



Andalucía for Quantum

Libro Verde de la Estrategia Cuántica de Andalucía

 [FIDESOL]

Libro Verde de la Estrategia Cuántica de Andalucía

ISBN: 978-84-09-80330-9

Granada, España, Diciembre 2025

Editado por Fundación I+D Software Libre (FIDESOL)

Producido por QURECA

Creative Commons Attribution-Non Commercial-ShareAlike 4.0 International

Edición incentivada dentro de la Red QUORUM gracias a



**Financiado por
la Unión Europea**
NextGenerationEU



**Plan de Recuperación,
Transformación
y Resiliencia**



Andalucía for Quantum

Sumario

El Libro Verde de la Estrategia Cuántica de Andalucía establece la hoja de ruta para situar a la región como referente europeo en innovación y desarrollo de tecnologías cuánticas. Su propósito es definir una estrategia común que conecte la investigación científica, la industria, la formación de talento y la transferencia tecnológica, impulsando un ecosistema sólido, competitivo y sostenible.

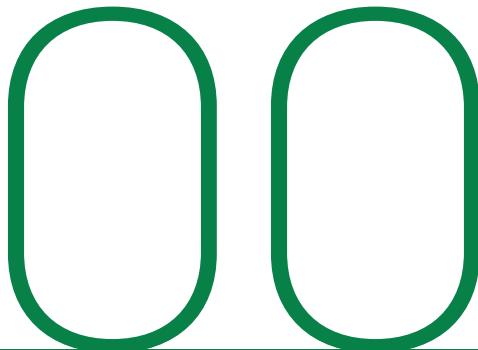
El documento parte de un diagnóstico del ecosistema actual andaluz y propone cuatro líneas estratégicas que actúan de manera complementaria: (i) Infraestructuras de primera categoría, que garanticen el acceso a laboratorios, recursos de supercomputación y capacidades de fabricación cuántica. (ii) Orquestación del ecosistema, mediante la creación del Andalucía Quantum Hub como nodo regional de coordinación, colaboración e impulso estratégico. (iii) Aceleración de la comercialización, destinada a favorecer el emprendimiento cuántico, la creación de startups y la transferencia de conocimiento hacia el mercado. (iv) Formación de personal, centrada en el desarrollo de una fuerza laboral "quantum ready" a través de educación, capacitación y atracción de talento internacional.

Con esta estrategia, Andalucía aspira a convertirse en una Zona Europea de Innovación Cuántica reconocida a nivel mundial, capaz de acelerar la transición de la ciencia a las aplicaciones reales y al éxito comercial, generando empleo cualificado y contribuyendo a la autonomía tecnológica de España y a la competitividad del continente en la nueva economía cuántica.

Índice

00. Motivación institucional de A4Q	06
0.1. La 2 ^a Revolución Cuántica y la necesidad de una respuesta andaluza	07
0.2. El papel de Andalucía en el nuevo mapa cuántico	07
0.3. Razones para un Libro Verde Sobre Tecnologías Cuánticas en Andalucía (A4Q)	08
0.4. El papel de FIDESOL como actor cuántico andaluz	08
0.5. Una apuesta para el alineamiento con las necesidades y oportunidades de Andalucía	09
01. Introducción	10
1.1. La primera y la segunda revolución cuántica	11
1.2. Los principios y fundamentos de las tecnologías cuánticas	12
1.2.1. La superposición cuántica	12
1.2.2. La medida y el colapso del estado	13
1.2.3. Interferencia cuántica	13
1.2.4. El entrelazamiento	14
1.2.5. El efecto túnel	15
02. Ámbitos de desarrollo de las tecnologías cuánticas	16
2.1. Computación y simulación cuánticas	17
2.2. Comunicación cuántica	19
2.3. Metrología cuántica	20
03. El ecosistema cuánticos	22
3.1. Ecosistema mundial	23
3.2. Ecosistema europeo	24
3.2.1. Ecosistema español	25
3.2.2. País Vasco	25
3.2.3. Cataluña	26
3.2.4. Galicia	26
3.2.5. Otras regiones	27

04. Diagnóstico estratégico del ecosistema cuántico andaluz	28
4.1. Posicionamiento actual de las tecnologías cuánticas en Andalucía	29
4.2. Potencial de Andalucía en tecnologías cuánticas	30
4.3. Casos de uso y aplicaciones estratégicas en Andalucía	32
4.4. Percepción y preparación actual de los agentes andaluces	33
05. Andalucía en un análisis estratégico global de las tecnologías cuánticas	34
5.1. Dinámicas tecnológicas y de mercado (2025–2035)	35
5.2. Riesgos estratégicos y desafíos globales	36
5.3. Oportunidades estratégicas para regiones emergentes	37
06. Estrategia cuántica de Andalucía	38
6.1. Visión, principios y objetivos generales	39
6.2. Líneas estratégicas	40
6.3. Sectores prioritarios de aplicación	42
6.4. Mecanismos de financiación y seguimiento	42
6.5. Marco Estratégico de la Estrategia Cuántica de Andalucía	43
07. Impacto esperado (2025–2035)	44
7.1. Hoja de Ruta para la estrategia cuántica de Andalucía	45



Motivación institucional de A4Q

FIDESOL asume el reto y la responsabilidad de la elaboración del Libro Verde de la Estrategia Cuántica de Andalucía desde la convicción de que la segunda revolución cuántica constituye un vector estructural de transformación económica, tecnológica y geopolítica para la próxima década, y de que las regiones y territorios que articulen a tiempo una visión propia podrán posicionarse como nodos relevantes en la nueva economía del conocimiento.

En este contexto, el Libro Verde se concibe como un instrumento de inteligencia estratégica que permite a Andalucía interpretar las dinámicas globales de las tecnologías cuánticas, diagnosticar con rigor su punto de partida y definir una hoja de ruta realista, pero ambiciosa, para integrarse en las principales iniciativas nacionales y europeas. Andalucía puede y debe ser partícipe y actor principal de la nueva era cuántica que se está dibujando en el plano mundial de desarrollo tecnológico, no dando la espalda a cambios de paradigma que transformarán a través de las tecnologías el modelo social y económico del planeta.

La posición de FIDESOL en este ejercicio responde tanto a su trayectoria profesional en la convergencia de tecnologías disruptivas

—inteligencia artificial, supercomputación, ciberseguridad, realidades extendidas y mixtas, etc.— como a su rol como miembro cofundador de la Red QUORUM de tecnologías cuánticas de España (www.quorumspain.eu), junto con los Centros Tecnológicos ITECAM, Gradiant, el CESGA y GAIN de Galicia y las empresas Fujitsu (Fsas) y QCentroid.

La responsabilidad de ser la única entidad andaluza de la Red QUORUM sitúa a FIDESOL como interlocutor cualificado entre el tejido científico, tecnológico y empresarial nacional y de forma más concreta y local, en nuestro contexto andaluz, ante los grandes desafíos de Europa, España y, por ende, Andalucía en el nuevo y actual contexto cuántico y todo ello gracias al apoyo del CDTI que fue quien valoró positivamente, creyó y concedió la financiación de la citada Red QUORUM.



0.1

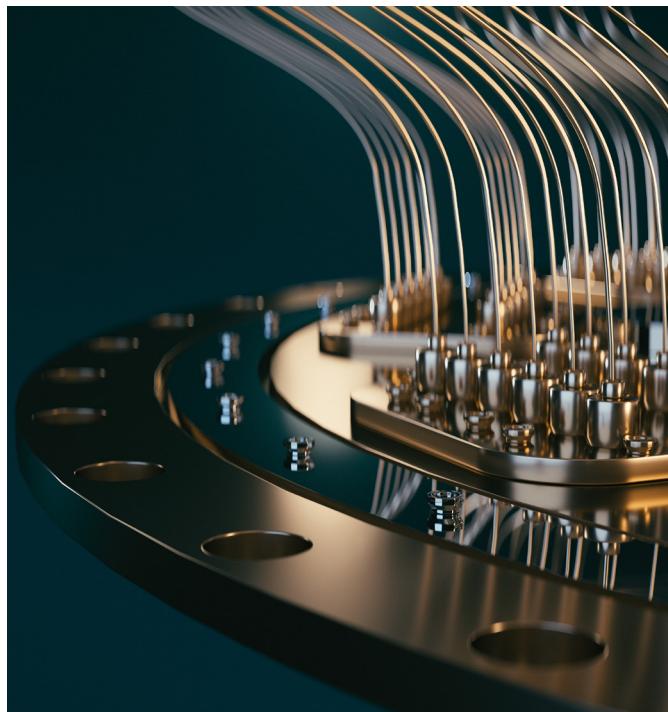
La 2^a Revolución Cuántica y la necesidad de una respuesta andaluza

La humanidad se encuentra en un punto de inflexión en el que los fenómenos cuánticos dejan de ser únicamente objeto de estudio para convertirse en un recurso tecnológico controlable, capaz de redefinir el cálculo, las comunicaciones, la sensórica y, en último término, la arquitectura misma de las infraestructuras digitales.

A diferencia de la 1^a Revolución Cuántica, que se materializó en tecnologías generalistas como el transistor, el láser o los circuitos integrados, la segunda revolución se articula en torno a tres grandes ámbitos: (i) computación y simulación cuánticas; (ii) comunicación y seguridad cuánticas y (iii) metrología y sensórica cuánticas, que impactan de forma directa en sectores críticos como la energía, la salud, la movilidad, la agroindustria, el ámbito aeroespacial o la defensa. Este carácter transversal y habilitador convierte a las tecnologías cuánticas, que muchas ocasiones las situamos en el futuro lejano, en una infraestructura actual y básica de cara a la próxima ola de innovación, comparable en su efecto sistémico a la inteligencia artificial o a las telecomunicaciones avanzadas.

En paralelo, las principales economías del mundo han situado la cuántica en el centro de sus estrategias de soberanía tecnológica. Iniciativas como el Quantum Flagship en la Unión Europea, los programas nacionales de Estados Unidos, China, Canadá o Reino Unido, así como las infraestructuras continentales de comunicación cuántica (EuroQCI) y supercomputación híbrida (EuroHPC), evidencian que el acceso preferente a capacidades cuánticas será un factor determinante de competitividad, seguridad y autonomía estratégica en el horizonte 2035.

En este contexto, resulta insuficiente que las regiones se limiten a ser usuarias pasivas de soluciones importadas y se hace necesario que definan un posicionamiento propio en la cadena de valor cuántica, alineado con sus especializaciones productivas y capacidades científicas, para no quedar relegadas a un papel periférico y contribuir, de esta manera, a la necesaria y anhelada soberanía tecnológica andaluza y nacional en nuestro contexto cooperativo europeo.



0.2

El papel de Andalucía en el nuevo mapa cuántico

El análisis comparado del ecosistema cuántico español muestra la emergencia de polos regionales que ya han dado pasos decisivos en esta dirección. El País Vasco se ha dotado de un centro de computación cuántica de referencia internacional en colaboración con IBM, además de una estrategia propia definida por Lantik para Bizkaia denominada BIQUAIN. Cataluña lidera la fotónica cuántica y las infraestructuras híbridas de supercomputación y computación cuántica, gracias a instituciones como IFCO y el Barcelona Supercomputing Center. Galicia ha desplegado el mayor sistema cuántico operativo en una institución pública del sur de Europa, articulando en torno a él un polo de tecnologías cuánticas con fuerte vocación aplicada, especialmente en el ámbito de las comunicaciones y sensórica cuántica, además de contar con el ordenador cuántico del CESGA llamado QMIO. Estos territorios han entendido que la cuántica no es únicamente un ámbito de investigación avanzada, sino una palanca concreta para reindustrializar, atraer inversión, generar talento y crear nuevas cadenas de valor en sectores estratégicos.

Frente a este escenario, Andalucía parte de una situación de paradoja dual. Por un lado, presenta una base científica robusta, una red universitaria consolidada y un tejido industrial diversificado en sectores como la aeronáutica, la química, la metalurgia, la agroindustria, la energía, la defensa o la salud, todos ellos especialmente sensibles a las ventajas que ofrecen la simulación de materiales, la optimización compleja o la sensórica de alta precisión. Por otro lado, su ecosistema cuántico se encuentra todavía en una fase emergente, con infraestructuras incipientes, masa crítica empresarial limitada y una ausencia de una estrategia específica que coordine esfuerzos y conecte de forma sistemática la región con las grandes iniciativas nacionales y europeas.

Este desajuste entre potencial estructural y madurez cuántica efectiva genera un riesgo claro: que Andalucía quede descolgada de los procesos de especialización que ya están consolidando otros territorios del estado, limitándose a adoptar de forma tardía tecnologías definidas en otros contextos y perdiendo capacidad de influencia en la definición de estándares, prioridades de financiación y cadenas de suministro. Precisamente para evitar este escenario, el Libro Verde propone una reflexión estratégica que permite a la región reconocer sus debilidades, movilizar sus fortalezas y articular un proyecto propio en la economía cuántica, en coherencia con la Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas y con la Agenda Digital y la Estrategia Andaluza de Inteligencia Artificial.

Para esto será fundamental la coordinación y el empuje de la Agencia Digital de Andalucía (ADA) dependiente de la Consejería de Industria, Energía y Minas de la Junta de Andalucía, para articular en una estrategia coherente a todos los agentes innovadores que apuesten por las tecnologías cuánticas en el ecosistema tecnológico andaluz y aquí FIDESOL será una entidad más del ecosistema que aportará su conocimiento y capacidades al servicio de la Andalucía.

0.3

Razones para un Libro Verde Sobre Tecnologías Cuánticas en Andalucía (A4Q)

El formato de Libro Verde responde a la necesidad de construir una visión compartida y participada antes de desplegar una estrategia operativa, entre todos los posibles actores implicados en su despliegue. Se apuesta por un documento de base que integra análisis comparados, el diagnóstico del ecosistema andaluz, la identificación de casos de uso prioritarios y las posibles propuestas de líneas estratégicas abiertas al contraste con administraciones, universidades, centros tecnológicos, empresas y agentes sociales y en especial con la administración autonómica competente, la Junta de Andalucía. Esta aproximación es coherente con la naturaleza aún emergente de la cuántica, donde la velocidad de cambio tecnológico y la incertidumbre sobre los modelos de negocio aconseja diseñar instrumentos flexibles, revisables y orientados al aprendizaje colectivo.

Además, el Libro Verde permite alinear esta reflexión andaluza con las grandes dinámicas europeas e internacionales. Al analizar el ecosistema mundial y europeo, el documento sitúa a Andalucía en un mapa de oportunidades y riesgos que trasciende las fronteras regionales, identificando los espacios de colaboración, de complementariedad y de especialización inteligente (especialmente con la Estrategia S4 andaluza) respecto de otros nodos cuánticos de España. Esta dimensión de inteligencia estratégica es esencial para orientar la captación de fondos competitivos, priorizar las inversiones en infraestructuras y la captación y la retención del talento (así como de su formación) y definir alianzas estables con actores líderes, evitando duplicidades y maximizando el impacto de los recursos en un modelo óptimo de colaboración público-privada.



0.4

El papel de FIDESOL como actor cuántico andaluz

El porqué de que el Centro Tecnológico FIDESOL impulse la redacción y definición del Libro Verde se fundamenta -además del compromiso adquirido en el marco de la Red QUORUM y con el CDTI- en su trayectoria como centro de investigación e innovación especializado en tecnologías digitales avanzadas y/o en tecnologías profundas –DeepTech tal como las definió la Nueva Agenda de Innovación Europea en 2022- y en su experiencia en el diseño de hojas de ruta de transformación digital para administraciones públicas y entidades y empresas de sectores empresariales e industriales.

La intensa participación de Fidesol en proyectos de inteligencia artificial, ciencia de datos, ciberseguridad, blockchain, tecnologías inmersivas, etc., le ha permitido desarrollar una visión sistémica de las convergencias tecnológicas que caracterizan la próxima década, en la que las tecnologías cuánticas se puedan integrar de forma natural con la IA, la ciberseguridad, las tecnologías de registro distribuido o las realidades extendidas para futuros gemelos digitales cuánticos. Este enfoque convergente facilita que el Libro Verde no trate la cuántica como un dominio aislado o con un modelo de silos, sino como un componente de una arquitectura digital más amplia que condicionará la competitividad de empresas y administraciones andaluzas.

A ello se suma la condición de FIDESOL como miembro cofundador de la Red QUORUM (ecosistema de innovación de tecnologías cuánticas de España), una iniciativa que agrupa a centros tecnológicos, administraciones y empresas comprometidas con la creación de un ecosistema cuántico nacional cohesionado y distribuido territorialmente, tal como se comentó con anterioridad.

Esta participación posiciona a FIDESOL como nodo de conexión entre las capacidades emergentes de Andalucía y los recursos, infraestructuras y comunidades de prácticas que se están articulando a escala estatal, permitiendo trasladar al Libro Verde una lectura actualizada de las tendencias en hardware, software, casos de uso y modelos de colaboración público-privada. Al mismo tiempo, dota a la región de un interlocutor reconocido en los foros donde se están definiendo prioridades de inversión y estándares tecnológicos, reforzando la voz andaluza en la gobernanza cuántica española.

Además desde enero de 2026, FIDESOL como integrante de la "Red de Excelencia Cervera QUIXOTE para la Investigación en Tecnologías Cuánticas para Infraestructura Experimental orientada a la Soberanía Tecnológica en entornos estratégicos", junto a los Centros Tecnológicos ITECAM, GRADIANT, LORTEK e i2CAT. Los Centros Tecnológicos que integramos esta red de investigación durante 3 años desarrollaremos estudios y prototipos en criptografía post-cuántica; el diseño de algoritmos de optimización adaptativa para maximizar el rendimiento de las redes de comunicaciones y sensores; la definición de arquitecturas y despliegues de comunicaciones cuánticas; el desarrollo de sensores y memorias cuánticas para redes de comunicación seguras; el diseño de protocolos híbridos y el desarrollo de fuentes de entrelazamiento y sensores.

Desde esta doble perspectiva, FIDESOL está en condiciones de desempeñar una función de bisagra entre la reflexión estratégica y la implementación práctica con casos de uso futuros en entornos operativos. Por un lado, puede traducir las necesidades y expectativas del tejido productivo andaluz en requisitos tecnológicos y líneas de investigación aplicadas y por

otro, puede acercar al entorno empresarial e institucional a las posibilidades reales y los límites de las tecnologías cuánticas en diferentes horizontes temporales (según los retos a solucionar), evitando tanto el tecno-optimismo como el escepticismo paralizante.

El resultado de esta visión compartida con los agentes andaluces es un Libro Verde que combina rigor científico-técnico, la comprensión de las dinámicas del mercado y la sensibilidad hacia las prioridades de desarrollo regional desde el alineamiento de la perspectiva institucional con las necesidades y realidades del mercado.

El Libro Verde se convierte así en una pieza clave de esta estrategia de vertebración, al ofrecer un marco conceptual y operativo compartido que facilita la alineación de iniciativas, la identificación de sinergias y la captura coordinada de oportunidades de financiación y colaboración y que se ofrece a la Agencia Digital de Andalucía (ADA) como punto de partida para elaborar una necesaria Estrategia Cuántica Andaluza, con el empuje institucional necesario para aglutinar al futuro ecosistema andaluz, y en relación con el ecosistema español y la futura Spanish Quantum Alliance.

La experiencia acumulada en QUORUM también refuerza la dimensión de transición "quantum-safe" que el Libro Verde asume como uno de sus ejes centrales. La amenaza que los futuros ordenadores cuánticos representan para los sistemas criptográficos actuales y, por tanto, para la seguridad de las infraestructuras críticas y de los datos sensibles, obliga a los territorios a planificar una migración ordenada hacia esquemas de criptografía post-cuántica y, cuando resulte pertinente, hacia redes de comunicación cuántica.

El objetivo de FIDESOL al coordinar la elaboración del Libro Verde (como documento inicial) no se limita a proporcionar un documento de análisis, sino a activar una dinámica de posicionamiento que permita construir un posicionamiento colectivo de todos los agentes del ecosistema que se construye sobre varios vectores complementarios: capacidad de análisis estratégico, experiencia en proyectos de I+D basados en tecnologías profundas, la participación en redes nacionales e internacionales y la conexión del entramado del tejido empresarial e institucional. Desde esta perspectiva, el Libro Verde funciona también como carta de presentación de un modelo capaz de traducir la complejidad cuántica en agendas concretas de innovación regional. Y queremos hacer valer también el valor que los centros tecnológicos andaluces tienen en la transferencia tecnológica al ecosistema de innovación andaluz, tal y como se viene reivindicando desde ACENTA, la Asociación de Centros Tecnológicos Andaluces.

En el plano operativo, FIDESOL aspira a desempeñar un rol activo y cooperativo, junto a la ADA y otros agentes cuánticos en la futura orquestación del ecosistema cuántico andaluz.

Aspirando a poner en marcha un Andalucía Quantum Hub, que despliegue lo que hemos denominado la Estrategia Andalucía 4 Quantum (A4Q) que a su vez ayude a desarrollar un Campus Andaluz de Tecnologías Cuánticas (con la colaboración de las universidades y los centros tecnológicos andaluces) y el lanzamiento de programas de aceleración y capital riesgo específicos para startups cuánticas (una oportunidad que no podemos dejar escapar).

Este Libro Verde permite avanzar un marco de referencia para estas iniciativas, identificando prioridades de inversión en infraestructuras, talento y casos de uso, así como mecanismos de gobernanza y seguimiento que garanticen la coherencia y continuidad de la estrategia.

0.5

Una apuesta para el alineamiento con las necesidades y oportunidades de Andalucía

El valor del Libro Verde radica también en su capacidad para traducir el discurso global sobre la cuántica en una agenda concreta para Andalucía, alineada con su estructura productiva, sus retos sociales y sus prioridades de políticas públicas. El diagnóstico del ecosistema andaluz identifica fortalezas claras –base científica, sectores industriales con alto potencial de aplicación, experiencia en digitalización y supercomputación, existencia de infraestructuras emergentes como el Espacio de Innovación en Tecnologías Exponenciales de Granada, dentro de ANIA–, pero también debilidades estructurales como la falta de talento especializado, la insuficiente inversión específica en cuántica o la escasa coordinación entre agentes. A partir de este análisis, el Libro Verde propone líneas de actuación que buscan no solo incrementar capacidades, sino también corregir desequilibrios y evitar la fragmentación de esfuerzos.

En este sentido, el Libro Verde incide en la necesidad de entender que la economía cuántica está profundamente anclada en la lógica de la especialización inteligente andaluza. La identificación de sectores prioritarios –energía y renovables, aeronáutica y aeroespacial, agroalimentario, industria química y metalúrgica, salud y biomedicina, defensa y ciberseguridad– responde a la voluntad de concentrar recursos en ámbitos donde la combinación de capacidades existentes y de las tecnologías cuánticas puede generar mayores retornos económicos y sociales. Esta selección no es arbitraria, sino el resultado de un análisis de casos de uso que muestra cómo la optimización cuántica, la simulación de materiales, la sensórica avanzada o la comunicación ultra segura pueden aportar ventajas competitivas tangibles a cadenas de valor ya presentes en Andalucía, más allá de los esfuerzos que se puedan realizar en el ámbito de la computación cuántica.

Finalmente, el Libro Verde incorpora una dimensión explícita de impacto temporal, proponiendo una hoja de ruta 2025-2035 que distingue entre fases de arranque, consolidación de infraestructuras y adopción industrial, con indicadores de seguimiento asociados a la inversión movilizada, los proyectos de I+D que se deben generar, el empleo especializado, la participación en redes europeas y el impacto en sectores estratégicos. Esta estructuración temporal facilita que la administración andaluza, el ecosistema científico-tecnológico y el tejido empresarial dispongan de un marco común para planificar sus decisiones, ajustar expectativas y coordinar recursos.

En suma, FIDESOL ofrece el Libro Verde de la Estrategia Cuántica de Andalucía porque la región se encuentra ante una oportunidad histórica de redefinir su posición en la economía del conocimiento, y porque su condición de miembro co-fundador de la Red QUORUM le otorga la capacidad y la responsabilidad de actuar como puente entre la visión nacional y la realidad andaluza. El documento aspira a sentar las bases de un ecosistema cuántico sólido, competitivo y sostenible, en el que FIDESOL se ofrece como agente para la articulación de infraestructuras, talento, proyectos y alianzas que permitan a Andalucía convertirse en un territorio protagonista de la segunda revolución cuántica en el sur de Europa, de la mano de la institución que tiene la potestad, el conocimiento estratégico y el marco presupuestario para llevarlo a cabo, la Agencia Digital de Andalucía de la Junta de Andalucía.

01

Introducción

La humanidad se encuentra ante un nuevo umbral tecnológico. Tras haber descifrado los fundamentos de la mecánica cuántica en el siglo XX —lo que permitió el desarrollo de gran parte de las tecnologías que definen nuestra vida actual— avanzamos ahora hacia una etapa en la que no solo comprendemos estos fenómenos, sino que somos capaces de controlarlos y diseñarlos como recurso. Esta transformación marca el inicio de la segunda revolución cuántica: un cambio profundo en la manera de procesar información, comunicarnos, obtener medidas de gran precisión y afrontar los grandes desafíos del siglo XXI.

Asumir este nuevo paradigma requiere comprender sus principios clave y reconocer su carácter estratégico. La capacidad de aprovechar las tecnologías cuánticas será determinante para impulsar la innovación, reforzar la competitividad económica y situar a regiones como Andalucía en una posición de liderazgo dentro de la economía del conocimiento del futuro.



1.1

La primera y la segunda revolución cuántica

La primera revolución cuántica, desarrollada a lo largo del siglo XX, transformó de forma radical nuestra comprensión de la naturaleza a escala atómica y dio origen a buena parte de las tecnologías que sustentan el mundo moderno. Los avances en mecánica cuántica posibilitaron el nacimiento de innovaciones esenciales para la vida contemporánea: el transistor, base de la electrónica y la informática; el láser, hoy imprescindible en las telecomunicaciones, la medicina y la industria; los circuitos integrados, que impulsaron la era digital; o la energía nuclear, que amplió las fronteras de la generación energética y la investigación científica. Aquella primera revolución no solo abrió nuevas vías de conocimiento, sino que proporcionó las herramientas que hicieron posible la sociedad tecnológica y digital actual.

Hoy asistimos a la segunda revolución cuántica, un nuevo salto de magnitud comparable, impulsado por la capacidad de manipular y controlar directamente los fenómenos cuánticos fundamentales —como la superposición, el entrelazamiento, el efecto túnel o la interferencia— individualmente. A diferencia de la primera, esta nueva revolución no se limita a aplicar los principios cuánticos, sino que los utiliza activamente como recurso tecnológico. De este modo, surgen dispositivos y sistemas con prestaciones que trascienden las limitaciones de la física clásica: ordenadores cuánticos capaces de resolver problemas imposibles para la computación convencional, sensores de precisión extrema, sistemas de comunicación inviolables y simuladores cuánticos que reproducen el comportamiento de la materia con un grado de exactitud sin precedentes.

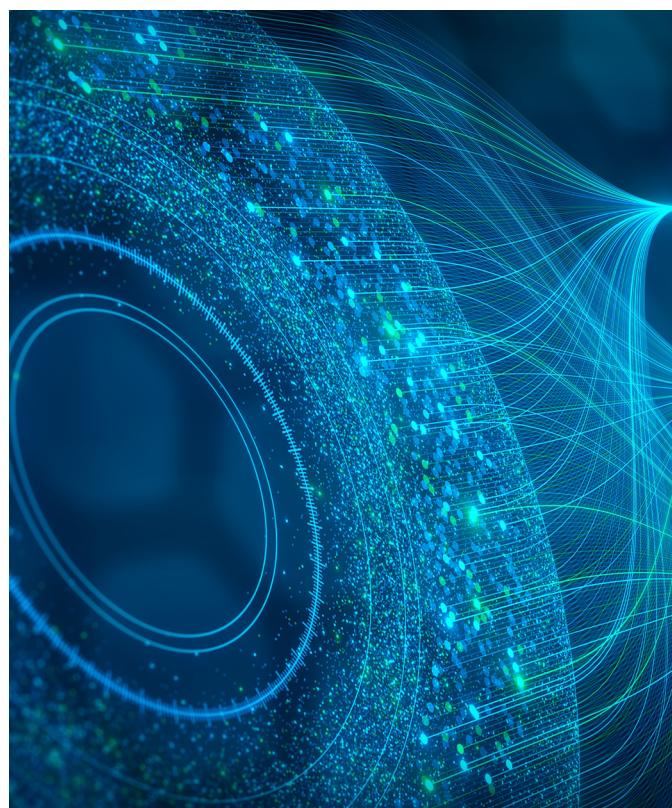
La magnitud de esta transformación ha llevado a las principales economías del mundo a reconocer el carácter estratégico de las tecnologías cuánticas, destinando inversiones crecientes a su desarrollo. Programas como el Quantum Flagship de la Unión Europea¹, el National Quantum Programme del Reino Unido², la National Quantum Initiative de Estados Unidos³ o las estrategias nacionales de China y Canadá⁴ reflejan una apuesta global por liderar esta transición. En el ámbito europeo, se avanza hacia la construcción de una infraestructura continental de comunicación cuántica (EuroQCI⁵, Quantum Internet Alliance⁶) y una red de supercomputación híbrida que integrará procesadores cuánticos (EuroHPC⁷), pilares ambos de la futura soberanía tecnológica de la Unión.

En este contexto, España ha iniciado también su propio camino mediante la Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas

2025–2030⁸, que articula un marco común de coordinación entre administraciones, centros de investigación y empresas. Paralelamente, diversas regiones —como Cataluña, Galicia o el País Vasco— están consolidando polos de innovación cuántica que refuerzan un ecosistema nacional basado en la excelencia científica y la transferencia tecnológica.

En este escenario, Andalucía debe prepararse para integrarse plenamente en la segunda revolución cuántica. La comunidad cuenta con una base científica sólida, un tejido industrial diversificado y en expansión, y una red universitaria de alto nivel, pero necesita dar un paso decisivo hacia la adopción, desarrollo y aplicación de las tecnologías cuánticas como motor de competitividad. Sectores estratégicos como la energía, la salud, el agroalimentario, el aeroespacial, la logística o las tecnologías de la información pueden beneficiarse de manera directa, mejorando la eficiencia de los procesos, reduciendo costes, impulsando la sostenibilidad y generando empleo altamente cualificado.

Con esta visión, la Estrategia Cuántica de Andalucía se concibe como una hoja de ruta integral para guiar la transición de la región hacia la economía cuántica. Este Libro Verde ofrece un análisis del contexto científico y tecnológico actual, identifica los retos y oportunidades específicos para Andalucía y define las líneas estratégicas y acciones prioritarias que permitirán a la región posicionarse como referente en innovación cuántica en el sur de Europa, contribuyendo al liderazgo científico, económico y tecnológico de España y de la Unión Europea en esta nueva era.



1. European Quantum Flagship <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship>

2. National Quantum Programme Reino Unido: <https://uqnqt.ukri.org>

3. National Quantum Initiative USA: <https://www.quantum.gov>

4. National Quantum Strategy Canada: <https://ised-isde.canada.ca/site/national-quantum-strategy/en/canadas-national-quantum-strategy>

5. EuroQCI: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/es/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>

6. Quantum Internet Alliance: <https://quantuminternetalliance.org>

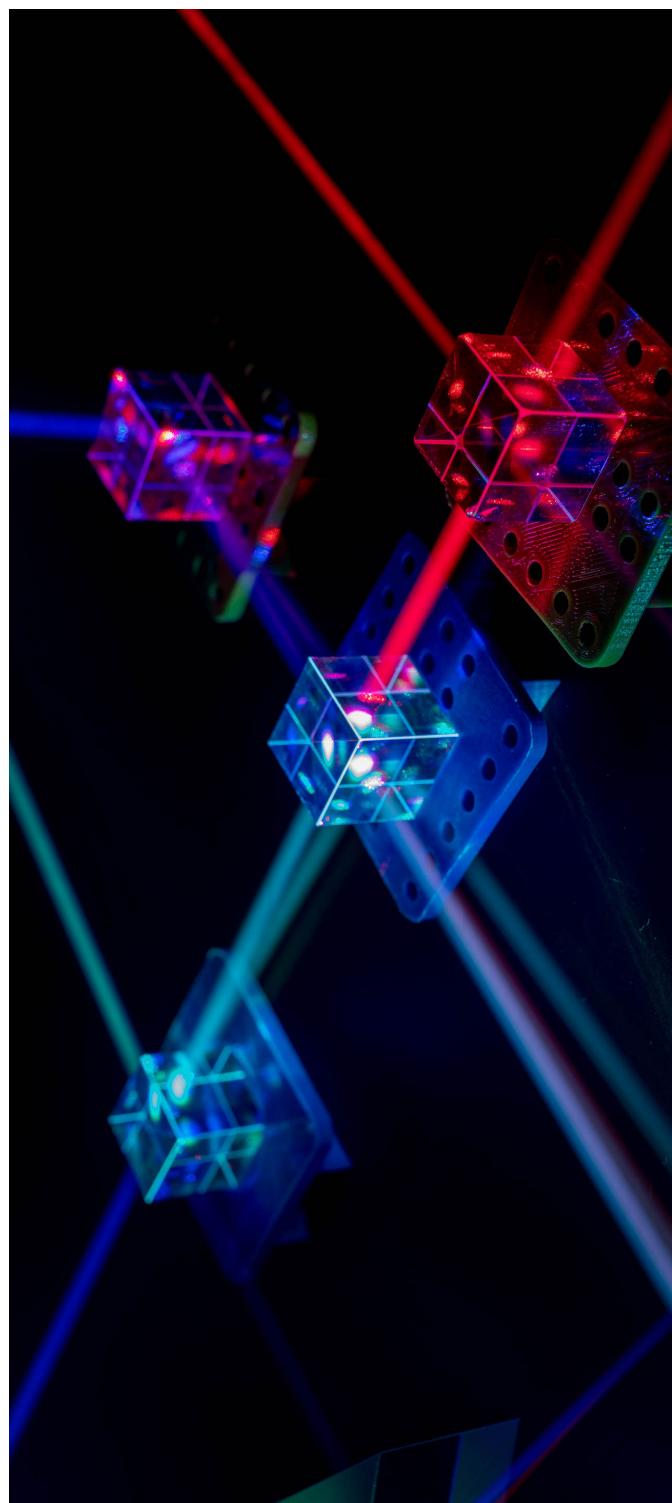
7. EuroHPC: https://www.eurohpc-ju.europa.eu/index_en

8. Estrategia de tecnologías cuánticas de España: <https://digital.gob.es/content/dam/portal-mtdfp/carruselhome/Estrategia%20Tecnologias%20Cuanticas.pdf>

1.2

Los principios y fundamentos de las tecnologías cuánticas

Las tecnologías cuánticas se basan en los principios de la mecánica cuántica, la rama de la física que describe el comportamiento de la materia y la energía a escalas extremadamente pequeñas, donde las leyes clásicas no aplican. En este dominio —el de los átomos, electrones y fotones— la naturaleza se comporta de manera radicalmente diferente a nuestra experiencia cotidiana. Comprender estos principios es esencial para entender cómo funcionan las nuevas tecnologías que darán forma a la segunda revolución cuántica.



1.2.1

La superposición cuántica

En el mundo cuántico, el acto de medir no es un proceso neutro. Cuando un sistema se encuentra en superposición, representa múltiples posibilidades a la vez; pero en el momento de la medición, el sistema colapsa y adopta un solo valor concreto. La medición no solo revela una propiedad del sistema, sino que la determina, destruyendo la superposición.

Este fenómeno, conocido como colapso del estado, es fundamental para comprender tanto las limitaciones como el potencial de las tecnologías cuánticas. La medida es a la vez un obstáculo —porque rompe los fenómenos cuánticos— y una herramienta. Buena parte del desarrollo tecnológico actual se centra precisamente en controlar cuándo y cómo medir, de modo que la información cuántica se preserve el máximo tiempo posible.



Ilustración 1.
Superposición

De este principio surge el concepto central de las tecnologías cuánticas: el cúbit. Del mismo modo que el bit es la unidad básica de información clásica, el cúbit es la unidad fundamental de la información cuántica. Un cúbit puede encontrarse en una superposición de los estados "0" y "1", lo que permite representar y procesar de manera paralela un enorme número de combinaciones posibles.

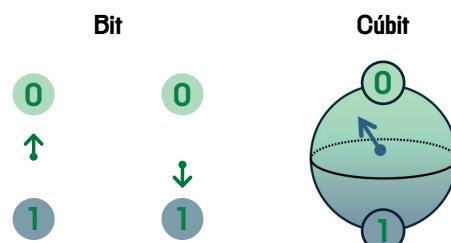


Ilustración 2.
El bit solo puede tomar dos valores 0 y 1, en cambio el cúbit puede existir en cualquier superposición de 0 y 1.

1.2.2

La medida y el colapso del estado

En el mundo cuántico, el acto de medir no es un proceso neutro. Cuando un sistema se encuentra en superposición, representa múltiples posibilidades a la vez; pero en el momento de la medición, el sistema colapsa y adopta un solo valor concreto. La medición no solo revela una propiedad del sistema, sino que la determina, destruyendo la superposición.

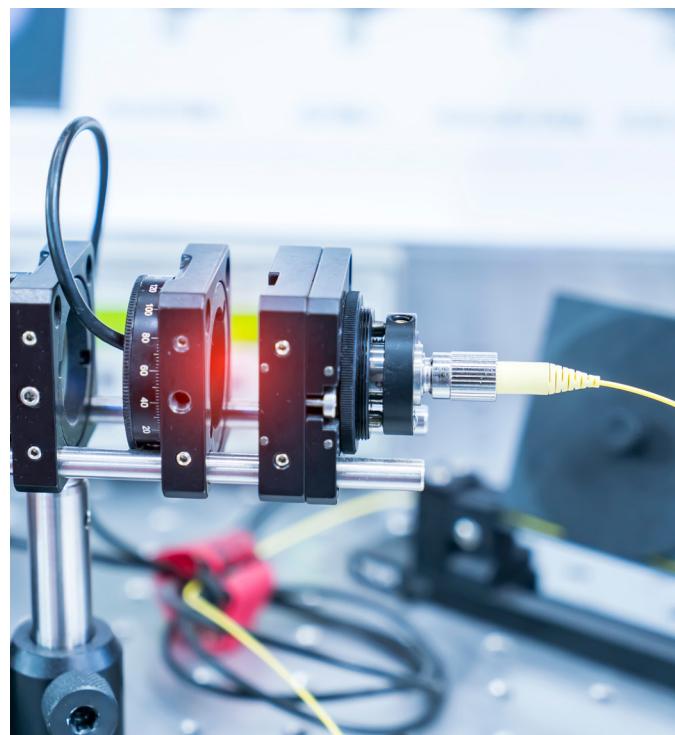
Este fenómeno, conocido como colapso del estado, es fundamental para comprender tanto las limitaciones como el potencial de las tecnologías cuánticas. La medida es a la vez un obstáculo —porque rompe los fenómenos cuánticos— y una herramienta. Buena parte del desarrollo tecnológico actual se centra precisamente en controlar cuándo y cómo medir, de modo que la información cuántica se preserve el máximo tiempo posible.

1.2.3

Interferencia cuántica

La interferencia cuántica describe cómo las diferentes posibilidades que tiene un sistema cuántico pueden superponerse y combinarse entre sí, de manera que unas se amplifican mientras otras se anulan. A diferencia de lo que ocurre en la física clásica, donde los objetos siguen trayectorias definidas, en el mundo cuántico las partículas pueden recorrer simultáneamente varios caminos posibles, y el resultado observable depende de cómo esas trayectorias se combinan.

La interferencia permite que un sistema cuántico no evolucione siguiendo una única secuencia de eventos, sino a través de la coexistencia de múltiples alternativas, cada una con un peso distinto. Cuando las probabilidades se combinan, el resultado final no es la simple suma de opciones, sino una distribución completamente nueva, fruto de la interacción entre todas ellas.



Esta propiedad confiere a los sistemas cuánticos una flexibilidad única: su estado no se define por un valor concreto, sino por la relación entre muchos posibles valores. Gracias a la interferencia, la mecánica cuántica no solo describe cómo se comporta la materia a escala microscópica, sino cómo las distintas posibilidades pueden cooperar o competir entre sí antes de que una medición seleccione el resultado definitivo. En términos más amplios, la interferencia cuántica representa la capacidad fundamental de la naturaleza para procesar información a través de la superposición de posibilidades. Es el principio que convierte a la física cuántica en un marco dinámico, donde los resultados observables emergen no de una única causa, sino del equilibrio entre múltiples caminos posibles.

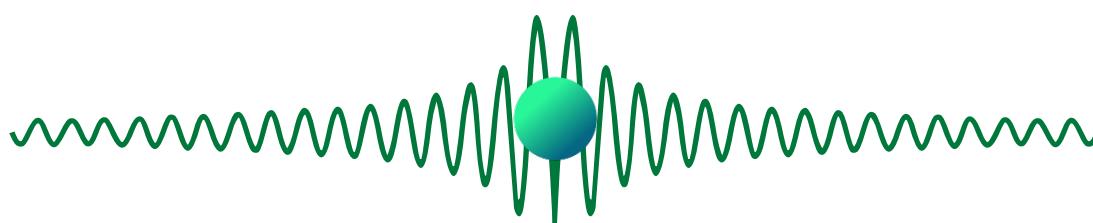


Ilustración 3.
Las partículas cuánticas pueden comportarse tanto como partículas (objetos localizados) como ondas simultáneamente.

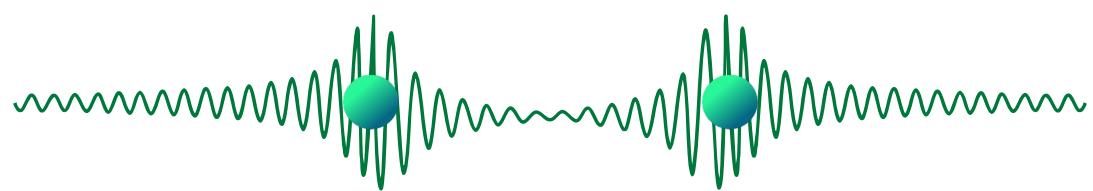


Ilustración 4.
Dos partículas cuánticas interactuando. Sus ondas interfieren aplicándose o cancelándose en diferentes puntos del espacio.

1.2.4**El entrelazamiento**

El entrelazamiento cuántico es uno de los fenómenos más sorprendentes y potentes de la física moderna. Ocurre cuando dos o más partículas comparten un estado común de forma inseparable: no podemos describir una partícula sin las demás, sin importar la distancia que las separe. A su vez, cuando una partícula entrelazada colapsa, las otras responden instantáneamente.



Ilustración 5.
Dos partículas entrelazadas comparten el mismo estado.

Múltiples cúbits pueden entrelazarse formando un sistema conjunto cuya descripción crece exponencialmente con su tamaño. Este crecimiento exponencial muestra la fuente del poder de la computación que tienen los sistemas cuánticos: mientras que un ordenador clásico necesita representar cada combinación posible una a una, un sistema cuántico de muchos cúbits puede representarlas todas simultáneamente en un solo estado físico.

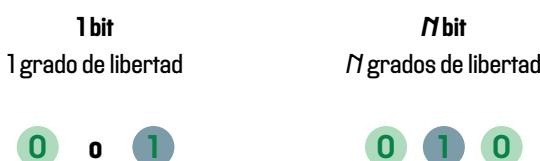
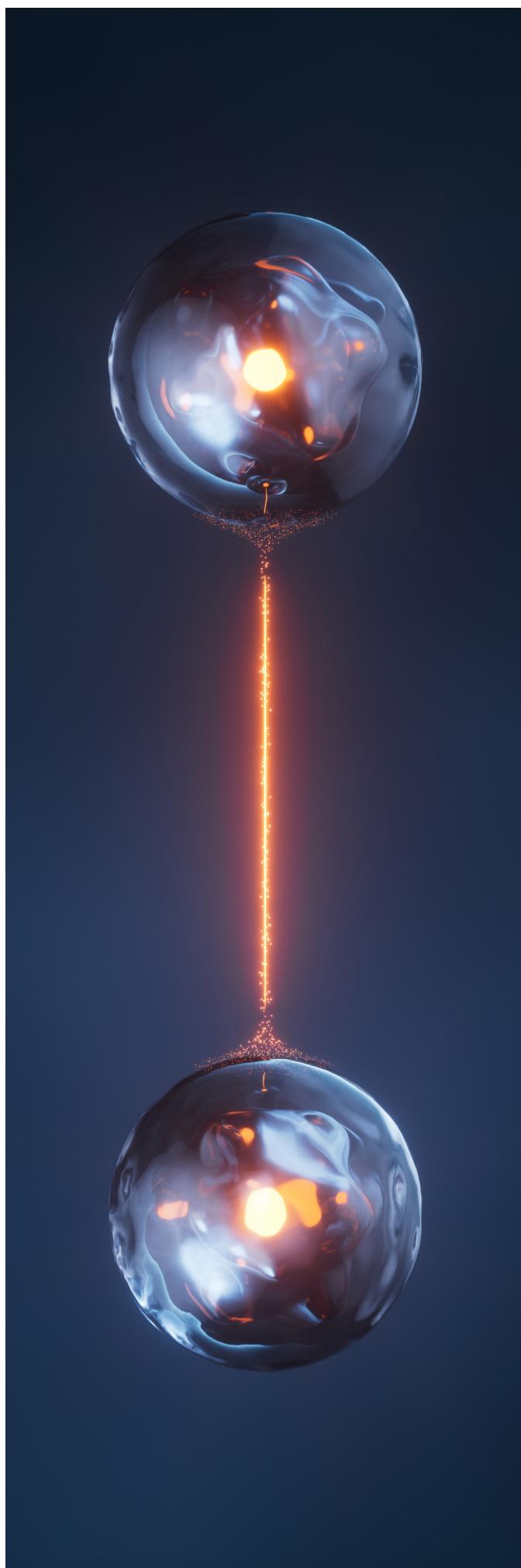


Ilustración 6.
Para describir el estado de N bits hay que especificar el valor de cada uno de ellos (N grados de libertad).

1 cúbít	n cúbít
2 grados de libertad $\{a_0, a_1\}$	2^n grados de libertad $\{a_{ijk}\}$
a_0 0	a_{000} 0 0 0
$+ a_1$ 1	$+ a_{001}$ 0 0 1
	$+ a_{010}$ 0 1 0
	$+ a_{011}$ 0 1 1
	$+ a_{100}$ 1 0 0
	$+ a_{101}$ 1 0 1
	$+ a_{110}$ 1 1 0
	$+ a_{111}$ 1 1 1

Ilustración 7.
Para describir el estado de N cúbits entrelazados, hay que proporcionar la amplitud (a_{ijk}) de cada una de las posibles configuraciones (2^N grados de libertad).



1.2.5

El efecto túnel

Otro fenómeno clave de la física cuántica es el efecto túnel. En la física clásica, una partícula no puede atravesar una barrera si no tiene la energía suficiente para superarla. Sin embargo, en el mundo cuántico, las partículas tienen una probabilidad muy pequeña pero no nula de ser halladas al otro lado de la barrera.

Este efecto tiene aplicaciones directas tanto en dispositivos electrónicos (como los diodos túnel o las memorias flash) como en tecnologías cuánticas avanzadas. En computación cuántica, por ejemplo, ciertos algoritmos aprovechan el efecto túnel para explorar de forma más eficiente los espacios de soluciones, saltando entre configuraciones sin necesidad de recorrer todas las posibilidades intermedias.

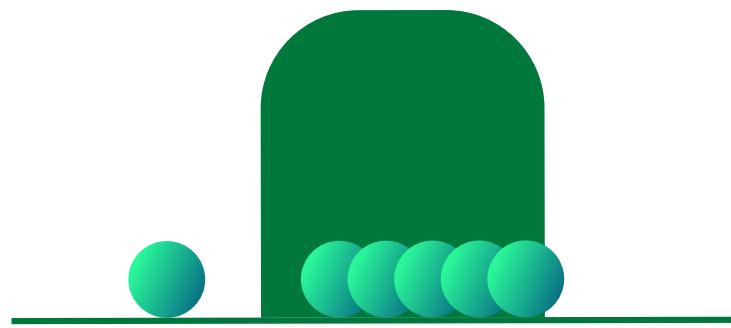


Ilustración 8.
El efecto túnel es un fenómeno cuántico en el que una partícula puede atravesar una barrera de potencial aunque no tenga suficiente energía para superarla.

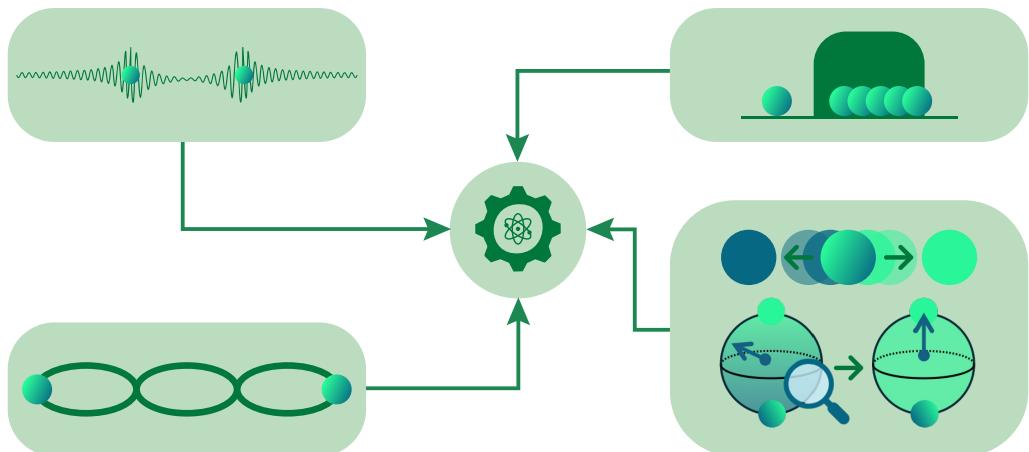


Ilustración 9.
Las tecnologías cuánticas se caracterizan por aprovechar los fenómenos propios de la mecánica cuántica para funcionar.

02

Ámbitos de desarrollo de las tecnologías cuánticas

El conjunto de tecnologías que conforman la segunda revolución cuántica puede organizarse en torno a tres grandes ramas o ámbitos de desarrollo, que comparten principios comunes, pero persiguen objetivos tecnológicos distintos: la computación y simulación cuántica, la comunicación y seguridad cuántica, y la metrología cuántica. Cada una de ellas explora una forma diferente de manipular los fenómenos cuánticos –superposición, entrelazamiento, o efecto túnel– para resolver problemas complejos, realizar mediciones con altísima precisión o transmitir información de manera segura.

Estas ramas no son compartimentos estancos: se retroalimentan entre sí y, en conjunto, constituyen la base de una nueva infraestructura científica y tecnológica que transformará la economía global y los sistemas de conocimiento.



Ilustración 10.
Las tecnologías cuánticas de segunda generación..

2.1

Computación y simulación cuánticas

La computación y la simulación cuántica engloban un conjunto de tecnologías diseñadas para abordar problemas de cálculo y modelado que resultan inabordables o extremadamente costosos para los superordenadores actuales. Sus principales ventajas se encuentran en la optimización de procesos complejos (por ejemplo, en logística, finanzas o energía), la aceleración del descubrimiento de nuevos materiales y fármacos mediante simulaciones más precisas, y la posibilidad de mejorar modelos de inteligencia artificial y análisis de grandes volúmenes de datos. Estas capacidades permiten reducir tiempos y costes de investigación, explorar espacios de diseño mucho más amplios y apoyar decisiones estratégicas en sectores críticos con un nivel de detalle y eficiencia sin precedentes.

Principios de funcionamiento

La computación cuántica es uno de los ámbitos más disruptivos de la segunda revolución cuántica. Su objetivo es aprovechar las propiedades fundamentales de la mecánica cuántica —como la superposición, el entrelazamiento y la interferencia— para procesar información de un modo radicalmente diferente al de la computación clásica. No se trata de sustituir a los ordenadores actuales, sino de complementarlos en aquellas tareas donde los métodos tradicionales alcanzan sus límites, como la optimización de redes, la simulación de materiales o la resolución de problemas matemáticos de enorme escala.

A diferencia de los procesadores convencionales, que manipulan bits capaces de representar únicamente un valor (cero o uno), los ordenadores cuánticos trabajan con cúbits, unidades de información que pueden encontrarse en múltiples estados de manera simultánea gracias a la superposición. Cuando varios cúbits se entrelazan entre sí, las posibilidades combinatorias del sistema crecen de forma exponencial, lo que permite representar y explorar al mismo tiempo una cantidad inmensa de configuraciones posibles.

Aplicaciones e impacto

Este nuevo paradigma de cálculo ofrece ventajas sustanciales en aquellos problemas donde la computación clásica se vuelve ineficiente. Existen algoritmos cuánticos que permiten resolver con mucha mayor eficiencia ciertos problemas de búsqueda, identificando soluciones dentro de conjuntos de datos masivos con un número significativamente menor de operaciones. También resultan idóneos para problemas de optimización complejos, como la planificación de rutas, la gestión de redes logísticas o la asignación de recursos, donde deben evaluarse millones de configuraciones posibles para seleccionar la mejor.

Otra de sus aplicaciones clave se encuentra en el ámbito de la ciberseguridad y la criptografía, ya que una computadora cuántica plenamente funcional podría comprometer los sistemas de encriptación actuales. Este riesgo ha impulsado el desarrollo de nuevas formas de criptografía postcuántica, resistentes a este tipo de ataques.

Asimismo, la computación cuántica ofrece ventajas en el tratamiento de datos y en la implementación de modelos de inteligencia. Aunque los sistemas cuánticos no permiten

directamente gestionar grandes volúmenes de datos de forma convencional, su capacidad computacional para procesar correlaciones abre la puerta a nuevos enfoques en aprendizaje automático, análisis predictivo y reconocimiento de patrones. Entre las aplicaciones más prometedoras de la computación cuántica destaca la simulación cuántica, cuyo propósito es emplear sistemas cuánticos altamente controlables para reproducir y estudiar el comportamiento de otros sistemas cuánticos complejos que resultan imposibles de modelar con medios clásicos.

En numerosos ámbitos de la ciencia y la ingeniería —como la física de materiales, la química, la biología o la energía— los fenómenos que determinan las propiedades de la materia se rigen por interacciones cuánticas que crecen en complejidad de manera exponencial. Incluso los superordenadores más potentes no pueden representar con exactitud el comportamiento de más de unas pocas decenas de átomos. Los ordenadores cuánticos permiten abordar este desafío, utilizando sus cúbits para representar directamente los estados cuánticos del sistema a estudiar y simular sus dinámicas desde los primeros principios de la física.

Este enfoque permite explorar procesos físicos y químicos fundamentales: cómo se comportan los electrones en materiales superconductores, cómo se forman y rompen enlaces moleculares, o cómo se transfieren la energía y la información en sistemas biológicos. También abre nuevas posibilidades para el diseño racional de materiales, catalizadores y fármacos, así como para optimizar reacciones químicas y procesos de conversión y almacenamiento de energía.

En su forma más especializada, la simulación cuántica puede realizarse también mediante sistemas físicos diseñados específicamente para emular modelos cuánticos concretos, sin necesidad de un ordenador cuántico universal ni de ejecutar algoritmos complejos. Estos dispositivos —desarrollados en laboratorios de investigación— ofrecen resultados prácticos en escalas más reducidas y constituyen una puerta de entrada inmediata a las aplicaciones científicas e industriales de la segunda revolución cuántica. Además, sirven como plataformas experimentales para validar técnicas de control y arquitecturas que serán esenciales para los procesadores cuánticos del futuro.

En conjunto, las capacidades de la computación cuántica —desde la simulación de sistemas cuánticos hasta la optimización, la inteligencia artificial o la ciberseguridad— apuntan a un potencial transformador en sectores tan diversos como la energía, las finanzas, la logística, la salud o la industria farmacéutica. No obstante, el aprovechamiento de esta potencia requiere algoritmos y modelos específicamente diseñados para explotar la naturaleza cuántica de la información. Así, el cálculo cuántico no busca tanto “hacer más rápido lo mismo”, como plantear los problemas desde una lógica diferente, adaptada a los principios de la física cuántica.

Plataformas de hardware para la computación cuántica

El desarrollo de la computación cuántica depende de la capacidad para implementar y controlar de forma estable los cúbits. Diversas tecnologías experimentales avanzan en paralelo hacia este objetivo, cada una con ventajas y desafíos específicos.

- Los cúbits superconductores⁹ utilizan circuitos eléctricos fabricados con materiales que, a temperaturas próximas al cero absoluto, pierden toda resistencia y muestran comportamientos cuánticos. Son rápidos y compatibles con la electrónica clásica, aunque requieren refrigeración criogénica extrema y presentan limitaciones de estabilidad.
- Los iones atrapados¹⁰ emplean átomos cargados confinados mediante campos electromagnéticos y manipulados con láseres de alta precisión. Ofrecen una gran fidelidad y coherencia cuántica, pero su escalado a sistemas de gran tamaño es todavía complejo.
- En los sistemas de átomos neutros¹¹, miles de átomos se disponen en redes ópticas formadas por haces de luz. Esta tecnología destaca por su potencial de escalabilidad y por permitir el control individual de cada átomo, aunque aún enfrenta retos en estabilidad y tiempos de operación.
- La fotónica integrada¹² codifica la información cuántica en la polarización de los fotones y la procesa mediante circuitos ópticos en chips. Los fotones son muy resistentes, lo que facilita su integración en redes de comunicación, pero la realización de operaciones lógicas complejas sigue siendo un desafío técnico.
- Los ordenadores cuánticos basados en defectos de diamante¹³ utilizan impurezas puntuales —como los centros vacancia-nitrógeno (NV)— incrustadas en la red cristalina del diamante para almacenar y manipular información cuántica. Estos defectos actúan como cúbits cuya información puede leerse y controlarse mediante luz láser y microondas. Destacan por su funcionamiento a temperaturas cercanas a la ambiente, su alta estabilidad química y su potencial para integrarse en dispositivos compactos. Sin embargo, aún presentan desafíos en la fabricación reproducible de defectos de alta calidad,

en la coherencia a gran escala y en el acoplamiento eficiente entre múltiples cúbits dentro de un mismo chip.

- Los ordenadores cuánticos basados en spins en silicio¹⁴ utilizan el momento angular (spin) de electrones o huecos confinados en puntos cuánticos fabricados con tecnologías de silicio similares a las de la industria de los semiconductores. Estos cúbits destacan por su gran compatibilidad con los procesos CMOS, lo que abre la puerta a integrar millones de unidades en chips compactos. Además, presentan tiempos de coherencia largos gracias a la pureza del silicio y a la posibilidad de emplear isótopos sin spin nuclear. Aun así, esta plataforma enfrenta retos importantes: la precisión extrema necesaria en la fabricación de los puntos cuánticos, el control simultáneo de muchos cúbits mediante pulsos eléctricos y de microondas, y la interconexión fiable entre cúbits distribuidos en grandes matrices.

Estas plataformas representan caminos complementarios hacia un mismo objetivo: construir procesadores cuánticos escalables, precisos y fiables. Es probable que el futuro de la computación cuántica combine varias de ellas en arquitecturas híbridas, integradas con la supercomputación clásica y las redes de comunicación cuántica.

9. Kjaergaard, M. et al. (2020). "Superconducting qubits: Current state of play." *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 11, 369–395

10. Bruzewicz, C. D., Chiaverini, J., McConnell, R., & Sage, J. M. (2019). "Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges." *Applied Physics Reviews*, 6, 021314.

11. Browaeys, A., & Lahaye, T. (2020). "Many-body physics with individually controlled Rydberg atoms." *Nature Physics*, 16, 132–142

12. Flaminio, F., Spagnolo, N., & Sciarrino, F. (2018). "Photonic quantum information processing: A review." *Reports on Progress in Physics*, 82(1), 016001.

13. Awschalom, D. D., Hanson, R., Wrachtrup, J., & Zhou, B. B. (2018). "Quantum technologies with optically interfaced solid-state spins." *Nature Photonics*, 12, 516–527

14. Burkard, G., Ladd, T. D., Nichol, J. M., Pan, A., & Petta, J. R. (2021). "Semiconductor spin qubits." *Reviews of Modern Physics*, 93(2), 025003

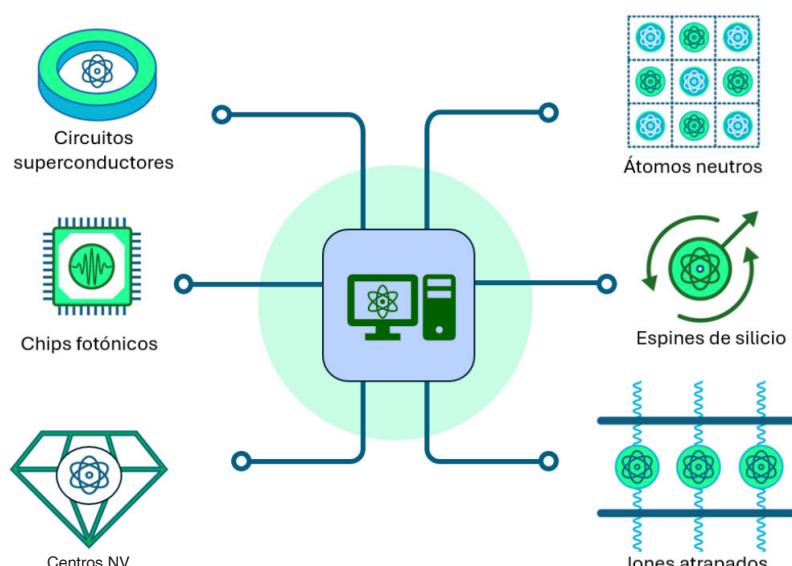


Ilustración 11.
Diferentes plataformas de hardware cuántico.

2.2

Comunicación cuántica

La comunicación y la seguridad cuántica engloban un conjunto de tecnologías diseñadas para proteger las comunicaciones digitales frente a ciberataques presentes y futuros, incluidos los que podrán realizar ordenadores cuánticos. En lugar de limitarse a reforzar los algoritmos clásicos, introducen nuevos sistemas de distribución de claves y redes seguras que permiten detectar cualquier intento de interceptación y garantizan una protección de muy largo plazo. Sus principales ventajas son una seguridad mucho más robusta para infraestructuras críticas (gobiernos, banca, defensa, sanidad), la reducción del riesgo asociado al paradigma “Harvest now, decrypt later” (robar ahora y descifrar después) y la creación de redes de confianza que preparan a instituciones y empresas para la transición a un entorno digital postcuántico.

Principios de funcionamiento

La comunicación cuántica aprovecha las leyes de la mecánica cuántica para transmitir información de manera intrínsecamente segura, garantizando la confidencialidad y la integridad de los datos frente a cualquier intento de interceptación o manipulación.

A diferencia de los sistemas clásicos, cuya seguridad depende de algoritmos matemáticos susceptibles de ser vulnerados con suficiente capacidad de cálculo, la comunicación cuántica se basa en principios físicos inviolables. El entrelazamiento y el colapso cuántico aseguran que cualquier intento de observación de un mensaje altere de inmediato su estado, lo que permite detectar la presencia de un intruso.

Aplicaciones e impacto

La aplicación más desarrollada es la distribución cuántica de claves (QKD, Quantum Key Distribution), que permite a dos usuarios generar una clave criptográfica compartida con seguridad absoluta. Si alguien intenta interceptar el canal, el sistema lo detecta automáticamente, invalidando la clave y garantizando la integridad de la comunicación. Este enfoque proporciona una base física para construir redes de comunicaciones resistentes incluso frente a los futuros ordenadores cuánticos.

En paralelo, la transición hacia la criptografía post-cuántica (PQC) resulta esencial para proteger los sistemas digitales convencionales. La PQC se fundamenta en algoritmos basados en problemas matemáticos que se consideran intratables incluso para los ordenadores cuánticos, como son las redes euclidianas o los códigos corregidores de errores. Su adopción garantiza la continuidad operativa de servicios digitales y la protección de datos en todas aquellas aplicaciones donde no es posible utilizar enlaces cuánticos como QKD. La combinación de ambas aproximaciones constituye una estrategia complementaria y necesaria para lograr una protección completa. Más allá de la criptografía, la comunicación cuántica sienta las bases para una nueva infraestructura de red cuántica, donde la información puede transmitirse, almacenarse y procesarse en forma de estados cuánticos. Estas redes permitirán la conexión segura entre procesadores cuánticos localizados en diferentes ubicaciones del planeta, la sincronización ultra precisa entre relojes o el desarrollo de sensores remotos

coordinados. En su conjunto, estos avances llevan hacia el Internet cuántico¹⁵⁻¹⁶, una futura red global que combinará enlaces terrestres, satelitales y repetidores cuánticos para permitir comunicaciones y servicios distribuidos con niveles de seguridad y funcionalidad sin precedentes.

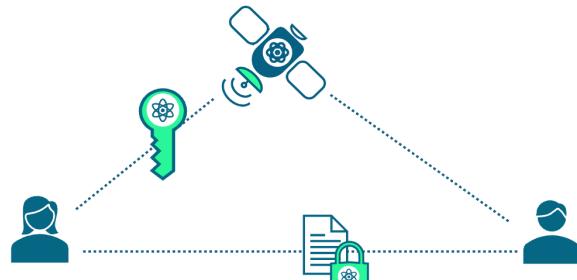


Ilustración 12.
El internet cuántico permitirá la transmisión de datos de forma ultra segura.

Plataformas de hardware para la comunicación cuántica

Las tecnologías de comunicación cuántica se basan principalmente en el uso de fotones individuales como portadores de información. Los fotones son partículas de luz ligeras, rápidas y muy resistentes a interacciones con el entorno, lo que los convierte en el medio ideal para transmitir información cuántica a largas distancias.

Los sistemas más extendidos utilizan canales de fibra óptica para el envío de fotones¹⁷. Estas redes pueden operar en entornos metropolitanos y son compatibles con la infraestructura de telecomunicaciones existente, aunque su alcance se limita a unos pocos cientos de kilómetros debido a la atenuación de la señal.

Para cubrir mayores distancias, se emplean satélites, capaces de conectar estaciones terrestres separadas por miles de kilómetros mediante transmisión óptica en el espacio libre¹⁸. Este enfoque complementa a las redes terrestres y es esencial para crear una red cuántica global.

Otro componente clave son los repetidores cuánticos¹⁹, dispositivos que combinan memoria cuántica y entrelazamiento para extender la comunicación más allá de los límites actuales de la fibra óptica. Aún en fase experimental, pero estos repetidores serán fundamentales para escalar las redes a nivel continental.

El avance en estas plataformas no solo fortalecerá la ciberseguridad y la soberanía digital de Europa, sino que abrirá el camino hacia un Internet cuántico, donde la información se gestione con niveles de privacidad, velocidad y eficiencia sin precedentes.

15. Kimble, H. J. (2008). "The quantum internet." *Nature*, 453, 1023–1030

16. Kumar, V., Cicconetti, C., Conti, M., & Passarella, A. (2025). "Quantum Internet: Technologies, Protocols, and Research Challenges." *International Journal of Networked and Distributed Computing*, 13, article 22

17. Boaron, A., et al. (2018). "Secure quantum key distribution over 421 km of optical fiber." *Physical Review Letters*, 121, 190502

18. Liao, S.-K., et al. & Pan, J.-W. (2017). "Satellite-to-ground quantum key distribution." *Nature*, 549, 43–47.

19. Sangouard, N., Simon, C., de Riedmatten, H., & Gisin, N. (2011). "Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics." *Reviews of Modern Physics*, 83, 33–80

2.3

Metrología cuántica

La metrología (o sensórica) cuántica constituye una de las áreas más maduras y con mayor potencial de aplicación inmediata. Su objetivo es emplear sistemas cuánticos para medir con una precisión sin precedentes magnitudes físicas como el tiempo, el campo magnético, la aceleración, la temperatura o la gravedad. A diferencia de los sensores convencionales, que se basan en principios clásicos, los sensores cuánticos utilizan superposición, entrelazamiento e interferencia para amplificar la sensibilidad de las mediciones. Esto permite detectar variaciones extremadamente pequeñas, imposibles de registrar con instrumentos tradicionales. En la práctica, la sensórica cuántica no solo busca una mayor precisión, sino también una mayor estabilidad y reproducibilidad, lo que resulta fundamental para campos donde la exactitud es crítica, como la navegación, la salud, la energía o la defensa.

Principios de funcionamiento

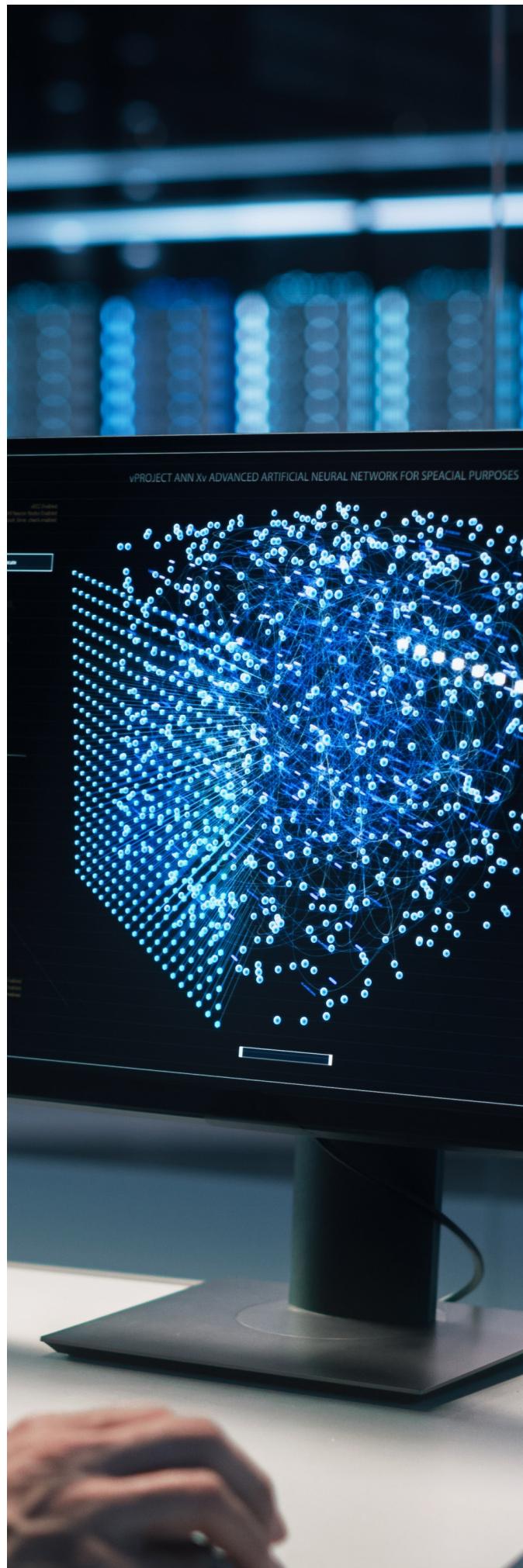
Los sensores cuánticos operan a partir de sistemas atómicos o fotónicos cuyo estado cuántico responde de forma muy precisa a cambios en el entorno. Al medir cómo estos estados se alteran ante una perturbación externa —un campo magnético, una aceleración o una variación de temperatura— es posible determinar con exactitud el valor de esa magnitud. El uso de estados entrelazados permite además superar los límites de precisión impuestos por la física clásica, alcanzando lo que se conoce como el límite de Heisenberg, donde la sensibilidad mejora de manera proporcional al número de partículas entrelazadas.

Aplicaciones e impacto

La sensórica cuántica abre la puerta a una nueva generación de instrumentos ultraprecisos que pueden transformar numerosos sectores. En salud, permitirá desarrollar técnicas de diagnóstico no invasivas y de alta resolución, como la magnetoencefalografía cuántica o la detección temprana de enfermedades neurológicas. En energía y medio ambiente, facilitará la monitorización de recursos naturales, el control de redes eléctricas y la detección de contaminantes con una sensibilidad sin precedentes. En defensa y seguridad, hará posible sistemas de navegación

que no dependan del GPS, sensores gravitacionales para la detección subterránea o sistemas de vigilancia de frontera basados en interferometría cuántica.

Además, la sensórica cuántica desempeñará un papel esencial como tecnología habilitadora para otras ramas cuánticas. Los relojes y sensores de precisión son la base de la sincronización de redes de comunicación cuántica, de la calibración de procesadores cuánticos y de la validación experimental de simuladores físicos.



Plataformas de tecnológicas

Las plataformas de hardware empleadas en metrología cuántica son diversas y están en distintos grados de madurez tecnológica:

- Relojes atómicos de nueva generación²⁰, basados en transiciones ópticas de átomos como el estroncio o el iterbio, alcanzan una precisión tal que perderían menos de un segundo en miles de millones de años. Constituyen la referencia última para la medida del tiempo y para la sincronización de redes globales de comunicación y posicionamiento
- Magnetómetros cuánticos²¹, que utilizan átomos o defectos en cristales como el diamante, permiten detectar campos magnéticos extremadamente débiles, con aplicaciones en neuroimagen, diagnóstico médico, geofísica y detección submarina.
- Acelerómetros e interferómetros cuánticos basados en átomos fríos utilizan haces de láser para medir aceleraciones o variaciones gravitatorias con gran precisión²², con aplicaciones en navegación inercial, exploración del subsuelo o vigilancia de infraestructuras críticas.

Estas tecnologías comparten un desafío común: mantener los fenómenos cuánticos inalterados frente a la influencia del entorno. Para ello se requieren condiciones de aislamiento, control térmico y estabilidad electromagnética que garanticen la fiabilidad de las mediciones.

20. McGrew, et al. (2018). "Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level." *Nature*, 564, 87–90.

21. Barry, J. F., Schloss, J. M., Bauch, E., Turner, M. J., Hart, C. A., Pham, L. M., & Walsworth, R. L. (2020). "Sensitivity optimization for NV-diamond magnetometry." *Reviews of Modern Physics*, 92(1), 015004

22. Bongs, K., et al. (2019). "Taking atom interferometric quantum sensors from the laboratory to real-world applications." *Nature Reviews Physics*, 1, 731–739. *Physics*, 83, 33–80

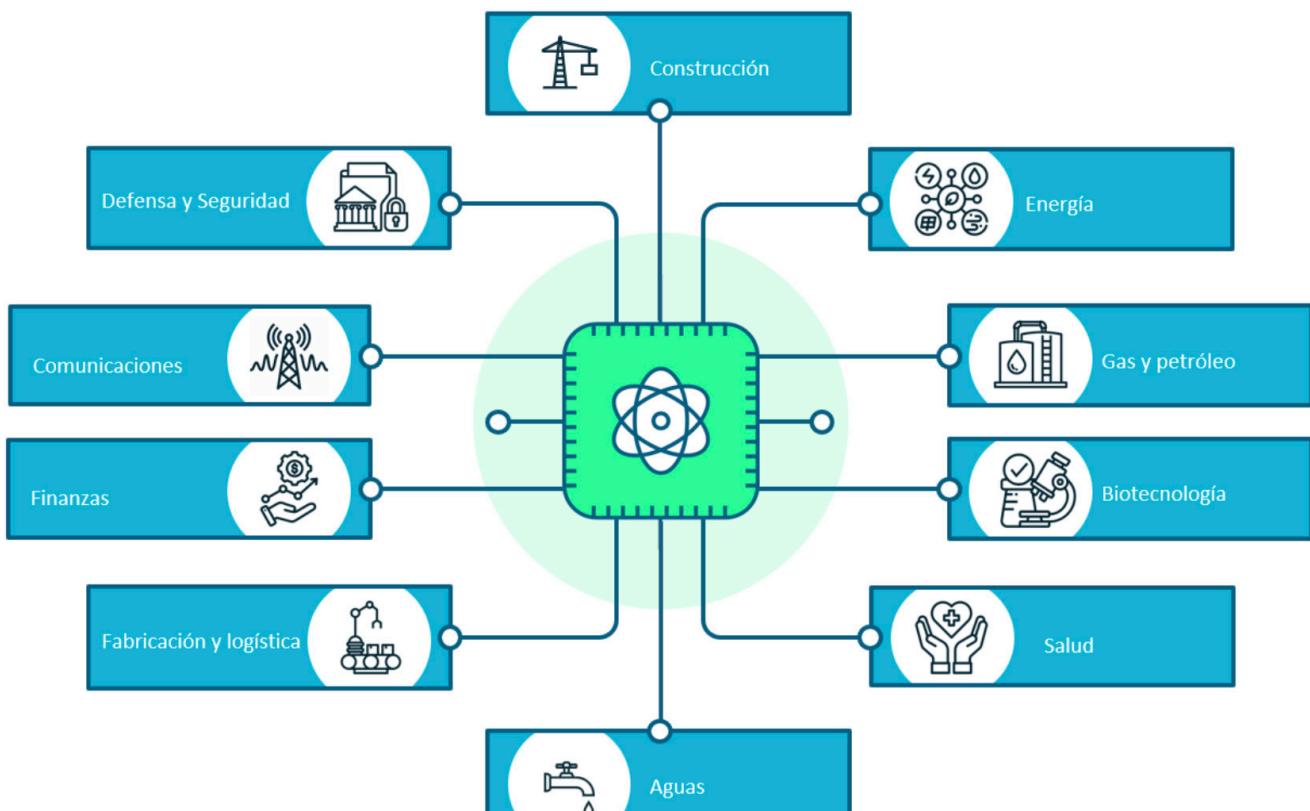


Ilustración 13.
Sectores de aplicación de
las tecnologías cuánticas.

03

El ecosistema cuántico

La segunda revolución cuántica está configurando un nuevo escenario global en el que ciencia, industria y geopolítica convergen. Las tecnologías cuánticas se han convertido en un pilar estratégico para la innovación, la seguridad y la soberanía tecnológica de los Estados. En las próximas décadas, su dominio determinará no solo la competitividad económica, sino también la capacidad de los países para garantizar la protección de sus infraestructuras críticas, la integridad de sus sistemas digitales y el liderazgo en la economía del conocimiento.



Andalucía for Quantum

3.1 Ecosistema mundial

En este proceso, Estados Unidos y China concentran la mayor parte de los avances y definen dos modelos distintos de adaptación al cambio cuántico. En Estados Unidos, el ecosistema cuántico se articula sobre una alianza estrecha entre el sector público, las universidades y las grandes empresas tecnológicas. El National Quantum Initiative Act y las redes de laboratorios del Departamento de Energía y la National Science Foundation han impulsado la creación de un entorno de innovación distribuido, en el que la investigación básica convive con la experimentación industrial. Los principales actores –como IBM, Google, Microsoft, Intel, Amazon o startups como IonQ y Rigetti– colaboran con centros académicos de excelencia en programas de desarrollo conjunto de hardware, algoritmos y aplicaciones. Esta combinación de flexibilidad empresarial y liderazgo científico ha permitido a Estados Unidos mantener la vanguardia en computación y software cuántico, reforzando su ecosistema con una red de formación especializada y de incubadoras de deep tech que facilitan la transferencia tecnológica. El énfasis estadounidense está en crear un mercado cuántico funcional, más que en un proyecto estatal centralizado, y en integrar estas capacidades en sus sectores estratégicos (defensa, energía, salud y finanzas).

China, en cambio, ha optado por un modelo de planificación centralizada y desarrollo acelerado, con una fuerte orientación hacia la soberanía tecnológica. Desde su 13º y 14º Plan Quinquenal, el país ha consolidado una red nacional de investigación e industria cuántica articulada en torno a polos como Hefei y Shanghái, donde universidades, empresas y laboratorios públicos operan bajo un mismo marco de innovación dirigida. China lidera las aplicaciones de comunicación cuántica y redes seguras, con proyectos emblemáticos como el satélite Micius y la red cuántica terrestre entre Pekín y Shanghái. Además, está impulsando el uso de la computación cuántica en sectores de manufactura avanzada, inteligencia artificial y criptografía, buscando reducir su dependencia tecnológica.

exterior. Este ecosistema se caracteriza por la integración vertical entre investigación, producción y aplicación, lo que acelera la conversión de los avances científicos en prototipos funcionales y productos comerciales.

En otras regiones como América del Sur, la adaptación al cambio cuántico avanza a un ritmo más gradual, aunque comienzan a consolidarse iniciativas nacionales orientadas a la ciberseguridad, la digitalización y la formación de capacidades técnicas. Países como Brasil, Argentina y Chile desarrollan programas de investigación en física cuántica y tecnologías fotónicas, frecuentemente en colaboración con socios europeos y norteamericanos. Brasil es por ahora el primer país con un claro plan de financiación en tecnologías cuánticas. Otro ejemplo destacado es Uruguay, que ha lanzado su Estrategia Nacional de Ciberseguridad 2024– 2030²³, en la que se reconoce explícitamente la necesidad de prepararse para el impacto de la computación cuántica en la seguridad de la información y en la infraestructura digital del país. Estas iniciativas reflejan una conciencia creciente en la región sobre la importancia de incorporar la dimensión cuántica en las políticas de innovación y defensa digital, anticipando la necesidad de ecosistemas resilientes y cooperativos más allá de las fronteras nacionales.

En términos de inversión, se estima que los gobiernos de más de treinta países han anunciado ya más de 50.000 millones de dólares en financiación pública para tecnologías cuánticas, con China liderando con unos 15.000 millones, seguida por Estados Unidos con cerca de 5.000 millones²⁴. Sin embargo, lo más relevante no es solo la magnitud de los recursos, sino la diversidad de estrategias de adaptación: mientras Estados Unidos apuesta por la innovación competitiva y la cooperación público-privada, China avanza mediante planificación estatal y soberanía tecnológica, y América del Sur comienza a integrar el componente cuántico dentro de sus políticas de seguridad y transformación digital.

23. <https://www.gub.uy/agencia-gobierno-electronico-sociedad-informacion-conocimiento/comunicacion/publicaciones/estrategia-nacional-ciberseguridad-2024-2030-0>

24. <https://www.qureca.com/quantum-initiatives-worldwide>

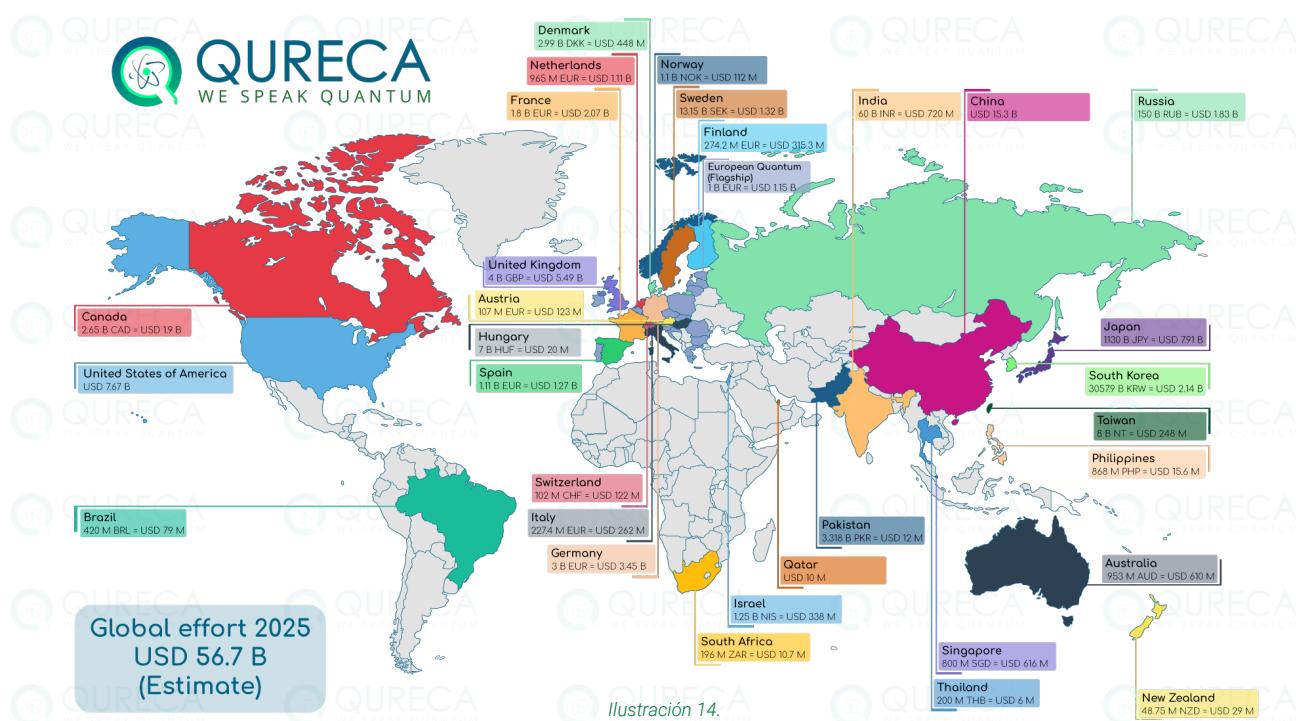


Ilustración 14. Financiación pública mundial en tecnologías cuánticas por países (cifras en billions de dólares; escala corta: 1 B = 1 000 millones).

3.2

Ecosistema europeo



Europa ha adoptado un enfoque basado en la cooperación transnacional y la autonomía estratégica abierta, consciente de que el liderazgo cuántico solo puede alcanzarse mediante la coordinación entre los Estados miembros.

El Quantum Flagship, lanzado por la Comisión Europea en 2018 con una dotación inicial de 1.000 millones de euros, constituye uno de los mayores programas de I+D del mundo en este ámbito. Su objetivo es convertir los avances científicos europeos en tecnologías y productos concretos, articulando una red continental de investigación y desarrollo industrial.

Este programa se estructura en torno a cuatro pilares – computación, comunicación, sensórica y simulación cuántica – y busca reforzar la posición de Europa frente a Estados Unidos y China, combinando excelencia científica con liderazgo industrial. Dentro de este marco, iniciativas como la Quantum Internet Alliance (QIA)²⁵ desempeñan un papel central en el desarrollo de las primeras redes cuánticas paneuropeas, acelerando el camino hacia un futuro Internet cuántico.

En paralelo, la Unión Europea impulsa la infraestructura EuroQCI, que desplegará una red de comunicaciones cuánticas seguras a escala continental. Esta infraestructura integrará redes terrestres y satelitales, y conectará instituciones públicas, centros de supercomputación y sistemas de defensa, garantizando así la soberanía digital y la ciberseguridad europea. Europa también avanza en la integración de procesadores cuánticos dentro de la red de supercomputación EuroHPC, configurando sistemas híbridos que combinan recursos clásicos y cuánticos. Este paso es esencial para acelerar la transición hacia aplicaciones prácticas y fortalecer la competitividad industrial del continente. A ello se suma un creciente esfuerzo en formación y desarrollo de talento, impulsado por programas

europeos como DigiQ²⁶ y QTIndu²⁷, diseñados para capacitar a nuevas generaciones de profesionales y apoyar la adopción industrial de tecnologías cuánticas en toda la Unión.

Varios países europeos han lanzado sus propias estrategias nacionales alineadas con el marco comunitario. Alemania apuesta por la fabricación de hardware y la creación de centros de demostración industrial; Francia impulsa su Plan Quantique²⁸, centrado en el desarrollo de procesadores y algoritmos; Países Bajos lidera la fotónica cuántica y las redes de comunicación, especialmente a través de sus programas de Internet cuántico.

A ellos se suma el Reino Unido²⁹, que ha consolidado uno de los ecosistemas cuánticos más sólidos de Europa, con una estrategia nacional muy avanzada que combina inversión en computación, comunicaciones y aplicaciones industriales. Por su parte, ha emergido como un actor relevante en tecnologías basadas en superconductores y en la investigación de materiales cuánticos, reforzando su papel en la cadena de valor europea. En conjunto, estos esfuerzos posicionan a Europa como un ecosistema coordinado, diverso y complementario, con un papel creciente en la economía cuántica global.

25. <https://quantuminternetalliance.org>

26. <https://digiq.hybridintelligence.eu>

27. <https://qtindu.eu>

28. <https://quantique.france2030.gouv.fr>

29. <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>

3.3

Ecosistema español



Ilustración 15.
Galicia, el País Vasco y Cataluña son los principales
focos de desarrollo en tecnologías cuánticas.

España ha dado pasos firmes hacia la creación de un ecosistema cuántico nacional. La Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas 2025– 2030³⁰ establece un marco común de acción para coordinar la investigación, la innovación y la transferencia tecnológica, reforzando la posición del país dentro de la estrategia europea.

El ecosistema español está formado por universidades, centros de investigación y empresas que cubren diferentes áreas del espectro cuántico. En los últimos años han emergido polos regionales especializados que contribuyen al desarrollo de capacidades nacionales.

3.3.1

País Vasco

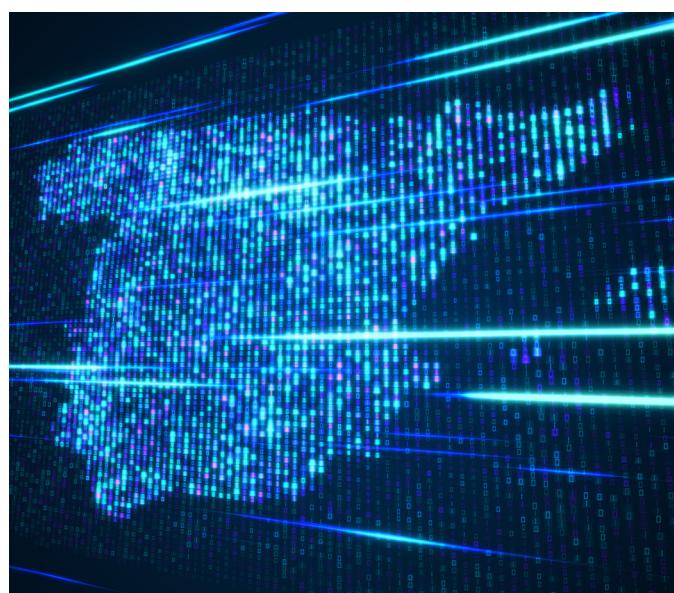
El País Vasco se ha consolidado como uno de los principales polos de desarrollo cuántico en España y en Europa, gracias a una combinación equilibrada de inversión pública y privada, infraestructura avanzada, talento científico y colaboración internacional. Su ecosistema integra universidades, centros de investigación y empresas que cubren todo el espectro de las tecnologías cuánticas —desde el hardware hasta las aplicaciones industriales— y constituye un modelo de gobernanza regional orientado a la excelencia y a la transferencia de conocimiento. Un hito determinante en esta consolidación ha sido la inauguración del IBM System Two en Donostia/San Sebastián, el primer ordenador cuántico operativo en Europa y el tercero del mundo. Este sistema se aloja en el IBM–Euskadi Quantum Computational Center, una instalación pionera que posiciona al territorio como referencia internacional en computación cuántica aplicada. La infraestructura, fruto de un acuerdo público-privado entre el Gobierno Vasco e IBM, forma parte de una estrategia estatal dotada con 153 millones de euros, de los cuales 80 millones corresponden a la inversión realizada en Euskadi.

El desarrollo del ecosistema vasco se apoya en un tejido empresarial innovador y diversificado, donde destacan compañías como Multiverse Computing, especializada en algoritmos cuánticos para el sector financiero e industrial, así como startups emergentes como Qubiz, enfocada en computación cuántica y fotónica integrada, y Quanvia, dedicada al desarrollo de soluciones y servicios de consultoría en tecnologías cuánticas. A ello se suman colaboraciones con empresas líderes internacionales como Quantum Motion y con grandes corporaciones energéticas como Iberdrola. Estas alianzas fortalecen la conexión entre investigación y aplicación, impulsando un mercado cuántico real con impacto en sectores estratégicos.

La base científica del ecosistema se sustenta en centros de investigación de excelencia como el CIC NanoGune, la Fundación Ikerbasque y el Donostia International Physics Center (DIPC), reconocidos por su trabajo en física de materiales, nanotecnología y diseño de chips cuánticos. Estos centros actúan como nodos de generación de conocimiento y de atracción de talento internacional, reforzando la capacidad del País Vasco para liderar proyectos de vanguardia y potenciando el esfuerzo de transferencia tecnológica que realizan centros como Tecnalia, Lortek y Tekniker en estas áreas. En el ámbito del talento y la formación, Euskadi ha desplegado programas específicos para la capacitación de profesionales en tecnologías cuánticas, como el "Quantum Practitioner", así como alianzas académicas que integran a universidades y centros tecnológicos en redes europeas. Este enfoque fomenta la creación de una masa crítica de investigadores y técnicos especializados, clave para sostener el crecimiento del ecosistema a largo plazo.

Todo ello se enmarca en una estrategia integral, articulada a través de las iniciativas Basque Quantum (BasQ) e IKUR 2030³¹, que establecen una hoja de ruta para consolidar a Euskadi como un hub cuántico internacionalmente conectado, con capacidades en investigación, transferencia tecnológica y atracción de inversión.

En conjunto, el ecosistema cuántico del País Vasco representa una de las agendas más sólidas y ambiciosas de Europa, combinando infraestructura de vanguardia, políticas públicas coherentes, cooperación internacional y un firme compromiso con la formación y la innovación industrial.



30. <https://espanadigital.gob.es/estrategia-de-tecnologias-cuanticas-de-espana>

31. <https://ikur.euskadi.eus/es>

3.3.2

Cataluña

Cataluña se ha consolidado como uno de los territorios más avanzados en Europa en el ámbito de las tecnologías cuánticas, impulsando una estrategia integral y colaborativa que combina inversión pública, infraestructuras de vanguardia, talento científico y una estrecha cooperación entre universidades, centros de investigación y empresas tecnológicas. Su enfoque sistémico, basado en la conexión entre ciencia, industria y sociedad, ha convertido a la región en un referente europeo de innovación cuántica.

La inversión pública y estratégica constituye uno de los pilares de este ecosistema. El proyecto "Valle de la Cuántica"³², liderado por el Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO), representa una inversión de 43 millones de euros en cinco años, destinada a consolidar un clúster de investigación y transferencia tecnológica en torno a la fotónica y las tecnologías cuánticas. Este esfuerzo se complementa con el plan "Catalunya Lidera", dotado con 2.000 millones de euros orientados a impulsar la innovación, el emprendimiento y la aplicación industrial de la tecnología cuántica en la próxima década.

Cataluña dispone además de una infraestructura cuántica avanzada. Destacan el anillo de comunicaciones cuánticas de Barcelona, los repetidores de señal cuántica y el desarrollo de ordenadores cuánticos basados en átomos ultrafríos y sensores de nueva generación, que sitúan a la región a la vanguardia europea en investigación aplicada. En este ámbito, empresas como Quside –especializada en generadores de aleatoriedad cuántica– y LuxQuanta –centrada en sistemas de comunicaciones cuánticas mediante QKD– contribuyen al despliegue y validación tecnológica de estas infraestructuras, fortaleciendo su transferencia al mercado. Estas infraestructuras fortalecen la capacidad de experimentación y la interoperabilidad entre redes y centros, favoreciendo la creación de un entorno tecnológico plenamente conectado.

En el ámbito de la computación, el Barcelona Supercomputing Center (BSC) desempeña un papel estratégico como centro de referencia internacional. El BSC alberga el primer ordenador cuántico con tecnología 100% europea, integrado junto al superordenador MareNostrum, lo que permite ofrecer un entorno híbrido de cálculo de altas prestaciones accesible a investigadores, empresas y administraciones públicas. Esta integración marca un hito en la construcción de una infraestructura cuántica europea autónoma.

El ecosistema catalán se caracteriza también por su modelo de colaboración público-privada con centros tecnológicos de referencia como Eurecat e i2Cat y universidades como la Universitat de Barcelona (UB) y la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) trabajan estrechamente con el ICFO, el BSC y empresas tecnológicas como Qilimanjaro Quantum Tech que impulsa el primer centro de datos cuántico e híbrido de Europa. Esta red de colaboración se ve reforzada por la Catalanian Quantum Academy (CQA), que articula programas formativos avanzados y coordina la formación de talento especializado para abastecer las crecientes necesidades del sector. Estas alianzas promueven la transferencia de conocimiento, la creación de startups y la generación de proyectos industriales con impacto económico directo.

En paralelo, los programas regionales y nacionales orientados a la atracción de talento y la generación de empleo cualificado refuerzan la sostenibilidad del ecosistema. Cataluña impulsa iniciativas para captar investigadores internacionales y formar nuevos profesionales en disciplinas cuánticas, asegurando así

una base sólida de capital humano. Solo en 2025, el ICFO recibirá 2,4 millones de euros adicionales del Gobierno de España para ampliar sus capacidades en fotónica cuántica, dentro del marco de la Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas.

Gracias a esta combinación de inversión estratégica, infraestructura científica, liderazgo académico y cooperación internacional, Cataluña se posiciona como uno de los principales hubs cuánticos de Europa. Su ecosistema demuestra la eficacia de una planificación coherente entre ciencia y política industrial, y constituye un ejemplo de cómo una región puede transformar el conocimiento en innovación tecnológica con impacto global.

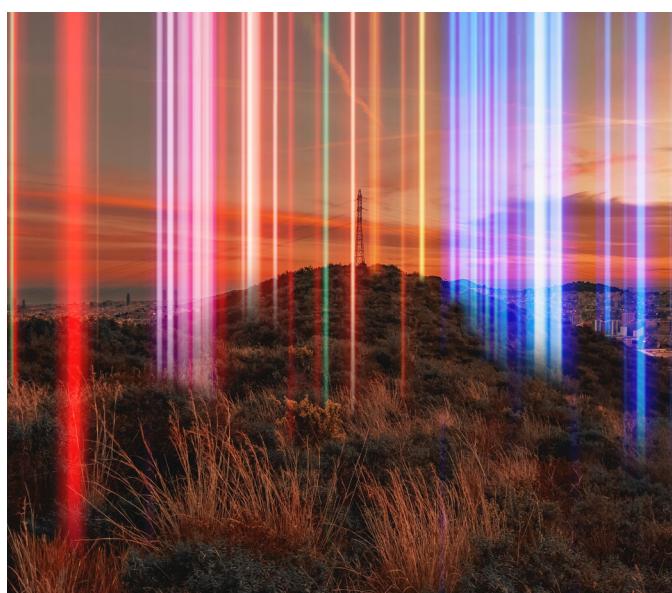
3.3.3

Galicia

Galicia se está consolidando como uno de los principales polos de desarrollo cuántico en España y en el sur de Europa. Su estrategia combina inversión pública, infraestructuras de vanguardia, formación de talento y una red de colaboración institucional, empresarial y científica. Este modelo integral sitúa a la comunidad como un referente nacional en la aplicación práctica de la computación cuántica y en la transferencia tecnológica hacia sectores estratégicos.

Uno de los hitos más destacados ha sido la instalación del ordenador cuántico Qmio en el Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA). Con una capacidad de 32 cíbits, se trata del mayor sistema cuántico operativo en una institución pública del sur de Europa y un referente para la investigación aplicada en España. Esta infraestructura, complementaria al superordenador FinisTerrae, permite combinar computación clásica y cuántica en entornos híbridos, ofreciendo capacidades de cálculo avanzadas a investigadores, universidades y empresas.

En el plano económico, la Xunta de Galicia ha puesto en marcha una inversión inicial de 30 millones de euros para el Polo de Tecnologías Cuánticas, con el objetivo de movilizar hasta 150 millones mediante la incorporación de fondos europeos. Solo la adquisición e instalación del ordenador cuántico supuso una inversión de 13,9 millones de euros, reflejando el compromiso institucional por dotar a la región de capacidades científicas e



32. <https://web.gencat.cat/es/actualitat/detall/Es-creara-la-Vall-de-la-Quantica-per-impulsar-la-creacio-dempreses>

industriales de primer nivel.

El ecosistema gallego se articula alrededor de centros de excelencia e iniciativas estratégicas. El CESGA y Fujitsu han creado en Santiago de Compostela el International Quantum Center, un espacio dedicado a la investigación, la formación y el impulso de la innovación en tecnologías cuánticas. Por su parte, la iniciativa Polo de Tecnologías Cuánticas integra más de 35 laboratorios pertenecientes a 21 centros de investigación, universidades y empresas tecnológicas, conformando una red multidisciplinar orientada a la colaboración y la transferencia de conocimiento.

Galicia también lidera proyectos de infraestructura cuántica y ciberseguridad, como la mayor línea de comunicación cuántica de España y programas específicos de criptografía cuántica que refuerzan la seguridad de las redes y la protección de datos sensibles. En este ámbito, el centro tecnológico Gradiant desempeña un papel destacado en el desarrollo de tecnologías de seguridad, comunicaciones avanzadas y sistemas cuánticos aplicados a la protección de datos, contribuyendo de forma decisiva al fortalecimiento de las capacidades regionales en comunicación cuántica y ciberseguridad. Estas acciones sitúan a la comunidad en una posición estratégica dentro del mapa nacional de innovación en comunicaciones cuánticas.

El ecosistema se completa con una red de colaboración público-privada dinámica, encabezada por la Red Gallega de Tecnologías Cuánticas y por grupos de excelencia como el centro tecnológico Gradiant con su Laboratorio de Sensórica y comunicaciones cuánticas, y el Instituto Tecnológico de Galicia (ITG), reconocidos por el gobierno por su labor en innovación y adopción tecnológica. Estas entidades trabajan en la integración de la computación cuántica con la inteligencia artificial y la ciencia aplicada, acelerando la transición hacia soluciones

industriales concretas. Además, Galicia impulsa políticas activas de atracción y formación de talento mediante programas de capacitación regional y proyectos como Quorum, orientado a consolidar un ecosistema de profesionales e investigadores especializados en tecnologías cuánticas. Este enfoque refuerza la transferencia de conocimiento al sector industrial, energético y biomédico, ampliando el impacto económico y social de la innovación cuántica.

En conjunto, estos avances reflejan una hoja de ruta clara y ambiciosa hacia el liderazgo cuántico. Galicia combina inversión sostenida, infraestructura científica de primer nivel, talento cualificado y una red de cooperación sólida que la posiciona como referente nacional e internacional en computación y tecnologías cuánticas aplicadas.

3.3.4

Otras regiones

Más allá de Cataluña, País Vasco y Galicia, Quantum Spain tiene un enfoque explícitamente descentralizado que implica a numerosos nodos repartidos por el resto del territorio español. En el proyecto participan centros de supercomputación y universidades de comunidades como Madrid, Comunidad Valenciana, Castilla y León, Andalucía, Aragón, Asturias, Cantabria, Castilla-La Mancha, Extremadura, Murcia, Navarra, La Rioja y Canarias, integrados en su mayoría en la Red Española de Supercomputación (RES). Esta participación se traduce en nodos que alojan emuladores cuánticos, grupos que desarrollan algoritmos y software, y equipos que trabajan en aplicaciones de inteligencia artificial y casos de uso sectoriales, lo que permite que regiones diversas se beneficien del ecosistema cuántico nacional y contribuyan activamente a su desarrollo.

Centros que facilitan acceso y apoyo a los usuarios ordenador cuántico (RES: Red Española Supercomputación)



Proyecto de la Empresa Comuna Europea de Informática de Alto Rendimiento

Centros que participan en la investigación y creación de algoritmos cuánticos



Ilustración 16.
Ecosistema del proyecto Quantum Spain.

04

Diagnóstico estratégico del ecosistema cuántico andaluz

Este diagnóstico estratégico analiza la posición actual de Andalucía en el ámbito de las tecnologías cuánticas, identificando fortalezas, brechas y palancas de crecimiento en el ecosistema regional. Se parte de los avances recientes en infraestructuras, alianzas tecnológicas y primeros casos de uso piloto, pero también de las limitaciones en talento especializado, masa crítica empresarial y coordinación entre actores. El objetivo es disponer de una radiografía clara y realista del punto de partida andaluz, que sirva de base para priorizar inversiones, diseñar mecanismos de gobernanza y orientar una hoja de ruta que conecte la región con las principales iniciativas cuánticas nacionales e internacionales en la próxima década.



Andalucía for Quantum

4.1

Posicionamiento actual de las tecnologías cuánticas en Andalucía

El posicionamiento actual de Andalucía en el ámbito de las tecnologías cuánticas se encuentra en una fase inicial de desarrollo, aunque comienzan a aparecer indicadores significativos que permiten evaluar su punto de partida y su potencial de crecimiento en el contexto nacional y europeo. La región dispone de capacidades científicas y tecnológicas consolidadas en ámbitos como la supercomputación, la inteligencia artificial, la fotónica o la ciencia de materiales, que constituyen pilares complementarios esenciales para abordar con éxito la transición hacia la economía cuántica.

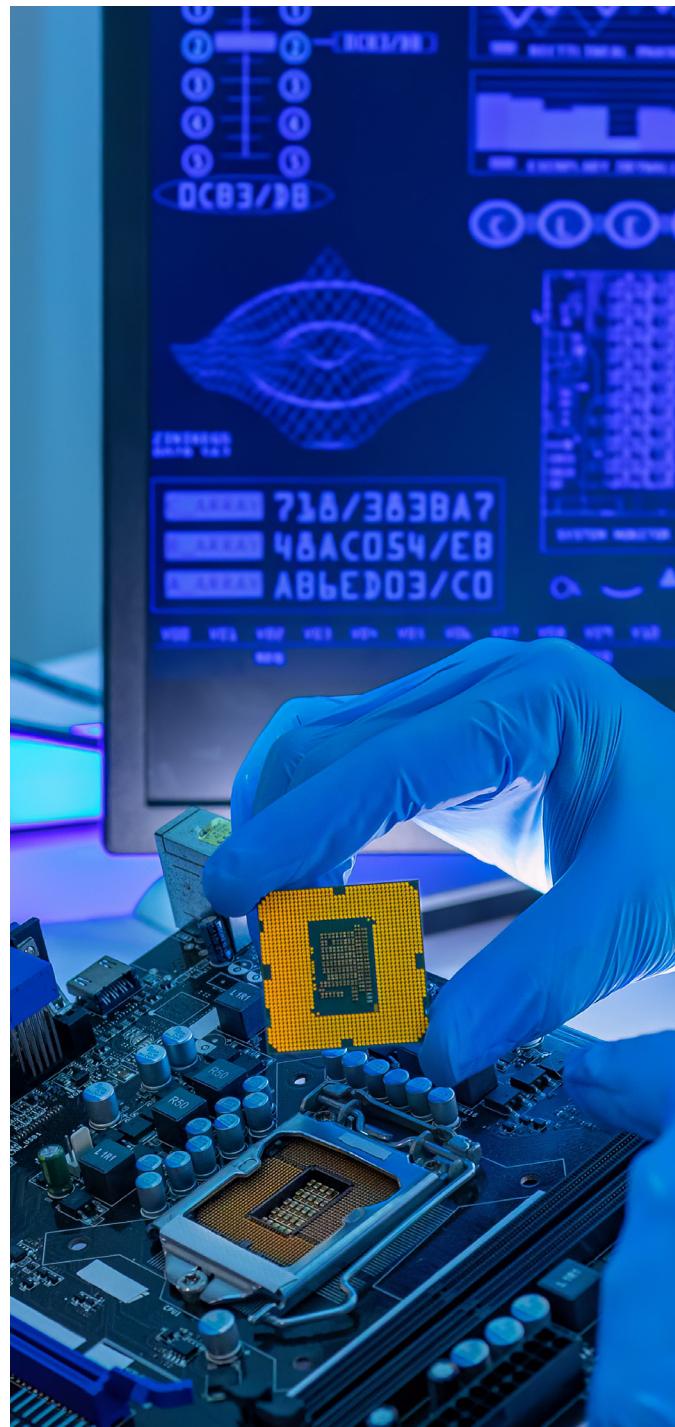
En materia de infraestructuras y proyectos estratégicos, Andalucía cuenta con iniciativas relevantes como el Espacio de Innovación en Tecnologías Exponenciales de Granada, promovido por la Agencia Digital de Andalucía en colaboración con IBM³³. Este espacio actúa como punto de encuentro entre investigación, administración y empresa para el desarrollo de tecnologías disruptivas, entre ellas la computación cuántica. No obstante, la escala de inversión y madurez tecnológica sigue siendo reducida en comparación con los polos más consolidados del país, como Cataluña, el País Vasco o Galicia, que ya cuentan con redes y centros operativos dedicados a la cuántica.

En cuanto a inversión pública, Andalucía no dispone todavía de un programa específico orientado a tecnologías cuánticas. Las inversiones actuales se canalizan principalmente a través de políticas de digitalización, inteligencia artificial y modernización tecnológica de la administración pública, lo que refleja un enfoque preparatorio. Esta orientación puede servir como base estratégica para incorporar gradualmente la dimensión cuántica a la planificación regional de innovación.

El tejido empresarial andaluz, aunque dinámico en sectores tecnológicos, aún no presenta un clúster especializado ni empresas de referencia en computación, comunicación o sensórica cuántica. Sin embargo, algunas compañías y centros tecnológicos comienzan a participar en proyectos nacionales y europeos relacionados con la criptografía poscuántica, la simulación y la inteligencia artificial híbrida, lo que representa una semilla de colaboración que puede evolucionar hacia un ecosistema cuántico propio.

En el ámbito del talento y la formación, Andalucía dispone de una sólida base universitaria y de programas en ingeniería, física, matemáticas e informática, pero aún son limitadas las iniciativas específicas en información cuántica o tecnologías de vanguardia asociadas. La creación de programas de posgrado, cátedras especializadas y redes de investigación interuniversitarias sería un paso decisivo para fortalecer la masa crítica de profesionales y científicos en este campo emergente. Por último, la presencia de Andalucía en iniciativas nacionales y europeas como Quantum Spain³⁴ o EuroQCI España es todavía incipiente, centrada en la colaboración académica y en la adopción temprana de tecnologías. En este contexto, la participación en programas nacionales como QUORUM³⁵ comienza a abrir oportunidades para que centros andaluces se integren en proyectos de computación y comunicaciones cuánticas con alcance estatal. La región no lidera aún nodos de infraestructura cuántica ni proyectos de referencia, aunque cuenta con capacidades técnicas y científicas para hacerlo en una segunda fase de despliegue.

En síntesis, Andalucía parte de una posición aún periférica en el mapa cuántico español y europeo, pero con activos



estratégicos claros: talento científico, red universitaria consolidada, experiencia en digitalización y potencial para integrar la cuántica en sus sectores productivos clave –energía, salud, agroalimentario, logística o aeroespacial–. La transición hacia las tecnologías cuánticas requerirá definir una estrategia regional coordinada, que articule la investigación, la formación y la colaboración público-privada. Este Libro Verde constituye el primer paso en esa dirección: sentar las bases para que Andalucía se incorpore de forma activa y competitiva a la nueva economía cuántica europea.

33. <https://es.newsroom.ibm.com/announcement?item=122885s>

34. <https://quantumspain-project.es>

35. <https://quorumpspain.eu>

4.2

Potencial de Andalucía en tecnologías cuánticas

Andalucía dispone de un potencial estratégico significativo para avanzar hacia la transición cuántica gracias a la combinación de un tejido industrial diversificado, una red universitaria sólida y una creciente capacidad científica en física, ingeniería y tecnologías de la información. Aunque su posicionamiento actual en el mapa cuántico europeo es todavía incipiente, la región cuenta con capacidades estructurales, tecnológicas y humanas que pueden convertirse en motores de desarrollo en la próxima década.

En el plano económico y productivo, Andalucía presenta sectores industriales de alta especialización y potencial aplicación de las tecnologías cuánticas. La industria aeronáutica –con empresas como Aertec Solutions y Grupo Sando–, que representa el 16% del PIB industrial y más del 30% del empleo nacional en el sector, constituye un ámbito idóneo para la integración de algoritmos cuánticos en diseño, simulación y optimización de procesos. En paralelo, la industria química, –con empresas como Persán o Sensient Fragrances y con Huelva como uno de los mayores polos de química básica de España–, puede beneficiarse de la simulación cuántica de materiales y moléculas para acelerar el desarrollo de nuevos compuestos y catalizadores.

El sector de la metalurgia cuenta con grandes empresas como Atlantic Copper, y es un sectores en crecimiento sostenido con aumentos interanuales superiores al 13%, que podría aprovechar los avances en sensórica cuántica y control de procesos industriales de alta precisión. Por su parte, el sector agroalimentario, que agrupa cerca del 20% del total de empresas industriales andaluzas, podría integrar tecnologías cuánticas en áreas como la trazabilidad, la optimización logística o la predicción de rendimientos agrícolas mediante modelos híbridos de inteligencia artificial y computación cuántica.

El sector energético, en plena expansión gracias al liderazgo regional en energías renovables, especialmente solar y eólica,

también ofrece un campo fértil para la aplicación de tecnologías cuánticas en redes eléctricas inteligentes, almacenamiento y optimización de sistemas energéticos. Estas oportunidades se complementan con la industria de defensa, la transformación mecánica y la construcción naval, concentradas en Cádiz y Sevilla, donde la ciberseguridad cuántica y la simulación avanzada pueden tener un impacto directo en innovación y competitividad. Desde el punto de vista territorial, Sevilla y Cádiz destacan por su especialización en aeronáutica y energía; Huelva por su polo químico e industrial; Málaga por su ecosistema tecnológico y de telecomunicaciones; Granada por su creciente infraestructura de innovación digital y cuántica; y Almería, Córdoba y Jaén por sus industrias emergentes en automoción, materiales y agroindustria avanzada. Esta distribución refuerza el potencial de una estrategia territorialmente equilibrada, que aproveche la diversidad de capacidades industriales y tecnológicas de la región.

En el ámbito académico y científico, Andalucía cuenta con una base universitaria y de investigación sólida y diversificada, que constituye un activo estratégico clave para la transición cuántica. La Universidad de Granada destaca por su actividad en información y física cuántica, con grupos de investigación en el Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear, y programas de grado y posgrado especializados. La Universidad Pablo de Olavide (Sevilla) ofrece microcredenciales universitarias en fundamentos de computación cuántica, orientadas tanto a estudiantes como a profesionales del sector tecnológico, contribuyendo a la creación de una masa crítica de talento local. La Universidad de Almería desarrolla líneas de investigación en computación cuántica, supercomputación e inteligencia artificial, con aplicaciones biomédicas y de ingeniería, mientras que la Universidad de Málaga impulsa proyectos de ciencia cuántica, ciberseguridad y divulgación, participando en iniciativas con empresas tecnológicas a través del programa QuantUMA³⁶. Estos esfuerzos se complementan con el trabajo del Centro de Innovación en Tecnologías Exponenciales de Granada, que aspira a convertirse en un nodo de referencia regional para la investigación aplicada en computación cuántica.

36. <https://quant.uma.es>

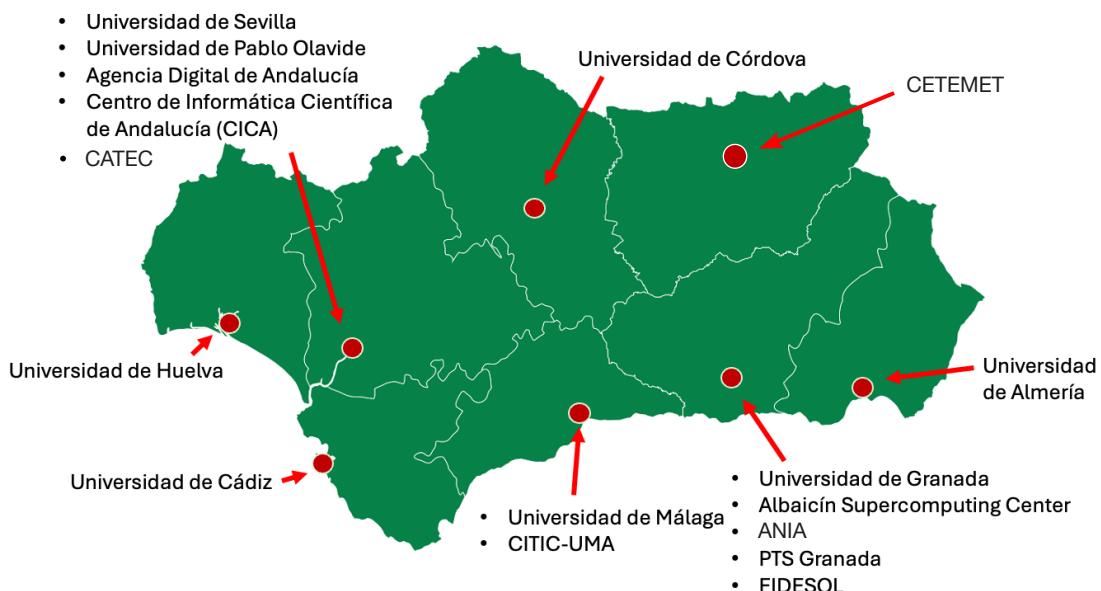


Ilustración 17.
Ecosistema cuántico andaluz actual.

Análisis SWOT del ecosistema cuántico andaluz

Fortalezas

Sólida base científica
Sectores preparados
Ecosistema digital creciente

Debilidades

Talento cuántico limitado
Inversión insuficiente
Baja transferencia

Oportunidades

Fondos europeos
Casos de uso inmediatos
Andalucía Quantum Hub

Amenazas

Competencia externa
Adopción lenta
Fuga de talento

En paralelo, Andalucía cuenta con laboratorios especializados en termodinámica y computación cuántica —como el grupo NEO de la Universidad de Málaga—, así como con equipos vinculados a proyectos nacionales e internacionales. La existencia de colaboraciones entre universidades, centros tecnológicos y empresas muestra un ecosistema emergente con capacidad de crecimiento si se articula una política regional que potencie la cooperación y la transferencia tecnológica.

En conjunto, la región dispone de una base industrial, científica y formativa robusta, capaz de convertirse en el eje de una estrategia de transición hacia la economía cuántica.

El reto no reside únicamente en ampliar la inversión, sino en coordinar los esfuerzos existentes y orientar las capacidades

andaluzas hacia la investigación aplicada, la formación especializada y la integración de la cuántica en los sectores productivos.

Este enfoque permitirá a Andalucía pasar de la fase de observación a la de protagonismo activo, convirtiendo su potencial en un elemento diferenciador dentro del mapa cuántico español y europeo.



4.3

Casos de uso y aplicaciones estratégicas en Andalucía

El potencial de las tecnologías cuánticas se materializa en casos de uso que vinculan la ciencia con la empresa, la innovación con los servicios públicos y la formación con la creación de valor económico y social. En Andalucía, la convergencia entre una sólida base científica, una red industrial diversificada y la disponibilidad de infraestructuras tecnológicas avanzadas permite identificar sectores prioritarios donde las tecnologías cuánticas pueden tener un impacto transformador a corto y medio plazo.

Los casos de uso que se presentan a continuación ilustran aplicaciones estratégicas alineadas con las líneas prioritarias de esta estrategia: infraestructuras, orquestación del ecosistema, aceleración de la comercialización y formación de talento.

Energía y sostenibilidad

La computación y la simulación cuánticas ofrecen herramientas disruptivas para optimizar los procesos de generación, almacenamiento y distribución de energía. En Andalucía –región líder en energías renovables y transición ecológica– estas tecnologías pueden emplearse para:

- Simular materiales avanzados para baterías de estado sólido y células fotovoltaicas de nueva generación.
- Optimizar redes eléctricas inteligentes, integrando datos en tiempo real y reduciendo pérdidas de transmisión.
- Predecir la producción renovable mediante algoritmos cuánticos híbridos (quantum-classical) aplicados a grandes volúmenes de datos meteorológicos y de consumo.

Estos desarrollos contribuirán a la neutralidad climática y reforzarán el liderazgo de Andalucía en energía verde.

Salud, biomedicina y fármacos

El ecosistema sanitario andaluz –con polos como el PTS de Granada o el Instituto de Biomedicina de Sevilla– ofrece un entorno idóneo para la aplicación de la computación cuántica y la sensórica avanzada.

Entre las oportunidades más relevantes destacan:

- Simulación cuántica de interacciones moleculares, acelerando el descubrimiento de fármacos y terapias personalizadas.
- Sensores cuánticos biomédicos para la detección temprana de patologías mediante resonancia magnética de ultra alta resolución o detección óptica no invasiva.
- Modelos predictivos cuánticos para el análisis de datos genómicos y epidemiológicos, aplicados a la medicina personalizada y la salud pública.

Agroalimentario y gestión del agua

La agricultura de precisión y la gestión eficiente de los recursos hídricos constituyen ejes estratégicos para la economía andaluza. Las tecnologías cuánticas pueden impulsar:

- Sensores cuánticos para monitorización del suelo y detección de contaminantes, permitiendo ajustar el riego y los fertilizantes con precisión atómica.

- Optimización logística de la cadena agroalimentaria mediante algoritmos cuánticos de optimización combinatoria que reduzcan desperdicios y emisiones.
- Modelos predictivos híbridos para gestionar la disponibilidad de agua en escenarios de sequía prolongada, integrando datos climáticos y satelitales.

Logística, transporte y puertos inteligentes

Andalucía, con enclaves estratégicos como el Puerto de Algeciras, puede convertirse en un referente europeo en la aplicación de tecnologías cuánticas a la logística y el transporte:

- Optimización cuántica de rutas y cargas en puertos y redes de transporte multimodal, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo costes energéticos.
- Sensores cuánticos de navegación que permitan sistemas de posicionamiento independientes del GPS, esenciales para la seguridad y el transporte autónomo.
- Simulación cuántica de flujos logísticos en tiempo real, integrando inteligencia artificial para la toma de decisiones dinámica.

Aeroespacial y defensa

El sector aeroespacial andaluz –con empresas tractoras en Sevilla, Cádiz y Huelva– tiene un elevado potencial de adopción cuántica:

- Comunicaciones cuánticas seguras para sistemas satelitales y defensa, en coordinación con la red europea EuroQCI.
- Radares y sensores cuánticos para navegación inercial de alta precisión y detección avanzada.
- Simulación cuántica de materiales ultraligeros para aeronáutica y exploración espacial.

Ciberseguridad y administración pública

La transición hacia la criptografía postcuántica (PQC) es esencial para garantizar la seguridad de las infraestructuras digitales de la región:

- Implementación progresiva de estándares PQC en los sistemas de la Junta de Andalucía y sus agencias.
- Pilotos de redes cuánticas de comunicaciones entre universidades, centros de datos y organismos públicos.
- Formación especializada en seguridad cuántica para técnicos de la administración y empresas TIC regionales.
- Desarrollo de una estrategia de quantum-safe transition para proteger datos críticos presentes y futuros, asegurando la migración ordenada de los sistemas digitales frente a amenazas cuánticas.

Estos casos de uso representan vectores de transformación económica y social que pueden posicionar a Andalucía como una Zona Europea de Innovación Cuántica, en coherencia con la visión del Andalucía Quantum Hub.

El desarrollo coordinado de estos proyectos demostrará la capacidad de la región para convertir el conocimiento cuántico en valor añadido, empleo cualificado y liderazgo tecnológico en el sur de Europa.



Ilustración 18.
Casos de uso por sector.

4.4

Percepción y preparación actual de los agentes andaluces

Esta sección recoge las principales conclusiones derivadas de las entrevistas realizadas a empresas, centros tecnológicos, instituciones científicas y entidades de apoyo a la innovación de Andalucía. El propósito de este trabajo fue conocer su nivel de conocimiento sobre las tecnologías cuánticas, su percepción acerca del potencial de estas tecnologías, las barreras que identifican y su disposición a participar en la futura transición cuántica.

Las conversaciones muestran un ecosistema con una actitud abierta y receptiva hacia la innovación, aunque todavía en una fase inicial de conocimiento y adopción. Las organizaciones entrevistadas reconocen que las tecnologías cuánticas representan una oportunidad transformadora comparable a la de la inteligencia artificial, pero señalan que su madurez técnica actual y su falta de accesibilidad dificultan su implantación inmediata. Existe, no obstante, un interés generalizado en comprenderlas y comenzar a explorar aplicaciones concretas en los próximos años.

El grado de conocimiento es desigual. Mientras los centros de investigación y tecnológicos muestran una comprensión avanzada de las distintas ramas cuánticas –computación, sensórica, comunicaciones y criptografía–, la mayoría del tejido empresarial solo identifica la computación cuántica como la cara visible de este nuevo paradigma. Esta visión parcial, centrada en el ordenador cuántico, limita la percepción de oportunidades en ámbitos donde Andalucía ya dispone de capacidades, como la simulación de materiales, la sensórica avanzada, la logística o la ciberseguridad.

La mayoría de los agentes coincide en que las primeras aplicaciones prácticas en la región podrían producirse en áreas como la seguridad y la criptografía postcuántica, la optimización logística y energética, la simulación de materiales en investigación avanzada o la sensórica aplicada a la industria agroalimentaria y sanitaria. Estos sectores se consideran estratégicos tanto por su peso económico en Andalucía como por su potencial de innovación tecnológica.

A partir de las entrevistas, se identifican una serie de obstáculos comunes que actualmente dificultan el avance de la cuántica en Andalucía:

1. Falta de profesional formado: todas las organizaciones señalan la carencia de personal capacitado como la principal limitación.

2. Desconocimiento general y escasa divulgación: las tecnologías cuánticas siguen siendo poco comprendidas fuera del ámbito académico.
3. Percepción de inaccesibilidad tecnológica y alto coste: muchas empresas, especialmente Pymes, consideran que la cuántica aún pertenece al dominio de grandes corporaciones o centros de investigación.
4. Falta de instrumentos de apoyo e incentivos específicos: se reclama la creación de convocatorias, programas piloto y modelos de compra pública innovadora que impulse la experimentación y reduzcan el riesgo inicial para las empresas.
5. Escasa coordinación entre actores del ecosistema: la fragmentación entre universidades, centros tecnológicos y tejido empresarial dificulta el intercambio de conocimiento y la identificación de proyectos conjuntos.

Estas barreras no reflejan desinterés, sino un contexto en el que la tecnología aún no ha alcanzado la masa crítica necesaria para integrarse en la actividad productiva regional.

Las organizaciones coinciden en que la transición cuántica debe comenzar por la formación y la sensibilización social, desarrollando programas educativos y de capacitación técnica que abarquen todos los niveles: desde la educación secundaria hasta la formación profesional, universitaria y empresarial. También se resalta la necesidad de fortalecer los vínculos entre universidades, centros tecnológicos y empresas para fomentar la transferencia de conocimiento.

Las entrevistas reflejan un consenso general sobre el camino a seguir: priorizar la educación, fomentar la cooperación público-privada y promover proyectos aplicados que permitan validar las primeras soluciones cuánticas en entornos reales. Andalucía dispone de capacidades científicas e industriales relevantes, pero necesita coordinarlas bajo una estrategia que convierta el interés actual en resultados tangibles.

En conjunto, la visión del ecosistema andaluz es la de una región preparada para avanzar si se articulan los medios adecuados. La comunidad científica y tecnológica coincide en que el liderazgo no se logrará por la posesión de infraestructuras, sino por la creación de talento y conocimiento compartido. El desarrollo de una fuerza laboral “quantum ready” y la consolidación de un ecosistema colaborativo serán los pilares que permitan a Andalucía situarse entre las regiones europeas de referencia en tecnologías cuánticas.

05

Andalucía en un análisis estratégico global de las tecnologías cuánticas

Las tecnologías cuánticas están transitando rápidamente desde la investigación fundamental hacia un espacio de aplicación industrial y geopolítica. La aceleración global en inversión, regulación, estandarización y despliegue tecnológico las convierte en un vector estratégico comparable a la inteligencia artificial o las telecomunicaciones avanzadas. Este análisis ofrece una visión crítica de las dinámicas que definirán la evolución del sector en la próxima década, identificando oportunidades y riesgos para regiones emergentes como Andalucía.



Andalucía for Quantum

5.1

Dinámicas tecnológicas y de mercado (2025-2035)

El periodo 2025-2035 será testigo de una profunda transformación tecnológica, con las tecnologías cuánticas traspasando la frontera del laboratorio y entrando progresivamente en dinámicas industriales y comerciales avanzadas. La rápida evolución en las diferentes áreas de las tecnologías cuánticas está redefiniendo procesos productivos y modelos de negocio, permitiendo que sectores sin infraestructura propia accedan a recursos cuánticos a través de servicios en la nube y arquitecturas híbridas con supercomputación e inteligencia artificial.

Este escenario de maduración y diversificación abre nuevas oportunidades para regiones emergentes, capaces de posicionarse en nichos industriales altamente especializados.

a. Transición del laboratorio al mercado

Las tres ramas cuánticas —computación y simulación, comunicación y seguridad, y sensórica— evolucionan a velocidades distintas. Mientras la computación universal continúa enfrentando retos de escalabilidad y corrección de errores, los sensores cuánticos, la simulación química y la criptografía postcuántica están alcanzando niveles de madurez que permiten su adopción temprana por parte de industrias y administraciones públicas. En este sentido, es de vital importancia entender dónde existen capacidades en la región andaluza para crear un entorno dinámico para nuevas empresas y proyectos derivados, que convierta la investigación en empresas listas para el mercado.

b. Consolidación del modelo “cuántica como servicio (QaaS)”

Los grandes proveedores tecnológicos están impulsando plataformas en la nube que democratizan el acceso a recursos cuánticos. Este modelo favorece la entrada de regiones sin hardware propio, pero también genera dependencia tecnológica, especialmente en computación y software especializado. En Andalucía se están explotando ecosistemas de acceso a hardware cuántico, especialmente de computación y simulación, pero se necesita una coordinación de esfuerzos con un objetivo común: que la región se convierta en un hub imprescindible para acceder a la infraestructura.

c. Integración con supercomputación e IA

La tendencia dominante es el desarrollo de arquitecturas híbridas que combinan HPC, inteligencia artificial y recursos cuánticos. La cuántica no sustituye a la computación clásica, sino que la complementa como acelerador especializado, lo cual abre oportunidades para centros de supercomputación regionales. Ya que la región dispone de ejemplos relevantes de supercomputación como el Centro de Informática Científica de Andalucía (CICA) con el Hércules en Sevilla, el Centro de Supercomputación y Bioinnovación (SCBI) de la UMA y el superordenador ALBAICÍN de la UGR, sería esencial una red estratégica entre estos puntos y los actuales y futuros ordenadores cuánticos en la región.

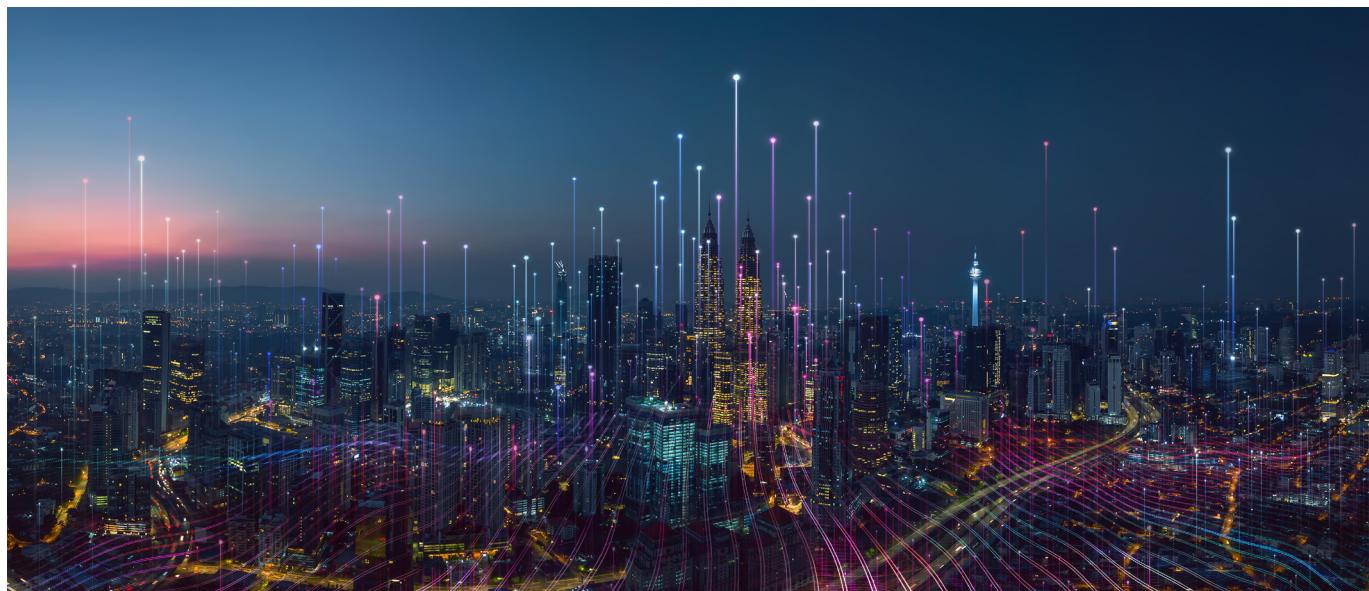
d. Fragmentación institucional y falta de estándares

La falta de marcos unificados en software, interoperabilidad, certificación y regulación dificulta el despliegue de aplicaciones industriales, especialmente para pymes. La coordinación regional y nacional será clave en los próximos años, y Andalucía debe formar parte de los círculos de decisión a nivel nacional e internacional.



5.2

Riesgos estratégicos y desafíos globales



La aceleración del desarrollo cuántico implica también retos estratégicos globales, siendo la seguridad digital y la autonomía tecnológica dos de los principales focos de preocupación. El fenómeno "Harvest Now, Decrypt Later" subraya la urgencia de adoptar criptografía postcuántica en infraestructuras críticas, mientras la dependencia internacional de hardware y la escasez de talento ponen en riesgo la capacidad de innovación y la soberanía tecnológica de regiones emergentes. Además, la falta de marcos regulatorios y estándares interoperables añade complejidad al despliegue industrial de aplicaciones cuánticas, especialmente para pymes y ecosistemas en desarrollo.

a. Seguridad y el riesgo HNDL (Harvest Now, Decrypt Later)

Actores estatales y criminales ya están almacenando datos cifrados para descifrarlos en el futuro mediante ordenadores cuánticos avanzados. Esta amenaza acelera la necesidad de adoptar criptografía postcuántica (PQC) e infraestructuras de comunicación cuántica seguras en organismos públicos y sectores críticos. En muchos países ya se han establecido estrategias y directrices para la transición a la seguridad cuántica³⁷⁻³⁸⁻³⁹⁻⁴⁰⁻⁴¹. Aquí es importante que Andalucía como región empiece a hacer un borrador de esta transición, vital tanto para el gobierno y otros organismos públicos como para las empresas.

b. Dependencia internacional en hardware crítico

Europa depende en gran medida de proveedores externos en superconductores, fotónica integrada, semiconductores especializados y otros elementos críticos de la cadena de suministro para las tecnologías cuánticas. Esta dependencia podría limitar la autonomía tecnológica del continente y las capacidades de innovación de regiones emergentes. Lo mismo le pasaría a Andalucía si no empezase a desarrollar su propio ecosistema para posicionarse en el mercado de esta revolucionaria tecnología.

c. Escasez global de talento

El talento cuántico es altamente especializado y se concentra en pocos polos globales. Sin políticas activas de formación, atracción y retención, regiones como Andalucía corren el riesgo de quedar relegadas a roles periféricos en la economía cuántica. Convertir a la región en un centro de educación cuántica y talento, que atrae y retiene el capital humano es necesario para que el ecosistema prospere.

d. Fragmentación institucional y falta de estándares

La falta de marcos unificados en software, interoperabilidad, certificación y regulación dificulta el despliegue de aplicaciones industriales, especialmente para pymes. La coordinación regional y nacional será clave en los próximos años, y Andalucía debe formar parte de los círculos de decisión a nivel nacional e internacional.

37. <https://www.cyber.gc.ca/en/guidance/roadmap-migration-post-quantum-cryptography-government-canada-itsm40001>

38. <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-accessible-webpage>

39. <https://www.gub.uy/agencia-gobierno-electronico-sociedad-informacion-conocimiento/comunicacion/publicaciones/estrategia-nacional-ciberseguridad-2024-2030-0>

40. <https://www.cyber.gov.au/business-government/secure-design/planning-for-post-quantum-cryptography>

41. <https://www.dhs.gov/quantum>

5.3

Oportunidades estratégicas para regiones emergentes

A pesar de los riesgos, el avance de las tecnologías cuánticas abre ventanas de oportunidad únicas para regiones en proceso de desarrollo tecnológico. El impacto transversal en sectores estratégicos y el acceso a fondos europeos o programas internacionales facilitan la creación de polos territoriales de innovación y la atracción de inversiones. La adopción temprana de soluciones cuánticas, como la criptografía postcuántica y la sensórica avanzada, puede convertir a estas regiones en referentes globales para la experimentación y el crecimiento económico sostenible en la era cuántica. Para ello, es imprescindible una alineación y estructura conjunta de los diferentes grupos de interés en el ecosistema andaluz con claras directrices.

a. Aplicaciones sectoriales de alto impacto.

Las tecnologías cuánticas presentan un potencial transformador en sectores donde Andalucía ya destaca:

- Energías renovables y redes inteligentes
- Aeroespacial y defensa
- Agroalimentario y gestión del agua
- Logística y transporte
- Industria química y materiales
- Salud y biomedicina

La cuántica permitirá optimizar procesos, acelerar simulaciones científicas, mejorar diagnósticos y reforzar la ciberseguridad. Con una estructura de concienciación se formará a las empresas interesadas en su camino cuántico entendiendo el potencial de estas tecnologías en su sector y con claras hojas de ruta.

b. Oportunidad para crear nuevos polos territoriales.

Regiones emergentes pueden posicionarse como zonas piloto para la adopción temprana de PQC, sensórica avanzada o infraestructura cuántica híbrida. Este enfoque favorece la captación de inversión y el desarrollo de startups deep tech.

c. Aumento de fondos europeos y colaboración internacional.

Programas como la Quantum Flagship, EuroQCI, Digital Europe o Horizon Europe facilitarán el acceso a financiación para proyectos de investigación, infraestructuras y comercialización.

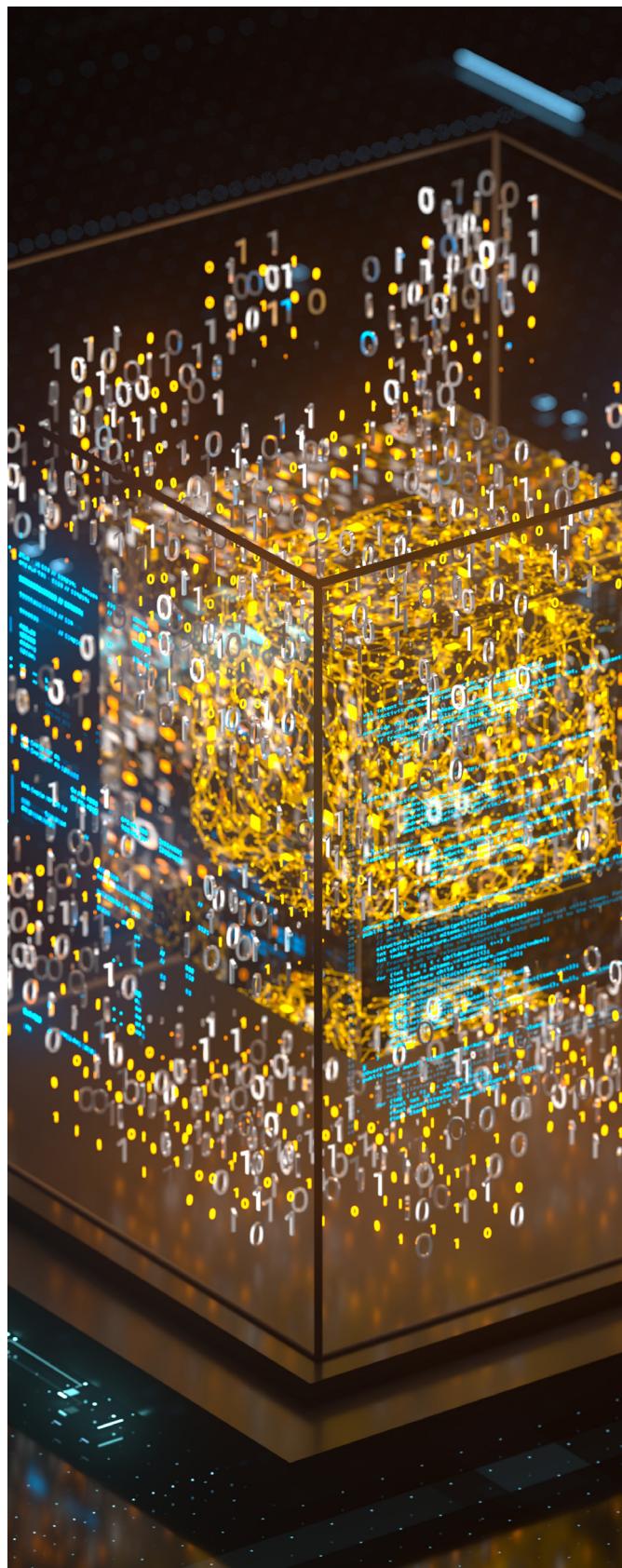
d. Gobernanza y colaboración estratégica en el ecosistema andaluz.

Para que Andalucía aproveche plenamente las oportunidades de las tecnologías cuánticas, es imprescindible una estructura colaborativa y alineada entre los diferentes grupos de interés: administración pública, industria, universidades y centros de investigación. La creación de espacios de gobernanza y comunicación eficaz facilitará la definición de directrices estratégicas y el seguimiento de resultados, integrando pilotos de alto impacto, asociaciones público-privadas y acceso directo a redes internacionales.

Esta gobernanza permitirá coordinar la formación especializada, la inversión y el desarrollo de casos de uso sectoriales (energía, industria química, salud, ciberseguridad, etc.), fomentando la innovación y la captación de talento local.

Una estructura conjunta y flexible favorecerá la interoperabilidad de soluciones, la adaptación a estándares globales y la respuesta rápida ante retos y cambios tecnológicos.

Así, Andalucía podrá posicionarse como polo de referencia en la experimentación y el despliegue de tecnologías cuánticas, participando activamente tanto en la captación de fondos europeos como en la generación de nuevas oportunidades para el tejido empresarial regional.



06

Estrategia cuántica de Andalucía

El avance hacia la economía cuántica exige una visión regional coordinada que impulse la investigación, la innovación y la aplicación industrial de estas tecnologías. La Estrategia Cuántica de Andalucía establece el marco para desarrollar capacidades propias, conectar con las redes nacionales y europeas y transformar el potencial científico e industrial de la región en liderazgo tecnológico.

La Estrategia define una visión común, unos principios rectores y unas líneas de acción que permitirán acelerar la transición cuántica en Andalucía, generando talento, atrayendo inversión y creando nuevas oportunidades económicas en sectores estratégicos.



6.1

Visión, principios y objetivos generales

La Estrategia Cuántica de Andalucía constituirá el marco de referencia para guiar la transición de la región hacia la economía cuántica, articulando los esfuerzos de investigación, innovación, formación y colaboración empresarial. Su propósito es consolidar una base científica y tecnológica sólida, aprovechar las capacidades industriales existentes y fomentar la participación activa de Andalucía en los programas nacionales y europeos vinculados a las tecnologías cuánticas.

Esta Estrategia se alinea con la Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas 2025–2030, así como con las iniciativas europeas Quantum Flagship, EuroQCI y EuroHPC, integrando los objetivos de digitalización avanzada definidos en la Agenda Digital de Andalucía y en la Estrategia Andaluza de Inteligencia Artificial 2030⁴².

La visión a largo plazo es que Andalucía se consolide como un territorio con capacidad científica, industrial y formativa suficiente para participar de forma activa y competitiva en el desarrollo de las tecnologías cuánticas en Europa, impulsando la innovación, la sostenibilidad y la creación de empleo de alta cualificación.

Principios rectores

La Estrategia se rige por los siguientes principios fundamentales:

- Coordinación institucional: Integración de esfuerzos entre la Junta de Andalucía, las universidades, los centros de investigación y las empresas tecnológicas, bajo la coordinación de la Agencia Digital de Andalucía.
- Alineamiento con políticas nacionales y europeas: sinergia con la Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas, el EU Quantum Act⁴³ e infraestructuras como EuroQCI o Quantum Internet Alliance.
- Enfoque multisectorial: Aplicación transversal de las tecnologías cuánticas a sectores estratégicos andaluces como la energía, la aeronáutica, la agroindustria, la salud o la logística.
- Desarrollo territorial equilibrado: Aprovechamiento de la diversidad industrial y científica de las provincias andaluzas para crear nodos complementarios de innovación.
- Transferencia y sostenibilidad: Orientación hacia la transferencia efectiva de conocimiento y el desarrollo de capacidades sostenibles a largo plazo.

Objetivos estratégicos

- Crear un ecosistema cuántico andaluz conectado con las redes nacionales e internacionales.
- Impulsar la investigación aplicada y la transferencia tecnológica en las ramas cuánticas con mayor impacto potencial.
- Desarrollar infraestructuras de experimentación, formación y validación en tecnologías cuánticas.
- Promover la formación de talento especializado y la atracción de investigadores y empresas.
- Fomentar la cooperación público-privada para transformar la capacidad científica en innovación industrial.

42. <https://www.juntadeandalucia.es/organismos/ada/estructura/transparencia/planificacion-evaluacion-estadistica/planes/detalle/427612.html>

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

Una visión de innovación y liderazgo

Además de consolidar una base científica y tecnológica sólida, Andalucía aspira a convertirse en un entorno de innovación, comercialización y emprendimiento cuántico, donde la investigación y el desarrollo se traduzcan en soluciones aplicadas, nuevos modelos de negocio y generación de valor económico.

La Estrategia promoverá la creación de un ecosistema capaz de acelerar la transferencia de conocimiento hacia el mercado, impulsar la aparición de startups y empresas deep tech, y atraer inversión y talento internacional.

De este modo, Andalucía no solo participará en la revolución cuántica desde la investigación, sino también desde la industria, la innovación y el liderazgo empresarial, posicionándose como un referente del sur de Europa en la nueva economía cuántica.



6.2

Líneas estratégicas

La Estrategia Cuántica de Andalucía se estructurará en torno a cuatro líneas estratégicas fundamentales, concebidas para impulsar de forma coordinada la infraestructura, la orquestación del ecosistema, la transferencia y comercialización empresarial, y la formación de talento especializado.

Estas líneas conforman el marco operativo que permitirá a la región consolidarse como un referente europeo en innovación cuántica, conectando la investigación con la industria y con el desarrollo económico sostenible.

Andalucía aspira a convertirse en una Zona Europea de Innovación Cuántica reconocida a nivel mundial, capaz de impulsar el descubrimiento científico, el desarrollo tecnológico, la creación de talento y la generación de valor económico en torno a las tecnologías cuánticas.

La Estrategia promueve una visión integradora y aplicada, en la que la investigación, la innovación y la industria se refuerzan mutuamente, acelerando la transición de la ciencia cuántica hacia aplicaciones reales y al éxito comercial. Este enfoque situará a Andalucía como referente europeo en la nueva economía cuántica, contribuyendo a la autonomía tecnológica de España y a la competitividad global del continente.

Línea 1. Infraestructuras cuánticas

El desarrollo de infraestructuras de vanguardia constituye la base del ecosistema cuántico andaluz. Esta línea tiene como objetivo dotar a la región de capacidades propias de investigación, experimentación y fabricación en tecnologías cuánticas, garantizando el acceso de la comunidad científica y empresarial a equipamientos de alto nivel tanto en hardware como en software.

Aspirar a una posición relevante dentro de la cadena europea de valor cuántica –desde la generación de materiales y componentes hasta la integración de sistemas y dispositivos– es esencial para que Andalucía se consolide como hub de innovación cuántica en el sur de Europa.

Objetivos específicos:

- Crear una red de infraestructuras cuánticas regionales abiertas, integradas en los programas nacionales y europeos.
- Reducir las barreras de entrada a la I+D mediante espacios de experimentación compartidos y plataformas de prototipado rápido.
- Potenciar la capacidad de fabricación avanzada y caracterización de dispositivos cuánticos, promoviendo la innovación industrial y la transferencia tecnológica.

Actuaciones prioritarias:

1. Campus Andaluz de Tecnologías Cuánticas: creación de un espacio de referencia para la investigación y la innovación aplicada, articulado entre Granada, Málaga y Sevilla, con laboratorios de desarrollo de cíbits, circuitos fotónicos y control criogénico.

2. Laboratorios de caracterización avanzada y salas blancas: instalación de entornos de fabricación compartidos en colaboración con universidades y parques tecnológicos (PTA, Cartuja, PTS).
3. Integración de capacidades de supercomputación híbrida: conexión de los recursos del CICA, la Universidad de Granada y la Universidad de Málaga con las redes Quantum Spain y EuroHPC, para facilitar el acceso a infraestructuras cuánticas distribuidas.
4. Impulso de instalaciones piloto para el diseño, fabricación y validación de componentes cuánticos (procesadores, sensores, láseres, circuitos fotónicos y electrónica de control).
5. Parque industrial cuántico andaluz: establecimiento de un entorno empresarial especializado en los parques tecnológicos andaluces para la producción de pilotos y escalado de tecnologías emergentes, con espacios de coworking y servicios de apoyo a startups y pymes tecnológicas.
6. Cadena de suministro cuántica local: atracción y consolidación de proveedores tecnológicos (microelectrónica, óptica, criogenia, materiales avanzados) para fortalecer la independencia tecnológica y la competitividad regional.

Resultados esperados:

- Creación de al menos tres infraestructuras regionales conectadas con redes nacionales y europeas antes de 2030.
- Instalación de un parque industrial con capacidad de prototipado
- Integración de Andalucía en la cadena de valor europea de fabricación cuántica a través de los programas EuroHPC, Quantum Flagship y PERTE Chip⁴⁴.

Estas infraestructuras no sólo fortalecerán la investigación científica, sino que actuarán como motor de desarrollo industrial, facilitando la colaboración entre universidades, centros tecnológicos y empresas, y posicionando a Andalucía como un territorio clave para la experimentación, producción y comercialización de tecnologías cuánticas en Europa.

Línea 2. Orquestación del ecosistema

La coordinación estratégica es un elemento esencial para consolidar el ecosistema cuántico andaluz. Esta línea persigue la creación de una estructura de gobernanza, colaboración y proyección internacional que conecte a la administración pública, la comunidad científica, el tejido empresarial y los inversores en torno a una visión común de desarrollo cuántico.

El eje principal de esta línea será el Andalucía Quantum Hub (AQH), un centro regional de referencia encargado de articular el ecosistema cuántico andaluz y de representar a la región ante las redes nacionales e internacionales, como Quantum Spain, EuroQCI y Quantum Flagship.

El AQH estará coordinado por la Agencia Digital de Andalucía (ADA) y contará con la participación de universidades, centros tecnológicos, parques científicos y asociaciones empresariales. Este Hub actuará como ventanilla única para la coordinación de proyectos, el asesoramiento técnico y la difusión de oportunidades europeas.

44. <https://www.pertechip.com>

Actuaciones prioritarias:

1. Crear el Andalucía Quantum Hub (AQH) como nodo regional de coordinación, con sedes colaborativas en Sevilla, Granada y Málaga.
2. Establecer un Comité Andaluz de Tecnologías Cuánticas, con representantes de la Junta de Andalucía, universidades, centros tecnológicos y empresas.
3. Desarrollar un Observatorio Cuántico Andaluz encargado de recopilar datos, medir indicadores y evaluar el progreso del ecosistema.
4. Organizar un Foro Anual de Innovación Cuántica de Andalucía y eventos internacionales en colaboración con QURECA y otros socios europeos.
5. Lanzar una marca institucional "Andalucía Quantum Hub" para reforzar la proyección internacional y atraer inversión y talento.

Resultados esperados:

- Ecosistema regional articulado con estructura de gobernanza estable antes de 2027.
- Participación activa en programas europeos (EuroQCI, Quantum Flagship, EuroHPC).
- Creación de una red de al menos 50 entidades colaboradoras en Andalucía y Europa.

Línea 3.

Aceleración de la comercialización

Esta línea tiene como objetivo impulsar la transferencia de la investigación cuántica al mercado, fomentando un entorno favorable al emprendimiento, la innovación industrial y la inversión tecnológica. Andalucía debe posicionarse como un territorio de referencia para la creación y atracción de empresas deep tech cuánticas en el sur de Europa.

El enfoque se centrará en la creación de instrumentos de apoyo, incubación y financiación que permitan acelerar el paso del laboratorio a la industria, vinculando a startups, pymes tecnológicas y grandes corporaciones con el ecosistema científico.

Actuaciones prioritarias:

1. Poner en marcha el Programa Andaluz de Aceleración Cuántica, con servicios de mentoría, formación empresarial, acceso a infraestructuras y apoyo en la búsqueda de financiación.
2. Crear una Aceleradora de empresas cuánticas en colaboración con Andalucía Emprende, TRADE, ADA y los Parques Tecnológicos andaluces que se adhieran a esta iniciativa.
3. Establecer un Fondo de Capital Riesgo Cuántico Público-Privado, gestionado por la Junta de Andalucía, para impulsar startups de base tecnológica y proyectos de transferencia.
4. Promover pilotos industriales cuánticos en sectores estratégicos como energía, salud, logística y defensa, en colaboración con empresas tractoras.
5. Favorecer la internacionalización de startups cuánticas andaluzas mediante la participación en redes europeas de innovación como el EIC Accelerator.

Resultados esperados:

- Creación de al menos 5 startups cuánticas activas en Andalucía antes de 2030.
- Movilización de más de 30 millones de euros en inversión público-privada.

- Al menos 3 pilotos industriales operativos en sectores clave de la economía regional.
- Participación de empresas andaluzas en proyectos europeos de innovación cuántica.

Línea 4.

Formación de personal

El talento constituye el eje vertebrador del ecosistema cuántico. Esta línea busca formar, atraer y retener el capital humano necesario para que Andalucía pueda prosperar en la nueva economía cuántica. La Estrategia impulsará una oferta educativa integral, desde la alfabetización cuántica hasta la especialización avanzada, fomentando una fuerza laboral "quantum ready".

Objetivos:

- Integrar las tecnologías cuánticas en la educación andaluza en todos sus niveles.
- Promover programas universitarios y profesionales especializados en computación, comunicación y sensórica cuántica.
- Fomentar la divulgación y la sensibilización social en torno a la ciencia cuántica.

Actuaciones prioritarias:

1. Incorporar contenidos de alfabetización cuántica en los programas de secundaria y formación profesional, en colaboración con la Consejería de Desarrollo Educativo y Formación Profesional.
2. Desarrollar grados, másteres interuniversitarios y microcreenciales en información y computación cuántica en la UGR, UMA, UPO y UAL.
3. Crear cátedras universidad–empresa en colaboración con compañías tecnológicas y centros de investigación.
4. Establecer programas de movilidad internacional y formación avanzada en cooperación con QURECA, y proyectos europeos como QTIndu y DigiQ.
5. Impulsar campañas de divulgación y sensibilización social mediante museos, ferias científicas, medios de comunicación y plataformas digitales.
6. Crear una Red Andaluza de Divulgadores Cuánticos, integrando universidades, centros de investigación y asociaciones científicas.

Resultados esperados:

- Formación de al menos 500 profesionales cualificados en tecnologías cuánticas antes de 2035.
- Creación de 3 programas universitarios de posgrado y 5 microcreenciales cuánticas.
- Incorporación de contenidos cuánticos en 100 centros educativos andaluces.
- Participación activa de Andalucía en los programas europeos de capacitación en Digital Europe.

6.3

Sectores prioritarios de aplicación

La Estrategia identificará sectores estratégicos andaluces con alto potencial para la aplicación de tecnologías cuánticas, como:

- Energía y renovables: optimización de redes eléctricas inteligentes, simulación de materiales fotovoltaicos y almacenamiento avanzado.
- Aeronáutica y aeroespacial: diseño de componentes, simulación de vuelo y sistemas de navegación cuánticos.
- Agroalimentario: trazabilidad, optimización logística y mejora de procesos de producción mediante modelos predictivos cuánticos.
- Industria química y metalúrgica: simulación molecular y nuevos materiales.
- Salud y biomedicina: diagnóstico de precisión, modelado molecular y sensórica cuántica aplicada.
- Defensa y ciberseguridad: desarrollo de protocolos de comunicación y cifrado cuánticos resistentes a la computación avanzada.

6.4

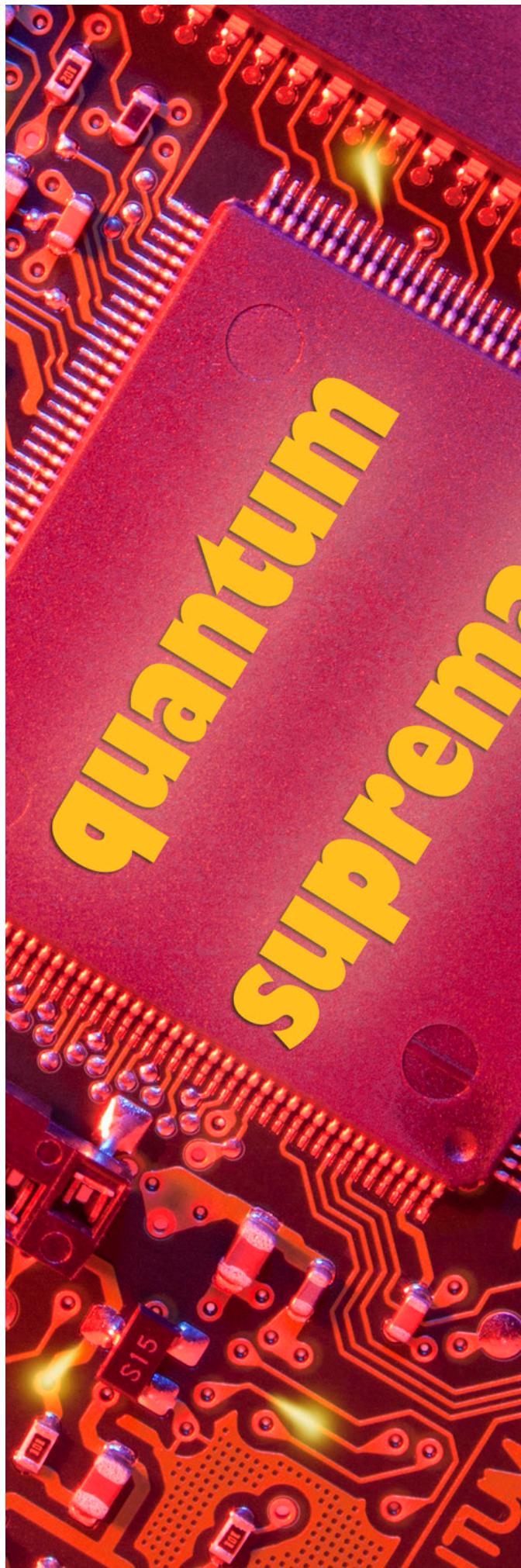
Mecanismos de financiación y seguimiento

La Estrategia identificará sectores estratégicos andaluces con alto potencial para la aplicación de tecnologías cuánticas, como:

1. Financiación pública regional: Programas específicos de la Junta de Andalucía gestionados por la Agencia Digital de Andalucía, complementados con los instrumentos del PAIDI 2030.
2. Financiación nacional y europea: Participación en iniciativas como Quantum Spain, EuroQCI, PERTE Chip y Horizon Europe, así como en fondos estructurales FEDER y FSE+.
3. Privada y colaboración público-privada: Promoción de proyectos conjuntos entre universidades, empresas y centros tecnológicos, y creación de incentivos para la atracción de capital riesgo tecnológico.

El seguimiento y la evaluación se realizarán mediante un sistema de indicadores que permite medir el progreso de la Estrategia cada dos años, abarcando:

- Inversión total movilizada
- Número de proyectos y publicaciones científicas
- Empleo y formación especializada
- Nivel de participación en redes europeas
- Impacto en innovación empresarial y en sectores estratégicos



6.5

Marco Estratégico de la Estrategia Cuántica de Andalucía

Líneas estratégicas	Objetivo	Elementos clave
Infraestructuras 	Equipar a Andalucía con capacidades de hardware y supercomputación cuántica	Campus Cuántico, salas blancas, laboratorios, fundición cuántica, HPC híbrido
Orquestación 	Crear una gobernanza estable y conexiones nacionales/UE	Andalucía Quantum Hub, comité, observatorio, redes europeas, foros y marca
Aceleración de la comercialización 	Llevar la investigación al mercado	Aceleradora, fondo de capital riesgo, pilotos industriales, internacionalización
Formación 	Construir una fuerza laboral especializada	Secundaria/FP con contenidos cuánticos, másteres, cátedras, formación para industria, movilidad internacional

VISIÓN Y PRINCIPIOS

Capacitar Andalucía científica, industrial y formativamente para ser elemento participativo y competitivo en el desarrollo de las tecnologías cuánticas.

Principios fundamentales:

- Coordinación institucional
- Alineamiento con políticas nacionales y europeas
- Enfoque multisectorial
- Desarrollo territorial equilibrado
- Transferencia y sostenibilidad

LÍNEAS ESTRATÉGICAS

- Infraestructuras cuánticas
- Orquestación del ecosistema
- Aceleración de la comercialización
- Formación de personal

SECTORES PRIORITARIOS DE APLICACIÓN

- Energía y renovables
- Aeronáutica y aeroespacial
- Agroalimentario
- Industria química y metalúrgica
- Salud y biomedicina
- Defensa y ciberseguridad

FINANCIACIÓN Y SEGUIMIENTO

- Financiación pública regional
- Financiación nacional y europea
- Privada y colaboración público-privada
- Inversión total movilizada
- Número de proyectos y publicaciones científicas
- Empleo y formación especializada
- Nivel de participación en redes europeas
- Impacto en innovación empresarial y en sectores estratégicos

07

Impacto esperado (2025–2035)

En los próximos diez años, este análisis se plantea como una hoja de ruta operativa para guiar el despliegue de tecnologías cuánticas en Andalucía, pasando de la fase exploratoria a proyectos concretos con impacto económico y social. Se priorizarán acciones en tres ejes: creación de capacidades (infraestructura, talento y centros de referencia), desarrollo de casos de uso en sectores estratégicos del territorio y puesta en marcha de mecanismos estables de financiación y colaboración público-privada. El objetivo es que, al final de la década, la región cuente con un ecosistema cuántico articulado, conectado a las principales iniciativas nacionales y europeas, y con empresas y administraciones públicas utilizando soluciones cuánticas en producción como palanca de competitividad y seguridad digital.



Andalucía for Quantum

7.1

Hoja de Ruta para la Estrategia Cuántica de Andalucía

A continuación se detalla una potencial hoja de ruta para la futura estrategia andaluza:

2025-2027

Arranque y Estructuras Básicas

- Establecer las bases institucionales, formativas y de infraestructura.
- Constitución del Andalucía Quantum Hub (AQH)
- Creación del Comité Andaluz de Tecnologías Cuánticas.
- Desarrollo de la Estrategia de Transición Quantum-Safe en la administración.
- Conexión de Andalucía a Quantum Spain y EuroQCI España.
- Lanzamiento de los primeros programas formativos (microcredenciales, másteres interuniversitarios).
- Diseño del Campus Andaluz de Tecnologías Cuánticas.
- Primeros pilotos PQC en organismos públicos.
- Inicio del mapeo completo del ecosistema cuántico regional.

2028-2030

Consolidación de Infraestructuras y Ecosistema

- Desplegar capacidades avanzadas y estimular la actividad empresarial.
- Creación del Campus Cuántico (Granada, Málaga, Sevilla).
- Construcción de laboratorios avanzados (fotónica, superconductores, salas blancas).
- Diseño y puesta en marcha de instalaciones para prototipado de componentes.
- Lanzamiento del Programa Andaluz de Aceleración Cuántica.
- Creación del Fondo de Capital Riesgo Cuántico público-co-privado.
- Primeras startups deep-tech surgidas del ecosistema universitario.
- Integración de Andalucía en EuroHPC mediante nodos híbridos HPC+QC.
- Programas de atracción de talento internacional.

2030-2033

Adopción Industrial y Proyección Europea

- Integrar las tecnologías cuánticas en sectores productivos clave.
- Despliegue de proyectos demostrativos en energía, salud, aeroespacial y logística.
- Instalación de la primera red de comunicaciones cuánticas metropolitanas.
- Despliegue de sistemas de ciberseguridad quantum-safe en toda la administración pública.
- Crecimiento del tejido empresarial cuántico local.
- Integración plena en Quantum Internet Alliance (QIA) y otros consorcios europeos.

Expansión de la formación: doctorados y cátedras cuánticas universidad-empresa.

2033-2035

Arranque y Estructuras Básicas

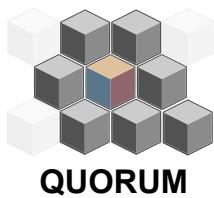
- Posicionar a Andalucía como referente europeo en innovación cuántica.
- Operación completa de las instalaciones de componentes cuánticos.
- Producción de prototipos de componentes cuánticos fabricados en Andalucía.
- Consolidación de al menos cinco startups cuánticas de impacto internacional.
- Integración total con la Internet Cuántica Europea y EuroQCI.
- Programas de transferencia cuántica en empresas industriales tractoras (energía, defensa, metalurgia).
- Evaluación de impacto del ecosistema cuántico en PIB, empleo y productividad.
- Publicación del Informe de Madurez Cuántica de Andalucía (2035).



Producido por:



Entidad editora:



www.fidesol.org
www.qureca.com/es/
www.quorumspain.eu

