

Fecha de recepción: 18/03/2025

Fecha de aceptación: 22/05/2025

Avances en computación cuántica en el Antropoceno: retos y oportunidades para Latinoamérica y el Caribe

Advances in Quantum Computing in the Anthropocene: Challenges and Opportunities for Latin America and the Caribbean

BORIS SAAVEDRA Y HERIBERTO ACOSTA

Centro de Estudios de Defensa Hemisférica "William J. Perry" (National Defense University), Estados Unidos

Saavedrab@ndu.edu

Resumen

La computación cuántica representa un cambio de paradigma en el procesamiento de información, con potencial para transformar múltiples sectores estratégicos en el contexto del Antropoceno. A medida que la inteligencia artificial generativa y los avances cuánticos redefinen la interacción humana con la tecnología, América Latina y el Caribe enfrentan desafíos y oportunidades en este ámbito emergente. Este artículo explora los fundamentos teóricos de la computación cuántica, que incluyen superposición, entrelazamiento e interferencia, así como sus aplicaciones en criptografía, simulación molecular, optimización y análisis de datos. Se analizan los desarrollos en la región y se destaca el papel de Brasil, Argentina, México y Chile en la investigación cuántica, así como

las limitaciones de financiación, infraestructura y formación de talento. Asimismo, se abordan las implicaciones geopolíticas de la computación cuántica y su impacto en la seguridad digital. Finalmente, se plantean estrategias para fomentar el crecimiento del ecosistema cuántico latinoamericano, con énfasis en la necesidad de inversión en I+D, la consolidación de marcos normativos adecuados y el fortalecimiento de la cooperación público-privada.

Palabras clave: computación cuántica — inteligencia artificial generativa — cúbits — superposición — Antropoceno — geopolítica tecnológica

Abstract

Quantum computing represents a paradigm shift in information processing, with the potential to transform multiple strategic sectors in the context of the Anthropocene. As generative artificial intelligence and quantum advances redefine human interaction with technology, Latin America and the Caribbean face challenges and opportunities in this emerging field. This article explores the theoretical foundations of quantum computing, including superposition, entanglement, and interference, as well as its applications in cryptography, molecular simulation, optimization, and data analysis. Developments in the region were analyzed, highlighting the role of Brazil, Argentina, Mexico, and Chile in quantum research, as well as the limitations of funding, infrastructure, and talent development. The geopolitical implications of quantum computing and its impact on digital security are also addressed. Finally, strategies are proposed to foster the growth of the Latin American quantum ecosystem, emphasizing the need for investment in R&D, the consolidation of appropriate regulatory frameworks, and the strengthening of public-private cooperation.

Keywords: quantum computing — generative — artificial intelligence — qubits — superposition — Anthropocene — technological geopolitics

Introducción

El Antropoceno es un concepto derivado del griego “*anthropos*”, que significa humano y “*kainos*”, que significa nuevo; fue popularizado en el año 2000 por el químico neerlandés Paul Crutzen, ganador del Premio Nobel de química en 1995. En la actualidad, se utiliza para describir el tiempo durante el cual los humanos han tenido un impacto sustancial en la evolución planetaria. Su comienzo, según el Programa Internacional Geósfera-Biosfera (IGBP por sus siglas en inglés), confirma que hay evidencias de los cambios provocados en los albores de la Revolución Industrial desde 1750, un período de rápidas innovaciones que han provocado avances en la medicina y la producción de alimentos, y otras tecnologías que han impulsado el reciente crecimiento de la población humana mundial (Benner *et al.*, 2021, p. 231).

En el presente, es posible que los seres humanos ya no sean los principales protagonistas planetarios debido a las características de la tecnología digital actual, como la inteligencia artificial generativa (IAG) y computación cuántica emergente y su impacto en los cambios de comportamiento humano, donde la mayoría de nuestras interacciones diarias no son con otras personas, sino con IAG y, en el futuro próximo, con la computación cuántica.

Max Planck, físico teórico alemán, fue quien originó la teoría cuántica, lo cual le valió el Premio Nobel de Física en 1918. Él supuso que la energía emitida por un átomo solo podría encontrarse en diminutos paquetes de energía, denominados cuantos. Para realizar ese cálculo, tuvo que introducir un número muy pequeño llamado h (constante de Planck $6,62 \times 10^{-34}$ julios segundos), de tamaño tan

increíblemente pequeño que jamás seríamos capaces de ver los efectos cuánticos en nuestro mundo. En su tiempo, esto generó una férrea oposición de sus colegas, quienes sostenían la idea clásica newtoniana de que la energía debía ser continua.

Esto se puede aplicar a una computadora. Si dejamos que h se acerque a cero, llegamos a la máquina clásica ideada por Turing (pionero de la computación e inteligencia artificial). Si h se hace más grande, comienzan a surgir efectos cuánticos y, poco a poco, convertimos la máquina clásica en una computadora cuántica. En otras palabras, las computadoras cuánticas, a diferencia de las digitales actuales, suman todos los estados cuánticos en N formas entre 0 y 1, lo que aumenta enormemente el número de estados y, por lo tanto, su alcance y potencia (de Cózar Escalante, 2019).

¿Estamos al final de la era digital?

El joven genio matemático inglés Alan Turing hizo un descubrimiento ingenioso que cambiaría el rumbo de la informática. En este sentido, se planteó: ¿existe un límite matemático a lo que una computadora mecánica puede realizar? Turing imaginó una cinta larga con una serie de cuadros o celdas; dentro de cada cuadrado, se podría poner un 0 o un 1, o se podría dejar en blanco. Esta máquina de Turing está escrita en lenguaje binario en vez de en base 10 y cuenta con una memoria para almacenar números. El resultado final sale del procesador como un número.

En otras palabras, la máquina de Turing puede tomar un número y convertirlo en otro según comandos precisos del *software*. Turing redujo las matemáticas a un juego: mediante el reemplazo sistemático del 0 por el 1 y viceversa, se podrían codificar todas las matemáticas.

En su artículo, Turing exponía estas ideas con un conjunto conciso de instrucciones que se podía usar en su máquina para realizar todas las manipulaciones de la aritmética: su-

mar, restar, multiplicar y dividir. Luego utilizó estos resultados para demostrar algunos de los problemas más difíciles de las matemáticas, que reformuló desde el punto de vista de la complejidad. De esta forma, todas las matemáticas se estaban rescribiendo desde el punto de vista del cálculo. El gran legado de Turing sigue vivo en cada computadora digital del planeta, pues su arquitectura se basa en su máquina, y el desarrollo de la economía mundial depende en gran medida del trabajo pionero de este genio de la computación digital y la inteligencia artificial (Kaku, 2023).

El trabajo de Turing se fundamenta en un concepto llamado determinismo: el futuro está determinado con antelación. Esto significa que, si se le plantea un problema a una máquina de Turing, se obtendrá siempre el mismo resultado y, por lo tanto, todo es predecible. Sin embargo, otra revolución en la comprensión del mundo echaría por tierra esta idea.

Turing ayudó a demostrar que las matemáticas son incompletas. Tal vez las computadoras del futuro sean capaces de resolver ciertos tipos de problemas más rápido que las computadoras clásicas debido a los efectos de la mecánica cuántica como la superposición y la interferencia cuántica. Entonces, los matemáticos se plantearon el siguiente interrogante: ¿es posible construir una máquina de Turing cuántica?

La computación cuántica utiliza los principios de la mecánica cuántica para llevar a cabo cálculos a unas velocidades y escalas inalcanzables para las máquinas clásicas. En la última década, el interés mundial en este campo se ha intensificado por la promesa de acelerar radicalmente el descubrimiento de fármacos, revolucionar los sistemas criptográficos y optimizar redes logísticas complejas. Aunque Estados Unidos, Europa y China dominan actualmente el panorama cuántico, América Latina ha comenzado a hacer sus propios avances. Recientemente, han surgido importantes grupos de investigación en Brasil, Argentina, México y Chile que exploran posibles aplicaciones.

La computación cuántica es un avance dramático, pues

permite procesar problemas complejos a velocidades muy superiores a las de las máquinas convencionales. La diferencia básica radica en el uso de cúbits (bits cuánticos), que pueden existir en múltiples estados al mismo tiempo mediante el fenómeno de la superposición (estar en dos estados simultáneamente) (Nielsen y Chuang, 2011). Esa capacidad de ocupar estados superpuestos, unida al entrelazamiento cuántico, habilita incrementos exponenciales en el rendimiento computacional. Durante los últimos años, gobiernos y empresas de todo el mundo han invertido recursos considerables en la investigación cuántica, con la expectativa de abrir camino a una gran disrupción tecnológica.

En resumen, hay características extraordinarias de la teoría cuántica que hacen posible la computación cuántica:

- Superposición. Antes de observar un objeto, existen muchos estados posibles. Un electrón puede estar en dos lugares al mismo tiempo. Esto aumenta exponencialmente la capacidad de la computadora al disponer de más estados para calcular.
- Entrelazamiento. Cuando dos partículas son coherentes y se separan, aún pueden influenciarse entre sí de forma instantánea. Esta interacción permite el crecimiento exponencial a medida que se agregan cúbits, que interactúan más rápido que los bits de las computadoras comunes.
- Cuando una partícula se mueve entre dos puntos, suma todas las posibilidades de caminos que conectan esos dos puntos. El camino clásico puede ser el más probable, pero todos los caminos contribuyen al resultado cuántico final.
- Efecto túnel. Normalmente, una partícula no atraviesa una barrera de energía. Sin embargo, en mecánica cuántica, existe una probabilidad pequeña pero finita de atravesarla (Kaku, 2023).

Fundamentos teóricos de la computación cuántica

En el centro de la computación cuántica se encuentran los cúbits, que contrastan con los bits binarios de los sistemas clásicos. Un cúbit no se limita a ser solo 0 o 1: gracias a la superposición, puede adoptar una combinación de ambos estados. Cuando n cúbits se entrelazan, el número de estados representables crece de forma exponencial (2^n), lo cual hace posible que los sistemas cuánticos procesen simultáneamente un espacio de soluciones enorme. A esto se le llama paralelismo cuántico y es lo que habilita incrementos de velocidad sin precedentes en ciertos problemas algorítmicos.

La superposición requiere aislar los cúbits de interferencias externas, lo cual dificulta la implementación física de los sistemas cuánticos. La decoherencia cuántica ocurre cuando los cúbits interactúan con su entorno, ya que esto hace que colapsen los estados superpuestos en resultados clásicos. Para contrarrestar este problema, la comunidad científica dedica esfuerzos a mejorar los tiempos de coherencia de los cúbits mediante materiales avanzados, enfriamiento criogénico y protocolos de corrección de errores.

El entrelazamiento permite que el estado de un cúbit se correlacione con el de otro sin importar la distancia física. Al entrelazar varios cúbits, medir uno influye en el estado de los demás y, de esta manera, se habilitan operaciones cooperativas imposibles en sistemas clásicos (Arute *et al.*, 2019). A su vez, la interferencia cuántica ajusta las amplitudes de probabilidad para reforzar las respuestas correctas y cancelar las erróneas, por lo que se incrementa la eficiencia de algoritmos como el de Grover o el de Shor. El algoritmo de Shor, en particular, puede factorizar números grandes en tiempo polinómico (Shor, 1997).

Los investigadores trabajan en estrategias de corrección de errores cuánticos para mitigar la fragilidad inherente de los cúbits. Se codifican cúbits lógicos en múltiples cúbits físicos y, de esta manera, se refuerza el sistema contra la decoherencia y las fallas operativas. Estas innovaciones son

cruciales para escalar de docenas a miles y, en el futuro, a millones de cúbits, lo que permitiría a las máquinas cuánticas sobrepasar a las supercomputadoras clásicas en un rango más amplio de problemas.

Una consecuencia seria de la computación cuántica es la relacionada con la criptografía. Muchos esquemas de cifrados modernos se basan en la dificultad de factorizar grandes números o de calcular logaritmos discretos en máquinas clásicas (NIST, 2024). Una computadora cuántica que ejecute el algoritmo de Shor podría quebrantar sistemas de cifrado muy usados (RSA, cifrado en curvas elípticas), lo que pondría en riesgo la seguridad de transacciones bancarias y comunicaciones gubernamentales. Por esta razón, se comenzó a investigar sobre criptografía resistente a la computación cuántica, con el propósito de diseñar algoritmos que puedan resistir ataques basados en tecnología cuántica.

La distribución cuántica de claves (QKD, por sus siglas en inglés) añade otra capa de seguridad; utiliza estados cuánticos para detectar cualquier intento de espionaje y, en teoría, lograr canales de comunicación inviolables. Sin embargo, su aplicación requiere infraestructuras ópticas especializadas y es difícil de escalar a largas distancias sin repetidores cuánticos. Para los países latinoamericanos interesados en proteger infraestructuras críticas (redes eléctricas, bases de datos financieras, etc.), la seguridad cuántica se perfila como un imperativo estratégico cada vez más claro.

Computación cuántica e inteligencia artificial generativa

El Proyecto de Investigación de Dartmouth sobre Inteligencia Artificial (1956) se considera el evento fundador de la IA como disciplina. Reunió a importantes pensadores, entre ellos John McCarthy, Marvin Minsky, Claude Shannon y Nathaniel Rochester, con el objetivo de trazar los posibles caminos de la investigación futura. La propuesta audaz señalaba: "Se

intentará encontrar cómo hacer que las máquinas utilicen el lenguaje, formen abstracciones y conceptos, resuelvan tipos de problemas ahora reservados a los humanos y mejoren en sí mismas” (Chiu, 2024).

El profesor Marvin Minsky consideró que, con el tiempo, la inteligencia de una máquina podría igualar a la humana. Los medios anunciaban la inminente llegada de robots capaces de aliviar el trabajo doméstico y de usarse en defensa militar. Sin embargo, los resultados tardaron más de lo esperado, lo que dio lugar a una etapa conocida como el “invierno de la inteligencia artificial”. Con el tiempo, se entendió que la IA exigía muchísimo más trabajo e inversión de lo previsto, por lo que se redujo notablemente el financiamiento y el interés de los inversores.

En la actualidad, la llegada de la inteligencia artificial generativa (IAG) ha cambiado la visión: nos encontramos ante un conjunto de caminos divergentes y, a veces, conflictivos. Una vía prometedora es la convergencia entre la IAG y la computación cuántica, ya que las computadoras cuánticas podrían ofrecer la capacidad computacional necesaria para la IAG, mientras que esta podría acelerar los descubrimientos en computación cuántica. Sundar Pichai (Google) lo sintetizó de la siguiente manera: “La IAG puede acelerar la computación cuántica y la computación cuántica puede acelerar la IAG” (Kaku, 2023, p. 6).

El panorama cuántico emergente en América Latina

En comparación con las principales potencias mundiales, América Latina tiene una menor presencia en la producción científica global. Sin embargo, cuenta con una sólida tradición en física, matemáticas e ingeniería, lo que la convierte en un terreno potencial para la innovación cuántica. Países como Brasil, Argentina, México y Chile han desarrollado centros de investigación cuántica que empiezan a ser reconocidos. No obstante, la falta de inversión, los problemas es-

tructurales y la emigración de talento amenazan con minar la competitividad de la región (Dirección Nacional de Políticas y Planificación, 2021). A pesar de estas dificultades, las aspiraciones de América Latina crecen a medida que los gobiernos y el sector privado reconocen que la computación cuántica podría aportar de forma considerable al desarrollo económico, la seguridad nacional y el prestigio científico.

Los proyectos de computación cuántica en América Latina datan de la segunda mitad del siglo XX, enfocados al principio en estudios teóricos en universidades con tradición en física. La financiación era escasa y la investigación se limitaba por la falta de laboratorios y de grandes grupos de expertos. Con el tiempo, el debate político comenzó a adoptar la perspectiva global de que la computación cuántica trasciende lo meramente teórico y ofrece aplicaciones prácticas y estratégicas (Dirección Nacional de Políticas y Planificación, 2021).

El liderazgo de Brasil

Brasil se destaca por una infraestructura de investigación cuántica relativamente avanzada. El grupo de computación cuántica del Laboratorio Nacional de Computación Científica en Petrópolis lidera proyectos sobre algoritmos cuánticos y modelado teórico. La Universidad Federal del ABC en São Paulo alberga el grupo de ciencia y tecnología de la información cuántica, que integra físicos, informáticos e ingenieros (INCT-IQ, 2025). El Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología de Información Cuántica de Brasil apoya proyectos en los que colaboran diversas universidades.

A pesar de las restricciones financieras, el gobierno brasileño mantiene un compromiso continuo con la investigación cuántica mediante la organización de encuentros internacionales y la publicación en revistas de alto impacto.

La sólida tradición en física de Argentina y su agenda cuántica

Argentina cuenta con una trayectoria sólida en física teórica e ingeniería. Instituciones como la Universidad Nacional de Córdoba, el Instituto Balseiro y la Universidad de Buenos Aires han contribuido en campos como óptica cuántica, fundamentos de la mecánica cuántica y teoría de la información cuántica (Dirección Nacional de Políticas y Planificación, 2021). Con la creación del Programa Interinstitucional para el Fortalecimiento de las Ciencias y Tecnologías Cuánticas, Argentina busca centralizar fondos y dirigirlos a sectores estratégicos, e impulsar aplicaciones que van desde la criptografía hasta la simulación cuántica de materiales complejos.

La transición de México de la teoría a las aplicaciones

En México, la computación cuántica ha pasado de ser una línea fundamentalmente teórica a buscar usos prácticos. Grupos de investigación de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) trabajan en las áreas de óptica y algoritmos cuánticos, y en alianzas con empresas. El interés empresarial se concentra en campos como la banca y las telecomunicaciones, donde la computación cuántica podría transformar profundamente la gestión de riesgos y la estrategia financiera (Maldonado-Romo *et al.*, 2024).

El enfoque multidisciplinario de Chile

Chile, reconocido por sus colaboraciones científicas en astronomía, aplica ahora un enfoque interdisciplinario a la investigación cuántica. La Universidad Mayor en Santiago creó un Centro Multidisciplinario de Física que integra la ciencia

de materiales, física computacional e información cuántica (Universidad Mayor, 2025). Aunque su ecosistema cuántico es más pequeño que el de Brasil o Argentina, la disposición a combinar disciplinas abre la puerta a aplicaciones innovadoras. El gobierno chileno ve en la tecnología cuántica una oportunidad de diversificación económica y colabora con consorcios internacionales para la capacitación de profesionales.

Participación gubernamental, académica y del sector privado

Los gobiernos de América Latina han empezado a reconocer que la computación cuántica puede potenciar tanto el desarrollo tecnológico como la posición geopolítica. Varios países han promulgado planes de ciencia y tecnología que incluyen de forma explícita la investigación cuántica. El Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2030 de Argentina menciona la información cuántica como un tema estratégico (Dirección Nacional de Políticas y Planificación, 2021). Brasil y México han adoptado lineamientos similares.

Aun así, la computación cuántica compite por fondos con problemas urgentes de la región, tales como salud y educación. Por ello, muchos proyectos recurren a asociaciones externas para compensar la falta de recursos, en colaboración con la Fundación Nacional de Ciencias (NSF) de Estados Unidos o la Unión Europea. De esta manera, centros de América Latina pueden acceder a equipos de última generación y formación especializada.

Liderazgo académico y el papel de las universidades

Las universidades son una pieza clave para la innovación cuántica. Algunas han creado programas de posgrado en teo-

ría cuántica, algoritmos y materiales cuánticos, lo cual ha impulsado la formación de investigadores especializados (IBM, 2025). Congresos, talleres y cursos especializados se han convertido en espacios de encuentro entre investigadores latinoamericanos e internacionales.

Participación del sector privado: oportunidades y brechas

Aunque el sector privado de la región invierte menos que el de regiones más desarrolladas, ciertas áreas muestran un creciente interés:

- Finanzas: algoritmos cuánticos para la optimización de carteras y estrategias de trading.
- Agroindustria: simulaciones cuánticas de suelos y clima.
- Salud y biotecnología: modelos cuánticos para acelerar el descubrimiento de fármacos.

Las principales brechas se dan en la volatilidad de la financiación y la percepción de la computación cuántica como tecnología aún incipiente. Algunos gobiernos brindan incentivos e impulsan la transferencia de tecnología desde las universidades para generar confianza y reducir los costos iniciales.

Impacto económico y social

Potencial transformador en finanzas

América Latina ha sufrido volatilidad económica y altos riesgos de mercado. La computación cuántica podría ofrecer modelos de evaluación de portafolios y detección de fraudes más precisos (Arute et al., 2019). Los algoritmos de optimi-

zación, como QAOA, prometen soluciones más ágiles para el *high-frequency trading* y la gestión de riesgos. Algunos bancos locales utilizan programas piloto para cifrado cuántico o predicción de mercados. Sin embargo, la escasez de especialistas cuánticos limita su implementación.

Agricultura: sostenibilidad y eficiencia

La agricultura es esencial en la región y, con la computación cuántica, se podrían modelar variables climáticas, genéticas y de suelos con mayor precisión (IBM, 2025). Esto ayudaría a optimizar el riego, reducir el uso de fertilizantes y administrar cultivos con mayor eficacia. Ante la vulnerabilidad al cambio climático, la capacidad de anticipar escenarios agrícolas es vital para la seguridad alimentaria y la estabilidad económica.

Salud y aceleración cuántica del descubrimiento de fármacos

Los sistemas de salud en América Latina afrontan saturación y limitaciones de acceso. La computación cuántica aplicada a la simulación molecular y la detección de interacciones de fármacos podría acortar tiempos y costos en el desarrollo de medicamentos, aspecto crucial para enfermedades como Chagas o dengue (Nielsen y Chuang, 2011). No obstante, la infraestructura cuántica y la formación de especialistas siguen siendo insuficientes.

Optimización energética y gestión de redes

La diversidad en la generación de energía (petróleo, gas, hidroeléctricas, solar, eólica) conlleva retos de coordinación y

distribución. La computación cuántica puede modelar la demanda, fluctuaciones y optimizar la red eléctrica, sobre todo en países de gran extensión territorial (Comisión Europea, 2022). Brasil, por ejemplo, ha manifestado interés en usarla para mejorar la gestión de sus centrales hidroeléctricas en épocas de sequía, mientras que México y Chile analizan proyectos piloto para estimar oferta y demanda, y planear futuras expansiones de infraestructura energética.

Manufactura y logística

La computación cuántica promete avances en manufactura, automotrices, aeroespaciales y en bienes de consumo (INCT-IQ, 2025). Su capacidad de optimización logística y simulación de materiales podría abaratar costos y elevar la competitividad de las empresas. Sin embargo, la adopción depende del acceso a la tecnología, la formación de personal y la disponibilidad de capital de riesgo. Asimismo, las pymes pueden mostrarse reacias a inversiones a largo plazo sin garantías de retorno.

Consideraciones geopolíticas y de seguridad nacional

Criptografía cuántica y sistemas heredados

El poder de la computación cuántica para romper los algoritmos criptográficos actuales genera inquietud (NIST, 2024). Para América Latina, donde las capacidades de ciberseguridad son dispares, la llegada de la computación cuántica fuerza a una migración hacia estándares poscuánticos. Además, surge la urgencia de adoptar soluciones como QKD, aunque su despliegue a gran escala enfrenta obstáculos técnicos y de infraestructura.

Guerra de información y operaciones de inteligencia

Los organismos de inteligencia ven oportunidades ofensivas y defensivas con la computación cuántica (Shor, 1997). La posibilidad de descifrar comunicaciones o procesar datos masivos en tiempo real transformaría la guerra de información. Al mismo tiempo, la seguridad cuántica posibilitaría la protección de infraestructuras vitales. Si la región no avanza en el desarrollo de estas tecnologías, va a depender de importaciones externas, y se vería más vulnerable a ataques digitales.

Cambios en alianzas y proyección global

Las principales potencias (EE. UU., UE, China) tratan la computación cuántica como un recurso estratégico, comparable con los avances nucleares de la Guerra Fría. Propuestas como la Iniciativa Nacional Cuántica de Estados Unidos, el proyecto Quantum Technologies Flagship de la Unión Europea o los planes de China muestran la competencia geopolítica en torno al tema. Para América Latina, desarrollar capacidades cuánticas propias podría mejorar su influencia en foros tecnológicos y de ciberseguridad (Dirección Nacional de Políticas y Planificación, 2021).

Desafíos y estrategias de crecimiento

Superar las limitaciones de financiación e infraestructura

El *hardware* cuántico requiere condiciones costosas (sistemas criogénicos, entornos sin vibraciones). Con un menor porcentaje del PIB destinado a I+D, muchas instituciones latinoamericanas carecen de equipamiento avanzado. Algunas

se apoyan en la nube cuántica de plataformas internacionales (NSF, Comisión Europea, etc.) (INCT-IQ, 2025). Formar consorcios regionales entre países vecinos podría optimizar los recursos, pero demanda acuerdos diplomáticos y de propiedad intelectual claros.

Formación de capital humano y retención de talento

La computación cuántica exige profesionales con alto dominio de mecánica cuántica, física computacional y matemáticas avanzadas. La “fuga de cerebros” es un problema persistente, por lo que varios gobiernos ofrecen becas atadas a compromisos de permanencia (IBM, 2025). Se requiere mayor oferta de plazas permanentes, financiamiento para laboratorios y oportunidades de liderazgo en universidades. Asimismo, integrar la computación cuántica en los programas STEM desde temprana edad podría ampliar la base de talentos.

Consideraciones legales y éticas en un futuro cuántico

La computación cuántica plantea interrogantes sobre privacidad de datos, vigilancia y consecuencias éticas. La posibilidad de descryptar datos antiguos agrava la preocupación de “almacenar ahora y descifrar después” (NIST, 2024). En América Latina, las legislaciones varían; algunos países tienen leyes de protección de datos actualizadas, mientras otros cuentan con marcos de ciberseguridad menos consolidados. Instituciones multilaterales, como el Banco Interamericano de Desarrollo, podrían impulsar proyectos de innovación inclusiva para evitar que la brecha tecnológica se profundice.

Fomentar el emprendimiento y la comercialización

La investigación académica requiere canales efectivos para llevar los resultados al mercado. Sin embargo, las empresas emergentes de *deep tech* implican retornos de inversión a largo plazo y el capital de riesgo regional tiende a concentrarse en sectores de rentabilidad más inmediata (*FinTech*, comercio electrónico) (Arute et al., 2019). Algunos gobiernos han creado fondos de innovación específicos para campos emergentes, incluida la computación cuántica, mediante capital semilla y mentorías. La demostración de casos de éxito en optimización logística o comunicaciones cuánticas seguras podría aumentar la inversión y la adopción comercial.

Conclusión

La era geológica del Antropoceno, caracterizada por cambios que son producto de la acción humana, atraviesa un momento decisivo. En años recientes, la Inteligencia Artificial Generativa y la computación cuántica han demostrado capacidades evolutivas independientes que generan cambios disruptivos, en ocasiones incompresibles para quienes los desarrollan. En otras palabras, aunque somos nosotros quienes hemos iniciado estos procesos, su avance parece tener inercia propia, difícil de controlar únicamente con prohibiciones o restricciones.

Se podría hablar de un determinismo tecnológico. Sin embargo, cabe considerar la idea de una “brújula tecno-humanista”, como sugiere Reid Hoffman, que nos ayude a elegir cursos de acción que sean dinámicos en lugar de deterministas, para orientarnos y reorientarnos conforme avanzamos (Hoffman y Beato, 2025).

La computación cuántica ofrece a América Latina una oportunidad para escalar posiciones en la jerarquía tecnoló-

gica global, siempre que se aborden los retos de forma coordinada y con visión de futuro. Con base en la fuerte tradición en física teórica, matemáticas e ingeniería, algunos países ya han iniciado el camino para consolidar las capacidades cuánticas locales. En este documento, se analizaron los fundamentos científicos (superposición, entrelazamiento, interferencia) que permiten a la computación cuántica lograr incrementos exponenciales de rendimiento, con aplicaciones en criptografía, simulación avanzada y análisis de datos.

El ecosistema cuántico en formación —con centros de investigación en Brasil, Argentina, México y Chile— demuestra el avance académico de la región, a la vez que hace visibles los retos de financiación, infraestructura y retención de talento. Aunque las instituciones universitarias generan conocimiento valioso, se necesita mayor integración con la industria y el sector público para que las teorías se conviertan en aplicaciones concretas. El respaldo gubernamental y la inversión privada han incentivado proyectos en finanzas, agricultura, salud, energía y manufactura, pero la adopción masiva demanda un cambio cultural y un marco legal sólido que promueva un uso responsable e inclusivo de la tecnología.

Las implicaciones geopolíticas agregan un nivel de complejidad: un país que domine las tecnologías cuánticas podría aspirar a tener mayor peso en negociaciones internacionales, al tiempo que protege mejor su infraestructura crítica. Quienes queden rezagados podrían tornarse más dependientes de potencias externas y enfrentarse a vulnerabilidades mayores. La carrera global por la supremacía cuántica subraya la relevancia de forjar alianzas internacionales para el intercambio de conocimientos y recursos.

En este contexto, se remarcen cuatro puntos clave:

1. Aumentar la inversión en I+D cuántico.
2. Formar y retener talento especializado, lo que incluye programas de posgrado y cátedras dedicadas.
3. Adecuar y modernizar los marcos legales, especial-

mente en lo referente a ciberseguridad y uso ético.

4. Fomentar el emprendimiento y la transferencia tecnológica para lograr una industria cuántica regional sostenible.

Con una estrategia coherente y perspectivas a largo plazo, América Latina puede posicionarse no solo como participante, sino como artífice en un ámbito que redefine aceleradamente las fronteras del progreso científico y tecnológico.

Bibliografía

- Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., Barends, R., et al. (2019). Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor. *Nature*, 574, 505-510.
- Benner, S., Lax, G., Crutzen, P. J., Poschl, U., Lelieveld, J. y Gunter Brauch, H. (2021). *Paul J. Crutzen and the Anthropocene: A New Epoch in Earth's History*. Springer.
- de Cózar Escalante, J. M. (2019). Ingenieros del Antropoceno digital: la enseñanza de las ingenierías en épocas inciertas. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad - CTS*, 14(41), 185-196. <https://www.redalyc.org/journal/924/92460273011/>
- Comisión Europea. (2022). Europe's Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI) Initiative.
- Hoffman, R. y Beato, G. (2025). *Superagency: What Could Possibly Go Right With Our AI Future*. Authors Equity.
- IBM. (2025). IBM Quantum. <https://www.ibm.com/quantum-computing> [Consultado el 12 de marzo de 2025].
- INCT-IQ. (2025). Informação Quântica. Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Informação Quântica. (2023). <https://inctiq.if.ufrj.br/> [Consultado el 12 de marzo de 2025].
- Kaku, M. (2023). *Quantum Supremacy: How the Quantum Computer Revolution Will Change Everything*. Penguin Random House.

- Maldonado-Romo, A., Zendejas-Morales, C., Escalante-Ramírez, B., Olveres, J., Pedraza, I., Romo, J., et al. (2024). Forging Pathways: Quantum Computing Initiatives in Mexico. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10821124>
- Nielsen, M. A. y Chuang, I. L. (2011). *Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary*. Cambridge University Press.
- NIST. (2024). What Is Post-Quantum Cryptography? <https://www.nist.gov/cybersecurity/what-post-quantum-cryptography>
- Dirección Nacional de Políticas y Planificación. (2021). *Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2030 Argentina*. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/plan_nacional_de_cti_2030.pdf
- Shor, P. (1997). Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer. *SIAM Journal on Computing*, 26(5), 1484-1509.
- Universidad Mayor. (2025). Vicerrectoría de Investigación. <https://www.umayor.cl>
- WWF. ¿Qué es el Antropoceno? <https://www.wwf.org.mx/antropoceno/> [Consultado el 11 de marzo de 2025].