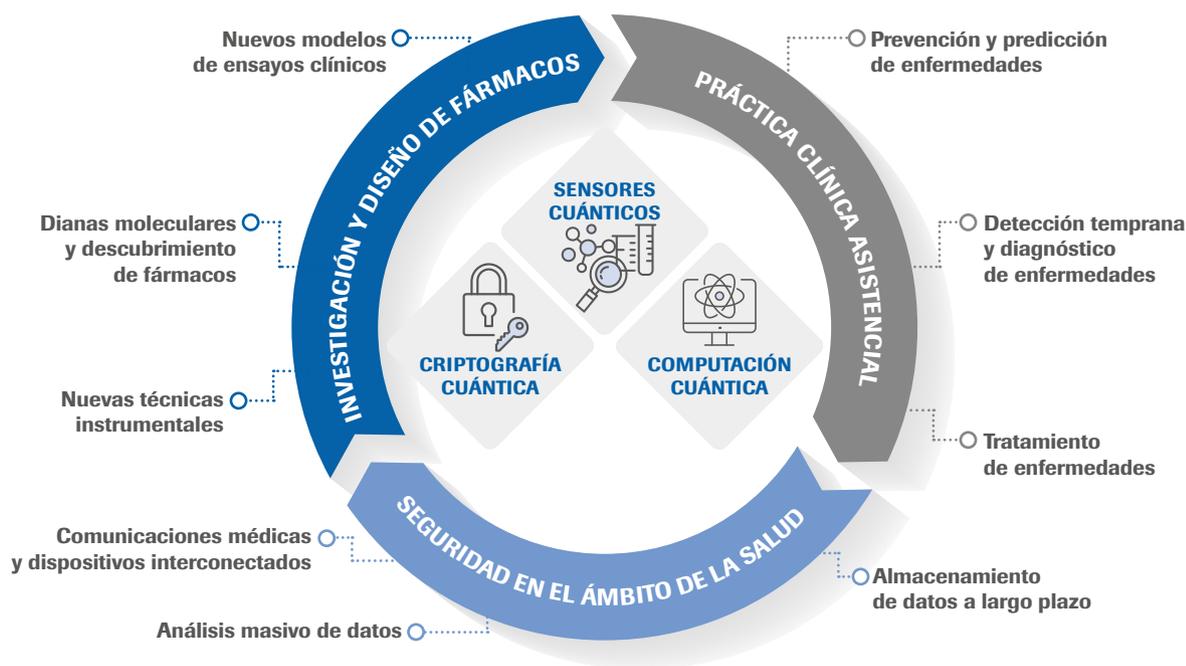


APLICACIONES DE LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN SALUD

Los objetivos principales que persiguen las tecnologías cuánticas en el campo de la medicina, y concretamente en la Medicina Personalizada de Precisión, se centran en el desarrollo de nuevas técnicas de investigación y el diseño de fármacos, la mejora de la práctica clínica

asistencial y el soporte de los profesionales sanitarios en la toma de decisiones, y la seguridad en la recopilación, almacenamiento y manejo de los datos de salud.

Figura 6. Principales aplicaciones de las tecnologías cuánticas en Medicina Personalizada de Precisión.



APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN LA INVESTIGACIÓN Y EL DISEÑO DE FÁRMACOS

En el ámbito de la investigación biomédica y clínica, se espera que la aplicación de las tecnologías cuánticas, y en concreto de los sensores y la computación cuántica, tengan un mayor impacto. Estas tecnologías permitirán un conocimiento más profundo y una mejor comprensión de las enfermedades y sus causas, mediante el desarrollo de nuevas técnicas instrumentales avanzadas^h y el análisis masivo de datos. Además, posibilitarán rediseñar la manera en que se investigan nuevos fármacos a través de modelos de simulación cuánticos, contribuyendo a optimizar y reducir el tiempo necesario en las diferentes fases de la investigación sanitaria.

DESARROLLO DE NUEVAS TÉCNICAS INSTRUMENTALES

MICROFLUÍDICA

Una de las principales líneas de desarrollo con sensores cuánticos de diamantes NV se centra en el campo de la microfluídicaⁱ, dada la elevada sensibilidad de los sensores cuánticos para el análisis de la composición química de muestras y la medición precisa en microvolúmenes. Los sensores cuánticos basados en diamantes NV pueden integrarse en dispositivos microfluídicos conocidos como *lab-on-chip*^j, integrando una o varias funciones de laboratorio en una sola plataforma, tales como la secuenciación del ADN, el análisis químico en muestras biológicas, el estudio de reacciones químicas o enzimáticas, entre otras.^{31,32} Asimismo, se han incluido sensores cuánticos en chips microfluídicos conocidos como *organ-on-a-chip*^k para estudiar la fisiopatología humana o el efecto terapéutico de los fármacos en el organismo.^{31,32}

ESPECTROSCOPIA POR NANO-RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR

Otra de las líneas de trabajo con sensores cuánticos de diamantes NV más prometedoras es lo que se conoce como espectroscopía por nano-resonancia magnética nuclear (nanoRMN).³³⁻³⁵ Las nanoRMN permiten estudiar

sistemas formados por pocas moléculas y detectar la presencia de radicales libres^l, alcanzando una sensibilidad que permite detectar variaciones a escala nanométrica (10^{-6} mm) con una resolución mucho mayor que la de las técnicas de espectroscopía de RMN convencional^m. Sus aplicaciones se están desarrollando para el estudio de interacciones moleculares en ambientes biológicos complejos, y el análisis de estructuras moleculares y composiciones químicas de materiales y sistemas biológicos que no pueden ser detectados con las técnicas tradicionales de espectroscopía de RMN.³³⁻³⁵

IDENTIFICACIÓN DE DIANAS MOLECULARES Y DESCUBRIMIENTO DE FÁRMACOS

El estudio y la comprensión de los procesos biológicos que dan origen a distintas enfermedades es fundamental para entender las causas y los factores de riesgo del desarrollo de las patologías, así como para desarrollar diferentes estrategias preventivas, diagnósticas y terapéuticas.

DIANAS MOLECULARES

En el ámbito de las ciencias ómicas (para ampliar la información ver el Informe Anticipando sobre las *Ciencias Ómicas*), actualmente existen aplicaciones de los sensores cuánticos y de la computación cuántica que permitirán explotar al máximo su potencial, impulsando una aproximación holística y personalizada basada en las características individuales de cada persona.

En el campo de la genómica, la computación cuántica puede emplearse para estudiar patrones e interacciones moleculares derivadas de grandes secuencias de ADN, facilitando la comprensión de enfermedades genéticas y la identificación de mutaciones relevantes de manera rápida y precisa.³⁶ Además, se podrán comparar grandes volúmenes de datos, optimizando, por ejemplo, la reconstrucción de árboles filogenéticos que muestren las relaciones evolutivas entre diferentes especies, aportando una mayor información sobre la evolución genética. Este ámbito es especialmente importante para el entendimiento y estudio de enfermedades de carácter hereditario.³⁶ Asimismo, por medio de algoritmos de aprendizaje automático cuántico (QML), será posible clasificar enfermedades genéticas a



partir de grandes conjuntos de datos genéticos. Esta capacidad de procesamiento mejorada puede ayudar en la detección temprana de enfermedades y en el desarrollo de tratamientos personalizados, allanando el camino a la investigación genética y a la Medicina Personalizada de Precisión.^{36,37}

Del mismo modo, en el ámbito de la **proteómica**, las tecnologías cuánticas mejorarán la comprensión sobre las interacciones entre proteínas en los distintos procesos biológicos que son desencadenantes de numerosas enfermedades, y para los cuales no se disponen de herramientas o dispositivos para estudiarlos en detalle. Además, gracias a las propiedades inherentes de los sensores cuánticos, se podrán estudiar los procesos biológicos producidos a nivel intracelular. Concretamente, se han desarrollado sensores cuánticos de centros de NV implantados en nano-diamantes para el estudio de los procesos inflamatorios, a través de la medición de los cambios térmicos producidos a nivel local en las células que desencadenan la inflamación. Estos sensores permitirán realizar estudios fisiológicos para la generación de evidencia científica sobre el origen de distintas enfermedades y patologías, tales como los trastornos cardíacos, la diabetes o las enfermedades autoinmunes, los cuales se consideran que podrían estar estrechamente relacionados con la inflamación y la sobreactivación del sistema inmune.^{38,39} Por otro lado, a través de algoritmos cuánticos, se podrán predecir cómo interaccionan las proteínas durante estos procesos biológicos, con el objetivo de identificar nuevas dianas terapéuticas y guiar el desarrollo de nuevos tratamientos.³⁶

La computación cuántica también presenta un papel fundamental en el estudio y la determinación del plegamiento espacial de las proteínas. Del correcto plegamiento espacial de las proteínas depende su función en el organismo. Sin embargo, actualmente, solo se conoce la estructura de menos del 10% de las proteínas cuyas secuencias se encuentran disponibles. En este sentido, se ha desarrollado QFold, una herramienta de computación cuántica que combina el sistema de predicción *AlphaFold*^h basado en técnicas de *deep learning*, con el algoritmo de computación cuántica *Metropolis-Hastings*.⁴⁰ Con algoritmos como QFold se podrán realizar simulaciones moleculares y modelaciones de interacciones complejas a nivel atómico para predecir el plegamiento de las proteínas de manera rápida y precisa, y por lo tanto su estructura tridimensional, con una exactitud superior a las técnicas

convencionales y con un menor consumo de tiempo y de recursos.^{36,37}

DESCUBRIMIENTO Y DISEÑO DE FÁRMACOS

Los **avances producidos en la química informática y la bioinformática, junto a la gran disposición de datos de salud, han permitido mejorar la identificación de moléculas que pueden servir como dianas terapéuticas para el diseño y desarrollo de fármacos**. Dada la gran disponibilidad de datos y la dependencia de recursos informáticos de alto potencial y rendimiento necesarios para el descubrimiento de nuevos fármacos, se prevé que los avances producidos en computación cuántica podrían revolucionar la investigación biomédica y el desarrollo de tratamientos y terapias dirigidas mucho más eficaces. A través de algoritmos cuánticos, se podrán explorar amplias variedades de composiciones químicas e identificar posibles candidatos con mayor exactitud. Además, su implementación favorecerá a la optimización de los procesos, reduciendo los costes y los tiempos requeridos en la investigación farmacéutica. El desarrollo de métodos de simulación cuántica permitirá caracterizaciones más rápidas y precisas de los sistemas moleculares que los actuales métodos de química informática.^{41,42}

DISEÑO DE NUEVOS MODELOS DE ENSAYOS CLÍNICOS

Las **tecnologías cuánticas pueden ser aplicadas para el diseño de nuevos modelos de ensayos clínicos, reduciendo los tiempos requeridos y mejorando los resultados en salud**. Por ejemplo, los sensores cuánticos aplicados en los *organ-on-a-chip* permiten generar un entorno biológico que simula el comportamiento natural de los órganos humanos para realizar los estudios de toxicología sin necesidad de recurrir a modelos animales. La elevada sensibilidad de los sensores, sumado a que requieren de muestras muy pequeñas, permiten realizar ensayos clínicos más eficientes y económicos, mejorando la calidad de los datos y acelerando el desarrollo de nuevos tratamientos y medicamentos.^{31,32,43}

Por otro lado, los nuevos avances en los sistemas y las herramientas informáticas con gran potencial computacional han permitido mejorar la estimación de los resultados de investigación. En los últimos años, se ha producido un

^hPrograma de Inteligencia Artificial que realiza predicciones de la estructura de las proteínas mediante el sistema de aprendizaje profundo (*deep learning*).

aumento en el uso de herramientas basadas en el método probabilístico de inferencia bayesiana^o en investigación. Los métodos bayesianos permiten actualizar continuamente la probabilidad de éxito de un tratamiento a medida que se recopilan nuevos datos durante el ensayo para la toma de decisiones basadas en probabilidad. A su vez, permiten ajustar el estudio en tiempo real, modificando aspectos como el tamaño de la muestra o la dosificación, entre otros, con el objetivo de mejorar la eficiencia y reducir los tiempos y los costes asociados al ensayo. La aplicación de la computación cuántica a las herramientas de análisis bayesiano existentes puede ayudar a acelerar el procesado de la información e incrementar la eficiencia en la búsqueda de soluciones. Estas capacidades no solo optimizan el tiempo y los recursos empleados, sino que proporcionan una estimación más rápida y precisa de los resultados y beneficios clínicos importantes.⁴⁴⁻⁴⁸

APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN LA PRÁCTICA CLÍNICA ASISTENCIAL

PREVENCIÓN Y PREDICCIÓN DE ENFERMEDADES

El desarrollo de nuevas herramientas y modelos predictivos usando computación cuántica abrirá nuevas posibilidades en la Medicina Preventiva y la Salud Pública de Precisión. Por ejemplo, gracias a los algoritmos cuánticos, se podrán analizar grandes cantidades de datos genómicos virales para entender mejor cómo evolucionan y se transmiten. Este análisis permitirá estudiar y construir árboles filogenéticos de virus, utilizando técnicas avanzadas de la teoría de la información^p. La información derivada del análisis facilitará el estudio de las relaciones evolutivas entre los virus y sus hospedadores, identificando patrones de mutaciones y recombinación genética que dan lugar a nuevas cepas. El entendimiento y la comprensión de estos procesos proporcionan información crucial para el establecimiento de estrategias para el desarrollo de planes de prevención.^{36,37}

DETECCIÓN TEMPRANA Y DIAGNÓSTICO DE ENFERMEDADES

El diagnóstico precoz y el abordaje temprano de las enfermedades resultan esenciales para la mejora de los

resultados en salud y la calidad de vida de los pacientes. Los avances tecnológicos y en la identificación de biomarcadores han permitido desarrollar herramientas de diagnóstico esenciales en la definición del abordaje terapéutico más adecuado para cada paciente. En este sentido, se están desarrollando distintas tecnologías cuánticas para ofrecer diagnósticos más precisos y tempranos.^{38,39}

DETECCIÓN DE BIOMARCADORES

Se está desarrollando la aplicación de los sensores cuánticos basados en diamantes NV para la detección de biomarcadores en células cancerígenas, como los biomarcadores oncológicos SKBR3 o HER2, o en células sanguíneas infectadas por el parásito *Plasmodium falciparum*, causante de la malaria. Para ello, se emplea un marcaje con nanopartículas magnéticas, que se unen de manera específica a los biomarcadores, permitiendo detectarlos con una elevada resolución.^{49,50}

En este sentido, se espera que, en la medicina del futuro, estos sensores se encuentren integrados en dispositivos *lab-on-chip*, anteriormente mencionados, y puedan encontrarse en los distintos puntos de atención sanitaria (*point-of-care testing*^q) o incluso en los hogares de la población, lo cual permitirá realizar diagnósticos más rápidos y precisos, así como realizar una monitorización de las enfermedades en tiempo real.^{31,32}

IMAGEN MÉDICA

Por otro lado, en el ámbito de la aplicación de sensores cuánticos en la imagen médica, se pueden utilizar sensores cuánticos basados en diamantes NV y en SQUID para mejorar tanto la resolución como la precisión. Este aumento de resolución permite ofrecer una visualización más detallada de tejidos y órganos, lo cual favorece una interpretación más precisa de las imágenes y facilita la detección temprana de patologías. Además, gracias a su capacidad para proporcionar resultados en tiempo real, estos sensores pueden ser especialmente útiles en cirugías guiadas por imágenes o en la monitorización de enfermedades.

En esta línea, se han producido enormes avances en el desarrollo de sensores basados en diamantes NV para el diagnóstico de patologías cardíacas, por medio de la cardiología magnética, que permite estudiar el origen y la

^oLa inferencia bayesiana es un método estadístico que permite actualizar la probabilidad de una hipótesis a medida que se dispone de nueva evidencia.

^pHerramientas matemáticas y computacionales que se utilizan para analizar y entender datos complejos, como secuencias de ADN y ARN, para encontrar patrones y relaciones entre ellos.

^qLaboratorios clínicos ubicados cerca de los espacios sanitarios de atención al paciente donde el paciente puede acudir para realizarse pruebas de laboratorio.



evolución de arritmias cardíacas, la fibrilación y la taquicardia, entre otras.⁵¹ Otro ejemplo son los sensores basados en SQUID, capaces de realizar mediciones de la actividad eléctrica del tracto gastrointestinal, a través de una técnica de diagnóstico denominada **magnetogastrografía**, y así detectar precozmente posibles patologías gástricas e intestinales, tales como los trastornos de motilidad o la obstrucción intestinal.¹³

Adicionalmente, en el campo de la **Neurología**, los sensores cuánticos se posicionan como herramientas de gran relevancia en el entendimiento y la detección precoz de enfermedades como el Parkinson o el Alzheimer que requieren de un mayor detalle. Por ejemplo, se está desarrollando una técnica denominada **magnetoencefalografía**, fundamentada en sensores basados en SQUID, capaz de identificar la actividad eléctrica generada entre las neuronas y observar los procesos dinámicos del cerebro con una elevada resolución y en tiempo real.⁵² Por otro lado, se están desarrollando técnicas no invasivas mediante sensores basados en diamantes NV para detectar y medir los campos magnéticos producidos por los cambios eléctricos generados por las neuronas durante la transmisión de información.⁵³ Si bien estas herramientas se están testando en animales, tienen el potencial de ofrecer métodos no invasivos y altamente precisos para la identificación de la actividad eléctrica cerebral. Esta línea de investigación puede ser útil para la comprensión del comportamiento neuronal, y por tanto para el desarrollo de técnicas de diagnóstico precoz de algunos trastornos neurológicos y psiquiátricos.^{13,53}

En el campo de la **Oncología**, se ha logrado un avance significativo con la introducción de técnicas de diagnóstico mejoradas que permiten una detección temprana del cáncer y una monitorización y seguimiento en tiempo real más precisos. Una de estas técnicas se basa en la hiperpolarización del líquido de contraste para mejorar las imágenes de las Resonancias Magnéticas (RM) actuales, permitiendo examinar los tumores a nivel metabólico. Esta técnica permite ampliar las propiedades magnéticas de algunos metabolitos, como el piruvato, que juegan un papel fundamental en la glucólisis de las células. Las células cancerosas suelen tener una tasa glucolítica elevada, superior a las células sanas, de manera que, al amplificar la señal de estos metabolitos, se puede detectar un aumento de la actividad metabólica, facilitando la identificación y caracterización de tumores. Esta técnica presenta ventajas significativas con

respecto a las técnicas diagnósticas tradicionales, ya que mide los cambios metabólicos en los tumores, los cuales se producen mucho antes que los cambios anatómicos, permitiendo un diagnóstico precoz de los tumores. Asimismo, permite obtener imágenes metabólicas en tiempo real, favoreciendo un mejor seguimiento y monitorización de la evolución de los tumores.⁵⁴

SOPORTE EN LA TOMA DE DECISIONES EN SALUD

La inferencia bayesiana se posiciona como una herramienta de soporte innovadora para la toma de decisiones en salud por parte de los profesionales sanitarios. Mejora la interpretación de los resultados de las pruebas médicas y permite predecir enfermedades con mayor precisión. Además, ayuda a definir tratamientos personalizados y más eficientes para cada paciente, basándose en la probabilidad de éxito del tratamiento según el perfil genético y clínico del paciente y su historial médico.⁴⁴⁻⁴⁷ En este sentido, **la computación cuántica permitirá mejorar las estimaciones realizadas por las herramientas de predicción y diagnóstico basadas en la inferencia bayesiana, ofreciendo una mayor precisión y exactitud de los resultados**. La aplicación de la inferencia bayesiana cuántica en la Medicina crítica permitirá analizar y comparar una cantidad ingente de datos de la salud (datos genómicos, transcriptómicos, epigenómicos, clínicos, y otros determinantes de la salud), en un periodo de tiempo muy reducido. Esto ayudará a los profesionales sanitarios a tomar decisiones rápidas y a reducir errores, mejorando así la atención al paciente.^{44-47,55}

TRATAMIENTO DE ENFERMEDADES

Además de la mejora del estudio de nuevas dianas moleculares y el diseño y desarrollo de nuevas terapias personalizadas y tratamientos farmacológicos, uno de los tratamientos que más se verá impactado gracias a las tecnologías cuánticas será la **radioterapia**. La radioterapia hace uso de ordenadores con gran capacidad computacional, capaces de analizar la información obtenida de imágenes médicas, como Tomografías Computarizadas (TC) o RMN, la ubicación y extensión del tumor, para definir con exactitud la posición del tumor.⁵⁶ Todo ello requiere de numerosas simulaciones precisas y complejas. En este sentido, la computación cuántica permitirá realizar múltiples simulaciones en paralelo, permitiendo la

elaboración de un plan terapéutico mucho más preciso y optimizando la dosis de radiación suministrada en un tiempo óptimo. Los avances producidos hasta la fecha se centran en la aplicación de la computación cuántica para el diseño de algoritmos de *machine learning*, como el algoritmo de túnel cuántico (QTA), que permitirán optimizar la planificación terapéutica y la precisión de los tratamientos, favoreciendo su adaptación a las necesidades de los pacientes.^{57,58}

APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN LA SEGURIDAD DEL ÁMBITO SANITARIO

Gracias a los avances tecnológicos producidos, en el ámbito de la salud, cada vez más se ha conseguido incorporar datos de diversas fuentes, ofreciendo una información que puede resultar de gran interés para los profesionales sanitarios, los investigadores, y especialmente, para los pacientes (*para ampliar la información ver el Informe Anticipando sobre [Los datos en la era de la Medicina Personalizada de Precisión](#)*).

Debido a la naturaleza de los datos de salud, es fundamental contar con mecanismos y sistemas de protección que garanticen el anonimato de los individuos, asegurando la confidencialidad, protección y privacidad de las personas en todo momento. Por ello, en un entorno sanitario cada vez más automatizado y digitalizado, es fundamental garantizar que la información, especialmente aquella relacionada con el paciente o con actuaciones sanitarias al paciente, es verídica y no ha sido vulnerada. En los últimos años, se han desarrollado nuevos mecanismos criptográficos con el objetivo de salvaguardar la seguridad de los datos en salud en aspectos relacionados con su almacenamiento, intercambio y análisis. En este sentido, la criptografía cuántica ofrece mecanismos de seguridad cuya implementación e integración en los sistemas de protección actuales podrían garantizar un entorno de datos completamente seguro.

ALMACENAMIENTO DE DATOS A LARGO PLAZO

Los avances tecnológicos y computacionales han permitido transformar la manera en la que se almacena

la información, pasando de registros físicos, almacenados en papel, a registros digitales, donde la información es almacenada en grandes repositorios de datos electrónicos. Además, en los últimos años, debido a la irrupción del *big data* y gracias al avance en las Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs), se ha podido observar una tendencia creciente en el uso de bases de datos y repositorios de datos basados en la nube. La generación masiva de datos de salud da lugar a la necesidad de garantizar la seguridad de su almacenamiento durante largos periodos de tiempo, así como establecer mecanismos que permitan el intercambio de información sin que sean vulnerados por agentes externos, salvaguardando la integridad y la veracidad de la información. Las tecnologías de QKD permitirán desarrollar bases de datos distribuidas⁵⁹ en distintas localizaciones, interconectadas por una red, garantizando la seguridad “absoluta” en el acceso e intercambio de información. Por medio de esta infraestructura cuántica y la generación de claves, se asegura la confidencialidad de los datos clínicos, de manera que únicamente se pueda acceder a ella o modificar por las partes integradas en la red.²⁸ Además, una de las mayores ventajas de esta tecnología es que, en caso de pérdida de información por algún fallo o ataque informático, es capaz de reconstruirse, recuperando y reestableciendo la información perdida.

ANÁLISIS DE DATOS MASIVOS

En el ámbito de la salud, la recolección, la generación y el análisis de los datos puede ser de gran relevancia para los investigadores, los profesionales sanitarios, y los pacientes. La disponibilidad y el análisis de estos datos ha contribuido en gran medida a la implementación de la Medicina Personalizada de Precisión. En esta línea, la QKD presenta un gran potencial en el campo del análisis masivo de datos. A través de esta técnica, se puede obtener información global sobre un conjunto de datos, suma de conjuntos parciales, sin que los propietarios de los conjuntos parciales tengan que revelar información sobre los mismos. De este modo se pueden crear, por ejemplo, árboles genómicos de manera colaborativa, sin que cada parte que entra en la colaboración tenga que revelar los suyos, pudiendo así o bien conservar la privacidad de sus fuentes o la propiedad intelectual de los mismos.⁵⁹



COMUNICACIONES MÉDICAS Y DISPOSITIVOS INTERCONECTADOS

En las últimas décadas, los avances producidos en las tecnologías médicas y el uso generalizado de los sistemas y herramientas de las TICs han transformado el campo de la salud. Las tecnologías de apoyo basadas en la Inteligencia Artificial y la automatización de algunas de las tareas clínicas están siendo cada vez más utilizados en la práctica clínica asistencial, ofreciendo soluciones más precisas y efectivas, adecuadas a las necesidades de las personas. Asimismo, se ha incrementado el uso de tecnologías participativas de salud digital, como las aplicaciones de salud o los *wearables*, junto con la tecnología del Internet de las Cosas (IoT), las cuales permiten a los usuarios disponer de información relacionada con su salud en tiempo real. Del mismo modo, el desarrollo de la telemedicina y la telemonitorización han permitido a los profesionales de la salud ofrecer la prestación de servicios a los usuarios en cualquier localización en la que se encuentre el usuario, favoreciendo el acceso a la atención sanitaria y reduciendo las barreras geográficas.

Todas estas tecnologías y nuevos modelos de atención sanitaria requieren una constante generación de datos y flujos de información. Sin embargo, los datos transmitidos pueden ser susceptibles de ser interceptados por diferentes agentes externos. En este sentido, **a través de tecnologías de criptografía cuántica se están desarrollando protocolos de comunicación cuántica en el ámbito de la salud capaces de verificar la identidad de un usuario o dispositivo antes de permitir el acceso a los datos o a los sistemas, evitando que agentes externos tenga acceso a los mismos.**⁶⁰ Además, cabe destacar que estos protocolos pueden ser integrados en las tecnologías médicas actuales, no siendo necesario que la propia tecnología sea de tipología cuántica. Concretamente se está estudiando la aplicación de un protocolo cuántico ya mencionado anteriormente, denominado protocolo BB84, en una red de sensores corporales inalámbricos utilizados para la monitorización sanitaria en remoto. Sus resultados demuestran que el enfoque ayuda a proteger de ataques los datos detectados que se transmiten a través de la red de sensores al profesional sanitario.⁶⁰

TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN LA MEDICINA DEL FUTURO





RETOS

Los grandes avances producidos en las tecnologías cuánticas en los últimos años permiten entrever el gran potencial en la Medicina del futuro. Sin embargo, todavía se encuentran en fases tempranas de su desarrollo, y el impacto que puede llegar a tener su aplicación en el campo de la salud no se podrá observar hasta dentro de varios años. Concretamente, se estima que la implementación de los sensores cuánticos, que conforman las tecnologías cuánticas más desarrolladas, ocurra en el corto plazo y en el caso de la criptografía cuántica, en el medio plazo. En el caso de la computación cuántica, su implantación en la práctica clínica todavía presenta desafíos, dado que esta tecnología se enfrenta a ruidos externos durante el procesamiento de la información, por lo que se prevé que tenga lugar a largo plazo. A continuación, se plantea una serie de retos técnicos, de implementación en la práctica clínica y en la formación y capacitación de los profesionales sanitarios que deben afrontarse durante los próximos años.

RETOS TÉCNICOS

A pesar de las grandes inversiones en curso y la rápida evolución producida hasta el momento, las tecnologías cuánticas todavía no disponen de la capacidad y el nivel tecnológico necesarios para su correcta implementación. Para poder aprovechar el potencial de las tecnologías cuánticas es necesario abordar algunos retos técnicos inherentes a sus propiedades de naturaleza cuántica.

- **La producción de errores de cálculo por la alteración de las propiedades cuánticas**, como la pérdida de la coherencia, el uso inexacto de cúbits o la interferencia del entorno, entre otros. No obstante, se están desarrollando y ya se dispone de algoritmos

y mecanismos de corrección de errores diseñados para mitigar y corregir las alteraciones en las propiedades cuánticas, asegurando una mayor precisión en los cálculos realizados por los ordenadores cuánticos.

- **La elevada sensibilidad de las tecnologías cuánticas a los cambios en el ambiente**. Las tecnologías cuánticas requieren condiciones específicas, como temperaturas criogénicas o cercanas a cero absoluto, niveles ultra-bajos de interferencia electromagnética, y evitar cualquier interferencia que pueda alterar las propiedades de las partículas y componentes cuánticos. Esta elevada sensibilidad hace necesario contar con infraestructuras complejas e instalaciones especializadas que permitan el buen funcionamiento de las tecnologías cuánticas. Sin embargo, se están produciendo avances significativos en el desarrollo de plataformas de computación cuántica capaces de operar a temperatura ambiente.
- **La dificultad en la escalabilidad de las tecnologías cuánticas**. Las tecnologías cuánticas son altamente sensibles y requieren de condiciones concretas y adecuadas que permitan mantener la coherencia cuántica y la corrección de errores. Por ello, ampliar los sistemas cuánticos, sin perder las propiedades cuánticas, resulta una tarea compleja y costosa. Este reto afecta concretamente a la computación cuántica, debido a la limitación a la hora de construir sistemas cuánticos que puedan manejar grandes cantidades de cúbits. Esto limita la capacidad de realizar cálculos complejos en un periodo de tiempo razonable y, por lo tanto, de abordar problemas complejos en áreas como la simulación molecular y el aprendizaje automático. Estas dificultades son objeto de estudio en la actualidad y dan lugar a continuas novedades.

RETOS DE IMPLEMENTACIÓN Y TRASLACIÓN A LA PRÁCTICA CLÍNICA ASISTENCIAL

En base al estado del arte y los avances tecnológicos producidos en el campo de las tecnologías cuánticas, se prevé que su implementación en la práctica clínica asistencial sea gradual con un marco temporal extendido.

- **La necesidad de realizar ensayos clínicos en humanos que demuestren la eficacia y la seguridad del uso de las tecnologías cuánticas.** Para su traslación a la práctica clínica, de esta tecnología y de cualquier otra, es necesario demostrar unos niveles mínimos de seguridad y eficacia. En el caso de las tecnologías cuánticas, al tratarse de tecnologías que se encuentran en etapas tempranas de su desarrollo, todavía no se dispone de resultados que demuestren su eficacia, viabilidad y seguridad en humanos. La mayoría de los ensayos clínicos y validaciones realizadas hasta la fecha se han realizado en animales, si bien se han comenzado los primeros ensayos clínicos en humanos para el desarrollo de algunos sensores cuánticos.
- **La elevada inversión económica en infraestructuras necesaria para el desarrollo y la implementación de tecnologías cuánticas en salud.** El mantenimiento y las necesidades de infraestructuras actuales de las tecnologías cuánticas implica un coste asociado que puede llegar a ser elevado. Esto dificulta la adopción de las tecnologías cuánticas en la práctica asistencial, y priorizar la aplicación de otras tecnologías alternativas disponibles. No obstante, se espera que, con el avance producido en el desarrollo de algunas de las terapias cuánticas, aumente el interés y la financiación de estas tecnologías, favoreciendo su traslación a la práctica clínica asistencial.

RETOS RELACIONADOS CON LA CAPACITACIÓN Y FORMACIÓN

Se prevé que las tecnologías cuánticas impacten significativamente la manera en la que se presta la atención sanitaria en la medicina del futuro. Pero, para garantizar su correcta implementación y uso adecuado, es crucial abordar una serie de retos relacionados con la capacitación y formación de los profesionales sanitarios.

- **La necesidad de incorporar profesionales especializados en el ámbito de las tecnologías cuánticas de la salud en los equipos médicos.** Para obtener una implementación exitosa de las tecnologías cuánticas en la Medicina del futuro, resulta fundamental contar con equipos multidisciplinares que incluyan profesionales de distintos ámbitos especializados en las tecnologías cuánticas (por ejemplo, físicos, matemáticos, ingenieros, etc.).
- **La ausencia de formación y capacitación de los profesionales sanitarios en el ámbito de la informática y la computación para la aplicación de las tecnologías cuánticas en salud.** La mayoría de los profesionales de la salud no cuentan con los conocimientos básicos o las habilidades específicas relacionadas con las tecnologías cuánticas (física clásica avanzada, física cuántica, programación, etc.) que les permitan aplicar estas tecnologías en la práctica asistencial, una vez se encuentren disponibles. Si bien no es necesario formar de manera generalizada a los profesionales sanitarios en este ámbito, el desarrollo de programas de formación y entrenamiento específicos que proporcionen las nociones básicas esenciales, para profesionales que vayan a aplicar estas tecnologías, garantizará la aplicación efectiva de las tecnologías cuánticas en un futuro.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Aunque aún se encuentran en etapas iniciales de desarrollo, **los recientes avances en el campo de las tecnologías cuánticas las posicionan como unas de las tecnologías emergentes con mayor potencial e impacto en la medicina del futuro.** Se prevé que su aplicación en el campo de la salud **revolucione la Medicina Personalizada de Precisión, mejorando la precisión y sensibilidad de diagnósticos, y permitiendo la detección y tratamiento precoz de enfermedades.** Además, abrirán **nuevas posibilidades para terapias más precisas y efectivas, facilitarán un monitoreo de salud continuo y personalizado, y permitirán la identificación de dianas moleculares y el desarrollo de nuevos fármacos.** También **optimizarán las redes de datos de salud, mejorarán la terapia genética con ediciones más precisas y seguras, y posibilitarán tratamientos médicos personalizados a nivel molecular.**

Sin embargo, a pesar de los grandes avances logrados, todavía existen numerosos desafíos para implementar estas tecnologías en el entorno sanitario. Por ello, con el fin de avanzar en la incorporación de estas nuevas herramientas en la medicina del futuro y su integración en el sistema sanitario, a continuación, se presentan una serie de recomendaciones que permitan abordar posibles limitaciones y barreras que se encuentren en el campo de las tecnologías cuánticas.

RECOMENDACIONES

- Impulsar desde la Administración **el desarrollo de una estrategia integral de Tecnologías Cuánticas,**

que establezca una visión común y líneas de actuación a corto y largo plazo para la integración de las tecnologías en el sistema de salud. Esta estrategia debe priorizar las aplicaciones con impacto inmediato, así como coordinar esfuerzos entre diversos actores, tales como el gobierno, la industria, el ámbito académico y los profesionales de la salud, entre otros.

- **Analizar las oportunidades de inversión y promover la financiación** de startups y empresas emergentes que están trabajando en la integración de tecnologías cuánticas en la medicina, por medio de incentivos y programas de apoyo financiero que fomenten la innovación y la aceleración del desarrollo de estas tecnologías.
- **Invertir en infraestructuras y recursos para desarrollar y aplicar tecnologías cuánticas en el sector salud,** incluyendo laboratorios avanzados, equipos hospitalarios mejorados y sistemas de datos robustos. Estas infraestructuras deben estar diseñadas para soportar las condiciones específicas que requieren las tecnologías cuánticas, como temperaturas criogénicas y ambientes libres de interferencias electromagnéticas.
- Promover el **desarrollo de proyectos piloto que prueben la escalabilidad en entornos controlados,** permitiendo la identificación y la resolución de problemas antes de una implementación a gran escala, asegurando así la viabilidad y la eficiencia de las soluciones cuánticas en el ámbito de la salud.
- **Promocionar la interdisciplinariedad y la colaboración entre profesionales especializados en**

TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN LA MEDICINA DEL FUTURO

distintos campos, como las tecnologías cuánticas, la biología, la medicina y otros ámbitos de la salud, para fomentar la generación de ideas innovadoras y la traslación de resultados a la práctica clínica asistencial.

- Desarrollar un **marco regulatorio que facilite la investigación y el uso de tecnologías cuánticas en la salud**, garantizando la seguridad y la ética en su aplicación. Este marco debe ser lo suficientemente flexible para adaptarse a los rápidos avances en el campo de la cuántica y realizar ensayos clínicos en humanos con mayor eficiencia, garantizando en todo momento su seguridad y eficacia.
- Impulsar **la atracción y la retención de talento especializado en tecnologías sanitarias**, a través de modelos de contratación y colaboración entre el ámbito empresarial y el académico, tanto de los sectores públicos y privados.
- Promover **la capacitación y la formación de los profesionales sanitarios en tecnologías cuánticas**, por medio de programas educativos específicos y cursos de formación continuada, para asegurar la actualización de conocimientos y la correcta aplicación de las tecnologías en la práctica clínica asistencial.



BIBLIOGRAFÍA

1. American Physical Society. (n.d.). The United Nations Proclaims 2025 as the International Year of Quantum Science and [Internet]. [citado el 5 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://www.aps.org/about/news/2024/06/united-nations-2025-iyq>
2. Banks M. It's official: United Nations declares 2025 the International Year of Quantum Science and Technology. Physics World. 2024 Jun 10. Disponible en: <https://physicsworld.com/a/its-official-united-nations-declares-2025-the-international-year-of-quantum-science-and-technology/>
3. UNESCO. Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuántica; 2024. <https://quantum2025.org/es/>
4. Freire N. 5 claves para entender la física cuántica. Natl Geogr; 2024. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/cinco-puntos-entender-fisica-cuantica_20763
5. Avagyan M. Resumen de la mecánica cuántica [Internet]. [citado el 1 de junio de 2024]. Disponible en: <https://escuelapce.com/resumen-de-la-mecanica-cuantica/>
6. Cox B, Forshaw J. El universo cuántico. Y por qué todo lo que puede suceder, sucede. Debate; 2011 <http://www.librosmaravillosos.com/eluniversocuantico/pdf/EI%20universo%20cuantico%20-%20Brian%20Cox%20y%20Jeff%20Forshaw.pdf>
7. Muy Interesant. Mundo Cuántico (Coleccionista, Vol. 25). Zinet; 2022. <https://suscripciones.zinetmedia.es/producto/mundo-cuantico-muy-interesante-digital-ed-coleccionista-no-25/>
8. Muy Interesante. Física Cuántica. Cómo el mundo subatómico moldea nuestra vida. (Coleccionista, Vol. 37). Zinet; 2024. <https://www.amazon.es/Interesante-Coleccionista-CU%C3%81NTICA-subat%C3%B3mico-nuestra-ebook/dp/B0D14TFWBJ>
9. Quantum Physics. [Internet]. n.d. [citado 1 ago 2024]. Disponible en: <https://sdsu-physics.org/physics180/physics180B/Topics/modern/phys180Bch28.html>
10. Álvarez-Nodarse R. Y las ondas se convirtieron en partículas [Internet]. 2019 abril 12 [citado el 21 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://institucional.us.es/blogimus/2019/04/y-las-ondas-se-convirtieron-en-particulas/>
11. Definición de sensor. (n.d.). Real Academia Española. Retrieved June 1, 2024, from <https://dle.rae.es/sensor>
12. Guo S. An Overview of NV Centers. J Appl Math Phys. 2023;11(11):3666-3675. <https://doi.org/10.4236/jamp.2023.1111231>
13. Fagaly RL. Superconducting quantum interference device instruments and applications. Rev Sci Instrum. 2006;77(10). <https://doi.org/10.1063/1.2354545>
14. What is quantum computing? (n.d.). IBM. Retrieved June 1, 2024, from <https://www.ibm.com/topics/quantum-computing>
15. Swayne M. What Is Quantum Computing? [Everything You Need To Know]. The Quantum Insider; 2024. <https://thequantuminsider.com/2024/02/02/what-is-quantum-computing/>
16. Ur Rasool R, Ahmad HF, Rafique W, Qayyum A, Qadir J, & Anwar Z. Quantum Computing for Healthcare: A Review. Future Internet. 2023;15(3):94. <https://doi.org/10.3390/fi15030094>
17. Nielsen MA, Chuang IL. Quantum computation and quantum information. 10th ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2010. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511976667>
18. Cirac JI, Zoller P. Quantum computations with cold trapped ions. Phys Rev Lett. 1995;74(20):4091-4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.4091>
19. Galindo A, Martín-Delgado MA. Information and computation: classical and quantum aspects. Rev Mod Phys. 2002;74(2):347-423. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.347>
20. Leibfried D, Blatt R, Monroe C, & Wineland D. Quantum dynamics of single trapped ions. Rev Mod Phys. 2003;75(1):281-324. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.281>
21. Vedral V. Introduction to Quantum Information Science. Oxford Graduate Texts; 2013.
22. Devoret MH, Martinis JM. Implementing Qubits with Superconducting Integrated Circuits. Quantum Inform Process. 2004;3(1-5):163-203. <https://doi.org/10.1007/s11128-004-3101-5>
23. Clarke J, Wilhelm FK. Superconducting quantum bits. Nature. 2008;453(7198):1031-42. <https://doi.org/10.1038/nature07128>

24. Saffman M, Walker TG, Mølmer K. Quantum information with Rydberg atoms. *Rev Mod Phys.* 2010;82(3):2313-63. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.2313>
25. Kaufman AM, Ni K-K. Quantum science with optical tweezer arrays of ultracold atoms and molecules. *Nat Phys.* 2021;17(12):1324-33. <https://doi.org/10.1038/s41567-021-01357-2>
26. IBM. (n.d.). ¿Qué es la criptografía? [Internet]. 2023 [citado el 21 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://www.ibm.com/es-es/topics/cryptography>
27. Gisin N, Ribordy G, Tittel W, Zbinden H. Quantum cryptography. *Rev Mod Phys.* 2002;74(1):145-95. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.145>
28. Martin V, Brito JP, Ortiz L, Mendez RB, Buruaga JS, Vicente RJ, et al. MadQCI: a heterogeneous and scalable SDN QKD network deployed in production facilities. 2023.
29. VSL. ¿Qué son los cables guía de ondas o waveguides? [Internet]. 2023 diciembre 15 [citado el 21 de octubre de 2024]. Disponible en https://silexst.com/cables-guia-de-ondas-o-waveguides/#Aplicaciones_en_Comunicaciones_de_Alta_Frecuencia
30. MadQCI. Madrid Quantum (MadQCI) [Internet]. 2023 [citado el 21 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://madqci.es/>
31. Allert RD, Bruckmaier F, Neuling NR, Freire-Moschovitis FA, Liu KS, Schrepel C, et al. Microfluidic quantum sensing platform for lab-on-a-chip applications. 2022.
32. Luz León E, Torrealba Anzola F. The lab-on-a-chip: aplicaciones existentes y desafíos futuros. *Rev Digital Investig Postgrado.* 2011;1(1):2244-8393. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3895312>
33. Cerrillo J, Casado SO, Prior J. Low field nano-NMR via three-level system control. *Phys Rev Lett.* 2020;126:220402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.220402>
34. Glenn DR, Bucher DB, Lee J, Lukin MD, Park H, Walsworth RL. High-resolution magnetic resonance spectroscopy using a solid-state spin sensor. *Nature.* 2018;555(7696):351-354. <https://doi.org/10.1038/nature25781>
35. Staudenmaier N, Vijayakumar-Sreeja A, Genov G, Cohen D, Findler C, Lang J, et al. Optimal sensing protocol for statistically polarized nano-NMR with NV centers. *Phys Rev Lett.* 2023;131:150801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.150801>
36. Sarkar A, Al-Ars Z, Bertels K. Estimating algorithmic information using quantum computing for genomics applications. *Appl Sci.* 2021;11(6):2696. <https://doi.org/10.3390/app11062696>
37. Flöther FF. The state of quantum computing applications in health and medicine. 2023. <https://doi.org/10.1017/qut.2023.4>
38. Vetter PJ, Marshall A, Genov GT, Weiss TF, Striegler N, Großmann EF, et al. Zero- and low-field sensing with nitrogen-vacancy centers. *Phys Rev Appl.* 2022;17(4):044028. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.17.044028>
39. Neugart F, Zappe A, Jelezko F, Tietz C, Boudou JP, Krueger A, et al. Dynamics of diamond nanoparticles in solution and cells. *Nano Lett.* 2007;7(12):3588-91. <https://doi.org/10.1021/nl0716303>
40. Casares PAM, Campos R, Martin-Delgado MA. QFold: quantum walks and deep learning to solve protein folding. *Quantum Sci Technol.* 2022;7(2):025013. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ac4f2f>
41. Cao Y, Romero J, Aspuru-Guzik A. Potential of quantum computing for drug discovery. *IBM J Res Dev.* 2018;62(6):6:1-20. <https://doi.org/10.1147/JRD.2018.2888987>
42. Yu S. Towards using quantum computing to speed up drug development [Internet]. Imperial; 2023 octubre 20 [citado el 21 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://www.imperial.ac.uk/news/248638/towards-using-quantum-computing-speed-drug/>
43. Chen X, Zhang YS, Zhang X, Liu C. Organ-on-a-chip platforms for accelerating the evaluation of nanomedicine. *Bioact Mater.* 2021;6(4):1012-1027. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.09.022>
44. Yarnell CJ, Granton JT, Tomlinson G. Bayesian analysis in critical care medicine. *Am J Respir Crit Care Med.* 2020;201(4):396-398. <https://doi.org/10.1164/rccm.201910-2019ED>



45. Henriquez RR, Korpi-Steiner N. Bayesian inference dilemma in medical decision-making: a need for user-friendly probabilistic reasoning tools. *Clin Chem*. 2016;62(9):1285-1286. <https://doi.org/10.1373/clinchem.2016.260935>
46. Campos R, Casares PAM, Martin-Delgado MA. Quantum Metropolis solver: a quantum walks approach to optimization problems. *Quantum Mach Intell*. 2023;5(2):28. <https://doi.org/10.1007/s42484-023-00119-y>
47. Escrig G, Campos R, Casares PAM, Martin-Delgado MA. Parameter estimation of gravitational waves with a quantum metropolis algorithm. *Class Quantum Gravity*. 2023;40(4):045001. <https://doi.org/10.1088/1361-6382/acafcf>
48. Lewis RJ, Wears RL. An introduction to the Bayesian analysis of clinical trials. *Ann Emerg Med*. 1993;22(8):1328-1336. [https://doi.org/10.1016/S0196-0644\(05\)80119-2](https://doi.org/10.1016/S0196-0644(05)80119-2)
49. Quantum diamond biomarker detection. *PhotonicsViews*. 2022;19(1):48-50. <https://doi.org/10.1002/phvs.202270107>
50. Glenn DR, Lee K, Park H, Weissleder R, Yacoby A, Lukin MD, Lee H, Walsworth RL, Connolly CB. Single-cell magnetic imaging using a quantum diamond microscope. *Nat Methods*. 2015;12(8):736-8. <https://doi.org/10.1038/nmeth.3449>
51. Arai K, Kuwahata A, Nishitani D, Fujisaki I, Matsuki R, Nishio Y, et al. Millimetre-scale magnetocardiography of living rats with thoracotomy. *Commun Phys*. 2022;5(1):200. <https://doi.org/10.1038/s42005-022-00978-0>
52. Cohen D. Magnetoencephalography: detection of the brain's electrical activity with a superconducting magnetometer. *Science*. 1972;175(4022):664-666. <https://doi.org/10.1126/science.175.4022.664>
53. Barry JF, Turner MJ, Schloss JM, Glenn DR, Song Y, Lukin MD, Park H, Walsworth RL. Optical magnetic detection of single-neuron action potentials using quantum defects in diamond. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2016;113(49):14133-8. <https://doi.org/10.1073/pnas.1601513113>
54. Larson PEZ, Gordon JW. Hyperpolarized metabolic MRI—acquisition, reconstruction, and analysis methods. *Metabolites*. 2021;11(6):386. <https://doi.org/10.3390/metabo11060386>
55. Escrig G, Campos R, Qi H, Martin-Delgado MA. Quantum Bayesian inference with renormalization for gravitational waves. 2024.
56. Instituto Nacional del Cáncer. Radioterapia para tratar el cáncer [Internet]. 2019 enero 8 [citado el 21 de octubre de 2024]. Disponible en: [https://www.cancer.gov/espanol/cancer/tratamiento/tipos/radioterapia#:~:text=Terapia%20de%20radiaci%C3%B3n%20\(tambi%C3%A9n%20llamada,dientes%20o%20de%20huesos%20fracturados](https://www.cancer.gov/espanol/cancer/tratamiento/tipos/radioterapia#:~:text=Terapia%20de%20radiaci%C3%B3n%20(tambi%C3%A9n%20llamada,dientes%20o%20de%20huesos%20fracturados)
57. Pakela JM, Tseng H-H, Matuszak MM, Ten Haken RK, McShan DL, El Naqa I. Quantum-inspired algorithm for radiotherapy planning optimization. *Med Phys*. 2020;47(1):5-18. <https://doi.org/10.1002/mp.13840>
58. Niraula D, Jamaluddin J, Matuszak MM, Ten Haken RK, El Naqa I. Quantum deep reinforcement learning for clinical decision support in oncology: application to adaptive radiotherapy. *Sci Rep*. 2021;11(1):23545. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02910-y>
59. Chan P, Lucio-Martinez I, Mo X, Simon C, Tittel W. Performing private database queries in a real-world environment using a quantum protocol. *Sci Rep*. 2014;4(1):5233. <https://doi.org/10.1038/srep05233>
60. Anusuya Devi V, Kalaivani V. Enhanced BB84 quantum cryptography protocol for secure communication in wireless body sensor networks for medical applications. *Pers Ubiquit Comput*. 2023;27(3):875-85. <https://doi.org/10.1007/s00779-021-01546-z>





Informe Anticipando
Microbioma



Informe Anticipando
Medicina Preventiva Personalizada



Informe Anticipando
Biología de sistemas

2018



Informe Anticipando
Bioimpresión



Informe Anticipando
Los datos en la era de la Medicina Personalizada de Precisión



Informe Anticipando
Ciencias ómicas

2019



Informe Anticipando
Terapias Avanzadas: Terapia celular y Terapia Génica



Informe Anticipando
Inteligencia Artificial: retos éticos y legales



Informe Anticipando
Exposoma

2020



Informe Anticipando
Farmacogenómica: el camino hacia la personalización del tratamiento



Informe Anticipando
Nanomedicina



Informe Anticipando
Epigenómica

2021



Informe Anticipando
Nucleoma 4D



Informe Anticipando
Radiómica



Informe Anticipando
Predicción de riesgo de enfermedad en poblaciones en la era de la Medicina Personalizada de Precisión

2022



Informe Anticipando
Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en Medicina Personalizada de Precisión



Informe Anticipando
Vacunas de Precisión



Informe Anticipando
Investigación Farmacológica en la era de la Medicina Personalizada de Precisión

2023



Informe Anticipando
Fenotipado de Precisión



Informe Anticipando
Tecnologías Cuánticas en la medicina del futuro

2024





