



Depósito legal: PP201402DC4456
ISSN: 2343-6212

Observador del Conocimiento

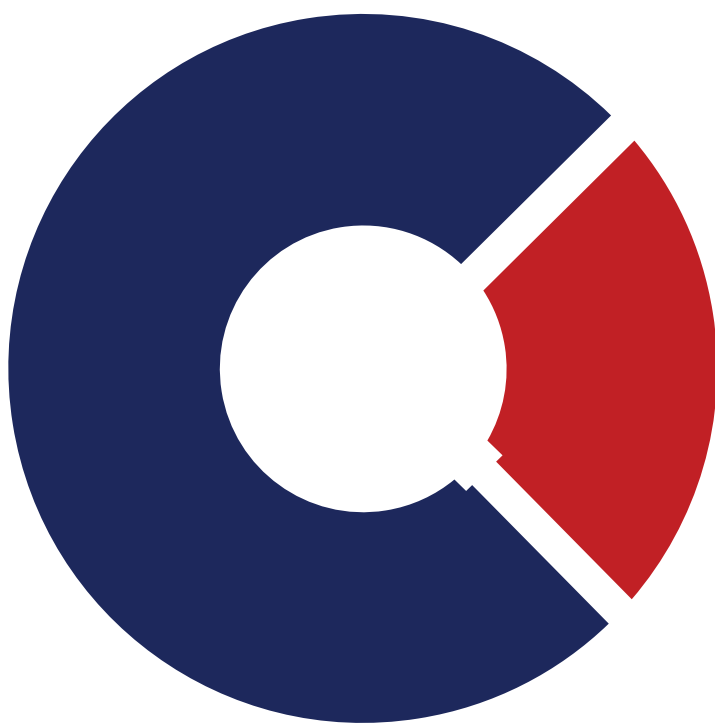
Edición Especial
Ciencia y Tecnología Cuánticas

Tomo II



**Publicación
Especializada
en Gestión Social
del Conocimiento
Vol. 10 N° 5 (2025)
Edición Especial**

Edición Trimestral
Fecha de edición
01/07/2025 al 31/07/2025



OBSERVADOR DEL **CONOCIMIENTO**

**Publicación científica, arbitrada, especializada
en gestión social del conocimiento**



Observador del Conocimiento

**Publicación científica, arbitrada, especializada
en gestión social del conocimiento**

Autoridades

Nicolás Maduro Moros

Presidente de la República Bolivariana de Venezuela

Delcy Rodríguez Gómez

Vicepresidenta Ejecutiva de la República Bolivariana
de Venezuela

Lic. Gabriela Jiménez Ramírez, Mgtr.

Ministra del Poder Popular para Ciencia y Tecnología

Dra. Carmen Virginia Liendo

Viceministra de Investigación y Gestión
del Conocimiento

Roberto Betancourt A., Ph. D.

Presidente
Observatorio Nacional de Ciencia, Tecnología
e Innovación

Créditos de la Revista

Editor-Jefe

Roberto Betancourt A., Ph. D.

Observatorio Nacional de Ciencia,
Tecnología e Innovación
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6667-4214>
roberto.a.betancourt@gmail.com
Venezuela

Consejo Editorial

Dra. Dilia Monasterio

Universidad Central de Venezuela
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4341-5850>
ailidadm@gmail.com
Venezuela

Dr. Gregorio Morales

Universidad Central de Venezuela
ORCID: <https://orcid.org/0000-0006-0252-8963>
gemoralesg@gmail.com
Venezuela

Lic. José Sequeira

Observatorio Nacional de Ciencia,
Tecnología e Innovación
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4331-6315>
jsequeira62@gmail.com
Venezuela

Lic. Julio Araque

Observatorio Nacional de Ciencia,
Tecnología e Innovación
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2850-470X>
yulioecesaf@gmail.com
Venezuela

Dra. Magaly Briceño

Universidad Nacional Experimental
Simón Rodríguez
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9689-7067>
magally.briceno@gmail.com
Venezuela

Consejo Científico

Arq. Carlos Gómez De Llarena

cgl@ireu.org
Venezuela

Dra. Daissy Trinidad Marcano

daissymarcano6@gmail.com
Venezuela

Dr. Luis Marcano

marcanol48@gmail.com
Venezuela

Dra. Marlene Yadira Córdova

yadiracordova@gmail.com
Venezuela

Dr. Prudencio Chacón

prudencio58@gmail.com
Venezuela



Equipo Editorial

**Lic. Fabiola Ortúzar, Mgtr.
(Coordinadora)**

Observatorio Nacional de Ciencia,
Tecnología e Innovación
fortuzar@oncti.gob.ve
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1988-5385>
Venezuela

Lic. José Sequeira

Observatorio Nacional de Ciencia,
Tecnología e Innovación
jsequeira62@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4331-6315>
Venezuela

Lic. Zenaida Araujo

Observatorio Nacional de Ciencia,
Tecnología e Innovación
araujoz.oncti@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3862-7455>
Venezuela

Correctora de estilo

Dra. Thamar Ortigoza

Universidad Nacional Experimental
Politécnica de la Fuerza Armada Nacional Bolivariana
thaorve@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8021-3377>
Venezuela

Diseño y diagramación

TSU. Ricardo Aguilar

Observatorio Nacional de Ciencia,
Tecnología e Innovación
ricardoaguilar906@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4087-6557>
Venezuela

TSU. Natalia Morao

Observatorio Nacional de Ciencia,
Tecnología e Innovación
natalia.oncti@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9309-5450>
Venezuela

Dirección: Av. Universidad, esquina El Chorro,
Torre Ministerial, piso 16,
Caracas-Venezuela

Teléfono: 0212- 5557592

e-mail: divulgacion@oncti.gob.ve /
revoc2012@gmail.com



Observador del Conocimiento

Periodicidad Trimestral

Edición especial Ciencia y Tecnología Cuánticas

Acerca de la Revista

La revista **Observador del Conocimiento** (OC) es una publicación electrónica de carácter científico, indexada en bases de datos, con una periodicidad trimestral. Es editada por el Observatorio Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, perteneciente al Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología. Dirigida al público en general de todos los sectores de la sociedad, tanto nacional como internacional. Los temas de interés de la revista son: vigilancia tecnológica, gestión social del conocimiento, cienciometría, observancia de la conducta científica-tecnológica, representación de la investigación interdisciplinaria, filosofía de la ciencia, bibliometría, patentometría y estudios sobre indicadores en CTI.

Está destinada a la divulgación de la producción científico tecnológica a través de los resultados originales de investigaciones que muestran los estudios sobre vigilancia tecnológica y medición sobre los factores de impacto, que representen una contribución para la visualización de la ciencia y la tecnología. Incluye ade-

más, trabajos de investigación aplicada, desarrollo tecnológico, revisiones bibliográficas de alto impacto y, eventualmente, estudios de casos que por su relevancia ameriten publicarse, estimulando de esta manera la divulgación escrita de la producción intelectual con lo que se contribuye a la divulgación y socialización de investigaciones de interés para el desarrollo de políticas institucionales en ciencia, tecnología, innovación y sus aplicaciones que respondan a la solución de problemas concretos de la sociedad.

Objetivo

Divulgar artículos de investigación orientados a la gestión social del conocimiento, según estándares nacionales e internacionales de calidad editorial, respondiendo a los criterios de inclusión y reconocimiento nacional e internacional en bases de datos de indexación, cumpliendo con el tratado de Acceso Abierto a la Información.

<https://revistaoc.oncti.gob.ve/index.php/odc/index>



Indexaciones



Las opiniones expuestas en los trabajos publicados en este número son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no reflejan necesariamente las del Comité Editorial de la revista o del Observatorio Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación.



Depósito legal: PP201402DC4456
ISSN: 2343-6212



Criterios de la revista *Observador del Conocimiento*

Responsabilidades del Equipo Editorial

El responsable institucional de la revista *Observador del Conocimiento* es el Presidente de la Institución, por ende, como Jefe-Editor decide, evalúa y coordina la política editorial de la revista, según la situación temporal de los eventos en ciencia, tecnología e innovación en el país. El Consejo Editorial gestiona los lineamientos editoriales que cumplan con las normas de publicación y planifica las evaluaciones con transparencia y ética en el proceso, coordinan con un grupo de especialistas evaluadores el proceso de arbitraje de los artículos acordes a los lineamientos institucionales.

Participación

La revista permitirá que todos los investigadores/investigadoras, tecnólogos/tecnólogas e innovadores/innovadoras de cualquier parte de Venezuela y del mundo participen en la revista con artículos, siempre y cuando cumplan con los lineamientos de las normas de publicación de la misma.

Política de derechos de autor

Todos los artículos que resulten aceptados por el Consejo Editorial, pasarán a ser publicados en la revista *Observador del Conocimiento*. Los articulistas ceden el derecho patrimonial de los contenidos del artículo, para efectos de traducción, transformaciones y adaptaciones, sin perder sus derechos morales sobre la obra. A su vez ceden el derecho para que sus artículos sean divulgados bajo cualquier forma, como repositorios, libros y cualquier medio que amplíe la visibilidad de la obra y a su vez darle continuidad al conocimiento. Criterio legal de acuerdo con lo establecido en el **artículo 59** de la Ley Sobre el Derecho de Autor (1993), vigente.

Acceso Abierto y Copyright

El proceso de envío, evaluación, publicación, aceptación, acceso y edición que realiza la revista *Observador del Conocimiento* está libre de costo para los autores y usuarios. Todos los artículos son publicados bajo una licencia **Creative Commons Atribución 4.0 CC-BY-SA** que permite transformaciones y adaptaciones de la obra y cuyas versiones derivadas figuran bajo la misma licencia de la obra original, por lo que se ha de indicar el nombre del autor, el nombre de la revista del original y la licencia.

Los autores pueden publicar su artículo en otros espacios divulgativos sean impresos o virtuales siempre y cuando citen la revista donde publicaron su original.

Los autores podrán adoptar otros acuerdos de licencia no exclusiva de divulgación de la obra publicada (por ejemplo: depositarla en un repositorio institucional o publicarla en un volumen monográfico) siempre que se indique la publicación inicial en esta revista.

Se permite y recomienda a los autores difundir su obra a través de internet (p. ejem. en archivos telemáticos institucionales o en su página web) durante el proceso de evaluación, lo cual puede conducir intercambios interesantes y aumentar las citas de la obra publicada respondiendo al acceso abierto a la información.

Defensa de derechos de autor

La revista *Observador del Conocimiento* a través del Observatorio Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación como figura jurídica institucional se encarga de la defensa de los "derechos morales" del autor en cuanto sea necesario.

Política de plagio

Para tratar un asunto de plagio la revista *Observador del Conocimiento* seguirá las directrices definidas en el Consejo Editorial ajustadas al reglamento de la publicación.

Cuando resulte un contenido intelectual plagiado se seguirán los siguientes criterios:

- La persona que informe de una situación de un plagio será informada del proceso a seguir.
- Los artículos son comparados para comprobar el nivel de copia.
- Todo el Consejo Editorial de la revista será informado, y se les pedirá las observaciones al respecto.
- Al autor remitente del artículo en cuestión se le enviará evidencias documentales del caso de plagio y se le pedirá una respuesta.
- El editor de la revista en la que fue publicado el artículo original plagiado y el autor del artículo plagiado, serán informados.
- La revista *Observador del Conocimiento* publicará una retractación oficial del trabajo.
- La versión *on-line* del artículo será retirado.
- La revista *Observador del Conocimiento* no publicará ningún otro artículo del plagiador, por lo menos hasta diez años (a consideración del Comité Editorial).

Preservación digital

La revista *Observador del Conocimiento*, utiliza para su visibilidad y preservación digital la plataforma tecnológica que posee el *Observatorio Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación*. Adicionalmente se toman en consideración otras bases de datos con quienes la revista estableció compromisos, las cuales son:

- La existencia de respaldos en base de datos de forma clasificada y sistematizada, como: Latindex y ZENODO.
- La revista también cuenta con el sistema de edición en línea *Open Journal Systems*.





Justificación

Edición Especial Ciencia y Tecnología Cuánticas Vol. 10 N° 5 (2025)

La revista *Observador del Conocimiento* hace un paréntesis en su línea temática, pues en el Vol. 10 N° 5 concentra una edición especial en honor a la celebración del año internacional de la ciencia y la tecnología cuánticas 2025.

El 19 de junio de 2024, la Asamblea General de la Naciones Unidas (ONU), en su septuagésimo octavo período de sesiones, Tema 18 del programa Desarrollo Sostenible, saca la resolución N° 78/287, decretando “Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas (2025)”, resolución aprobada por la Asamblea General el 7 de junio de 2024.

En esta resolución se exponen las diferentes razones para alcanzar este nombramiento, entre estas, se destaca que, al “incrementar en el ámbito mundial la cooperación, la conciencia y la educación sobre la ciencia y la tecnología cuánticas podría a ayudar a hacer frente a los desafíos de lograr el desarrollo sostenible y los ODS”, mejorando de esta forma la calidad de vida de las sociedades en el mundo.

Asimismo, se pone de relieve la relevancia tanto de la tecnología como de la ciencia cuántica para el progreso económico y potenciales aplicaciones derivadas que “podrían satisfacer necesidades básicas tales como la alimentación, la atención de la salud (...) el agua limpia y la energía y apoyar la acción climática”.

Por estas y otras razones, la ONU decreta que en el 2025 “se conmemore con actividades a todos los niveles encaminadas a aumentar la conciencia pública sobre la importancia de la ciencia y las aplicaciones cuánticas”, además de potenciar la cooperación científica o garantizar la aplicación de las citadas materias de ciencia y tecnología cuánticas para el desarrollo sostenible.

De esta forma, la revista será vocera de estas intenciones a través de la escritura de excelentes investigadores e investigadoras, formando parte de las actividades programadas en honor a dicho evento.

¡Feliz Año Internacional de la Ciencia y Tecnología Cuánticas 2025!



Contenido/Content

12 EDITORIAL / Editorial

14 PRESENTACIÓN / Presentation

16 ARTÍCULOS Y ENSAYOS DE INVESTIGACIÓN / *Research Articles and Essays*

17 **Fiscalidad inteligente y computación cuántica: nuevo paradigma en control fiscal**

*Intelligent taxation and quantum computing: new paradigm
in fiscal control*

Miguel Romero

28 **Avances y aplicaciones de tecnologías cuánticas en sistemas espaciales**

Advances and applications of quantum technologies in space systems

Lenin Luna

38 **Caracterización de celdas fotovoltaicas de tecnología de pozo cuántico usando desarrollos en software libre**

*Characterization of quantum well photovoltaic cells using developments
in free software*

Héctor Núñez; Gloria Carvalho; Luis Santos; Jarson Manjarres; Carlelines
Gavidia; Dino Di Rosa Ulloa, Yaremi Gamboa; Orlando Villarroel; Freddy Brito

46 **Gobernanza cuántica para la seguridad de la información en el contexto universitario venezolano**

*Quantum governance for information security in the Venezuelan
university context*

Edward Arévalo



64

Prospectiva fundamental de la ciencia cuántica en el progreso social y tecnológico

Fundamental prospective of quantum science in social and technological progress

Carlos Rojas

74

Metodología de aprendizaje automático cuántico para la predicción de la actividad inhibitoria de fármacos contra el COVID-19

Quantum machine learning methodology for predicting the inhibitory activity of drugs against COVID-19

Raúl Isea

83

Principios cuánticos para repensar el rol del emprendedor en la estrategia empresarial

Quantum principles for rethinking the entrepreneurial role in business strategy

Edmary Carrasco

101

Entrelazando conceptos en el aula: materia y propiedad una estrategia innovadora para la enseñanza

Interweaving concepts in the classroom: matter and property an innovative teaching strategy

Miguel Meza; Juan Rodríguez

107

NOTAS EN I+D / R&D Notes

108

Apartheid científico

Scientific apartheid

Roberto Betancourt A.

109

NORMAS DE PUBLICACIÓN / Publication Standars





115

NORMAS DE EVALUACIÓN / *Evaluation Standards*

117

NORMAS DE PUBLICACIÓN PARA IA / *Publication Standards for AI*



Editorial

La geopolítica de la ciencia y la tecnología se refiere al estudio de cómo los aspectos geográficos de nuestro Estado nación (y los de otros), así como las condiciones físicas del entorno y las interacciones políticas y económicas afectan el desarrollo de la ciencia, la tecnología, la producción y la innovación que se fundamentan en las dos primeras. La idea que subyace es cómo estos elementos influyen en la forma en que los países, incluyendo nuestra República, fortalecen su capacidad científica y tecnológica y cómo estas pueden ser utilizadas para alcanzar objetivos comunes en beneficio de los pueblos, respetando en cada caso los hallazgos de unos y otros.

Los estudios han demostrado que la diplomacia de la ciencia tiene un impacto significativo en alcanzar las ambiciosas metas asociadas a la incorporación de soluciones que desde los laboratorios -gracias a la obra de la comunidad científica- es posible.

El diálogo científico y tecnológico está asociado a la producción que en esa materia es compartido por la comunidad dedicada a las actividades de investigación y desarrollo, desde publicaciones seriadas en revistas de interés por áreas de conocimiento, pasando por textos no seriados, incluyendo otros de escalamiento productivo como prototipos hasta plantas preindustriales. A esta producción se une el creciente y necesario, movimiento de la Ciencia Abierta que, de acuerdo a la Unesco y al Observatorio Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Oncti), es un concepto general que combina varios movimientos y prácticas con el objetivo de hacer que el conocimiento científico, los datos y la evidencia estén disponibles y accesibles libremente para todos, aumentar las colaboraciones científicas y el intercambio de información en beneficio de la ciencia y la sociedad, así como abrir el proceso de creación de conocimiento científico para los actores sociales más allá de la comunidad científica.

Por otro lado, es importante reconocer las transformaciones globales afectadas por (entre otros) el calentamiento global, la geopolítica y la propia globalización sectorizada por intereses inconfesables. Esta transformación define el nexo entre la diplomacia científica, la geopolítica, el derecho y el acceso a los resultados de la producción científica en variadas áreas, donde el surgimiento de un mundo multipolar en disputa, va acompañado de un profundo cambio tecnológico y una creciente digitalización de las economías y sociedades.

La continua búsqueda geopolítica de poder se desarrolla desde la tecnología, con un profundo impacto en las economías y la competitividad, ampliando el campo de batalla con rivalidades tecnológicas globales, divididas entre países que están transformando el mundo. Un ejemplo claro es la rivalidad tecnológica chino-estadounidense que cada día crece, incluyendo los sectores clave de la inteligencia artificial (IA) y los semiconductores. Por otro lado, la tecnología también es protagonista en las luchas geopolíticas a través de su uso en la ciberguerra, la interferencia electoral y la desinformación.

En la República Bolivariana de Venezuela se construyen valores desde leyes, programas para mantener un piso sólido y poder salvaguardar y navegar en este nuevo entorno desafiante, fracturado y conflictivo.

El apoyo a la soberanía y respeto a las decisiones del Estado ante sus necesidades, el manejo de un orden multilateral desde la fraternidad y negociación desde el intercambio fructífero, manteniendo la armonía para el avance de las políticas integracionistas, los principios fundamentales del Estado venezolano, han desarrollado

un conjunto de herramientas políticas siempre avanzadas al bienestar común y el buen vivir. Además, está desarrollando un piso para la regulación de tecnologías emergentes críticas, estableciendo alianzas con aliados y países afines, para proteger procesos de mercado interno y abordar vulnerabilidades tecnológicas y dependencias estratégicas.

Es así, que se espera que el Estado venezolano empiece a ampliar los temas que conectan geopolítica y tecnología y ocupen un lugar destacado en la agenda política, científica-tecnológica e industrial.

Roberto Betancourt A., Ph. D.
Editor-Jefe

Presidente del *Observatorio Nacional
de Ciencia, Tecnología e Innovación*
<https://orcid.org/0000-0002-6667-4214>
V7683160@gmail.com

Presentación

Presentamos el segundo tomo de esta edición especial dedicada a la ciencia y tecnología cuánticas, una publicación que emerge en el contexto de la proclamación del Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas 2025 por parte de la Asamblea General de las Naciones Unidas. Este año internacional tiene como objetivo fomentar la cooperación global, la educación y la concienciación sobre un campo que promete una transformación radical en el futuro tecnológico y social.

Esta edición es una continuación de la línea iniciada en el primer tomo, reuniendo contribuciones que abordan, desde una variedad de perspectivas, las repercusiones técnicas, sociales y estratégicas de estas áreas del conocimiento. Los artículos compilados reflejan un esfuerzo colectivo por explorar tanto las aplicaciones emergentes como los marcos conceptuales necesarios para comprender y gobernar esta frontera del conocimiento.

Los artículos y ensayos compilados tienen su punto de partida en la contribución de Miguel Romero, inaugurando este tomo con un análisis exhaustivo de la convergencia entre la fiscalidad inteligente y la computación cuántica. En su propuesta, Romero plantea el establecimiento de un nuevo paradigma en el ámbito del control fiscal, fundamentado en el aprovechamiento de la capacidad de procesamiento cuántico para optimizar la detección de fraudes y asegurar la confidencialidad de los datos mediante el empleo de técnicas de criptografía avanzadas. El siguiente en este legajo científico es Lenin Luna, quien examina minuciosamente los avances y aplicaciones de las tecnologías cuánticas en sistemas espaciales, señalando su función primordial en la comunicación satelital segura, la navegación de precisión y la simulación de materiales bajo condiciones extremas, lo que evidencia el potencial transformador de lo cuántico más allá de lo terrestre.

Por otra parte, el esfuerzo colaborativo de Héctor Núñez y otros ocho autores ha dado lugar a la aplicación de una metodología transformadora para la caracterización de «modelos de celdas fotovoltaicas de pozo cuántico», mediante el uso de herramientas de *software* libre. Este enfoque demuestra la capacidad del modelado cuántico para optimizar la eficiencia energética y fomentar el desarrollo de tecnologías sostenibles. Más adelante, Edward Arévalo aborda la seguridad de la información en el contexto universitario venezolano desde una perspectiva de gobernanza, proponiendo un modelo teórico «integral y evolutivo que permite a las instituciones educativas proteger sus activos informáticos, garantizar la privacidad de los datos y fomentar la confianza de la comunidad universitaria».

Continúa, Carlos Rojas profundizando en una visión integral sobre el impacto social y tecnológico de la ciencia cuántica, destacando su potencial como catalizador del progreso y señalando que su «verdadero impacto transformador dependerá no solo de avances técnicos, sino también de decisiones sociales y políticas sobre cómo desarrollar, implementar y gobernar estas tecnologías». Concluye este compendio, la labor de Raúl Isea con una aplicación concreta de aprendizaje automático cuántico para la predicción de la actividad «inhibitoria de potenciales fármacos contra el coronavirus SARS-CoV-2», demostrando cómo estas herramientas pueden acelerar el desarrollo de terapias en contextos de emergencia de salud pública.

Es indispensable mencionar que la labor de investigación que aquí se demuestra se lleva a cabo a pesar del persistente contexto de restricciones derivadas de las medidas coercitivas unilaterales, que han impactado significativamente el acceso a los descubrimientos de otros laboratorios y espacios de investigación del planeta, incluido el financiamiento internacional y el derecho universal al libre intercambio académico. La producción científica nacional reflejada en este volumen demuestra una notable capacidad de resiliencia, innovación y adaptación. Los logros presentados son testimonio del esfuerzo colectivo de investigadores, investigadoras e instituciones venezolanas que, a pesar de las limitaciones materiales y de conectividad, han logrado desarrollar soluciones propias, aprovechar herramientas de código abierto, fortalecer la colaboración interna y priorizar líneas de investigación con un alto impacto local. Esta capacidad de avanzar en la frontera del conocimiento cuántico en condiciones adversas enriquece el acervo científico nacional y constituye un acto de soberanía cognitiva que reafirma el compromiso con la generación de conocimiento de calidad, la consecución de las metas del Plan de la Patria y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, a pesar de los desafíos impuestos de manera unilateral.

Finalmente, es posible apreciar como todas las contribuciones exhiben una interrelación intrínseca, dando lugar a un conjunto de ideas coherente y articulado sobre la omnipresencia y el alcance interdisciplinar de lo cuántico. Este fenómeno abarca una amplia gama de dominios, que incluyen lo fiscal y lo espacial, así como lo energético, institucional, social y biomédico. La presente edición especial, más allá de constituir un merecido festín conmemorativo del Año Internacional, se erige como un exhorto a la comunidad científica, a los responsables de la toma de decisiones y a la sociedad en general para que participen de manera activa en la construcción de un futuro cuántico caracterizado por la inclusión, la reflexión crítica y la concienciación sobre las implicaciones éticas inherentes.

Roberto Betancourt A., Ph. D.

Editor-Jefe

Presidente del *Observatorio Nacional
de Ciencia, Tecnología e Innovación*

<https://orcid.org/0000-0002-6667-4214>

V7683160@gmail.com

Artículos y Ensayos de Investigación



Fiscalidad inteligente y computación cuántica: nuevo paradigma en control fiscal

Intelligent taxation and quantum computing: new paradigm in fiscal control

Miguel Romero

Investigador independiente

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9530-7600>

miguelangelromeroduarte@gmail.com

Caracas-Venezuela

Resumen

La fiscalidad inteligente basada en tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial y el *Big Data*, permite analizar grandes volúmenes de datos, detectar patrones de comportamiento y prevenir fraudes fiscales. Por otro lado, la computación cuántica, con sus principios de superposición y entrelazamiento cuántico, ofrece capacidades de procesamiento sin precedentes para resolver problemas complejos. La integración de estas tecnologías puede transformar la gestión tributaria, mejorar la recaudación de impuestos y fortalecer la transparencia fiscal. La criptografía cuántica, en particular, se presenta como un área crítica, ya que podría vulnerar la criptografía actual y comprometer sistemas bancarios y bases de datos de la administración tributaria en cuestión de minutos. Por lo tanto, es esencial que las administraciones tributarias adopten estas nuevas tecnologías, no solo para potenciar herramientas de inteligencia artificial que prevengan el fraude y la evasión, sino también para proteger sus bases de datos a través de la criptografía cuántica. La colaboración entre la fiscalidad inteligente y la computación cuántica puede facilitar la creación de modelos predictivos más sofisticados, permitiendo anticipar comportamientos evasores y diseñar estrategias proactivas de control fiscal. Sin embargo, esta integración también presenta desafíos significativos en términos de infraestructura, inversión y consideraciones éticas, que deben ser abordados de manera cuidadosa para garantizar la efectividad y la confianza en el sistema tributario. En resumen, la combinación de estas tecnologías tiene el potencial de revolucionar la gestión fiscal, optimizando procesos y fortaleciendo la transparencia en la administración tributaria.

Palabras clave:

Fiscalidad inteligente; computación cuántica; inteligencia artificial; *Big Data*; control fiscal

Abstract

Intelligent taxation, based on advanced technologies such as artificial intelligence and Big Data, enables the analysis of large volumes of data, detects behavior patterns, and prevents tax fraud. On the other hand, quantum computing, with its principles of superposition and quantum entanglement, offers unprecedented processing capabilities to solve complex problems. The integration of these technologies can transform tax management, improve tax collection, and strengthen fiscal transparency. Quantum cryptography, in particular, presents itself as a critical area, as it could compromise current cryptography and jeopardize banking systems and tax administration databases within minutes. Therefore, it is essential for tax administrations to embrace these new technologies, not only to enhance artificial intelligence tools that prevent fraud and evasion but also to protect their databases through quantum cryptography. The collaboration between intelligent taxation and quantum computing can facilitate the creation of more sophisticated predictive models, allowing for the anticipation of evasive behaviors and the design of proactive fiscal control strategies. However, this integration also presents significant challenges in terms of infrastructure, investment, and ethical considerations, which must be carefully addressed to ensure effectiveness and trust in the tax system. In summary, the combination of these technologies has the potential to revolutionize fiscal management, optimizing processes and strengthening transparency in tax administration.

Keywords:

Smart taxation; quantum computing; artificial intelligence; Big Data; fiscal control

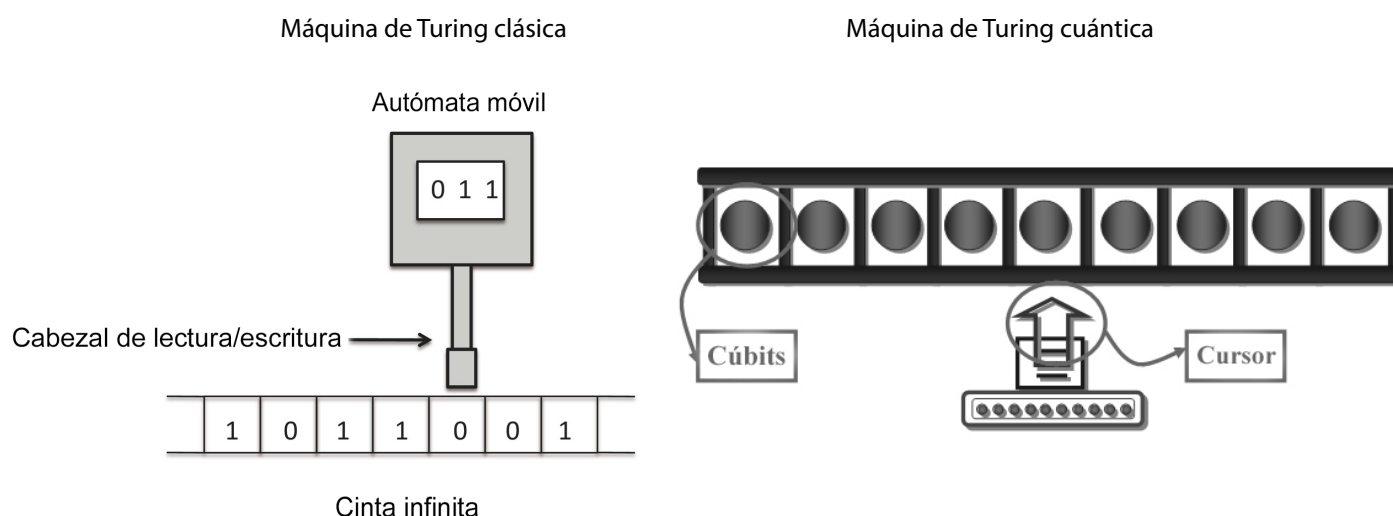
Introducción

Las administraciones tributarias enfrentan retos significativos debido al aumento exponencial de datos generados por los contribuyentes y las complejas estrategias de evasión fiscal. En este contexto, la fiscalidad inteligente, basada en inteligencia artificial y *Big Data*, se presenta como una solución para optimizar la gestión tributaria mediante el análisis avanzado de datos. Por otro lado, la computación cuántica, con capacidades sin precedentes para resolver problemas complejos, aporta un enfoque revolucionario. Este ensayo analiza cómo la integración de estas tecnologías puede transformar la fiscalización y recaudación fiscal, enfrentando los desafíos éticos, técnicos y financieros que acompañan esta transición tecnológica.

Computación cuántica

La computación cuántica utiliza cúbits en lugar de bits tradicionales, lo que permite realizar cálculos complejos de manera exponencialmente más rápida gracias a la superposición y el entrelazamiento cuántico. Estas capacidades son útiles para resolver problemas como la optimización de sistemas tributarios y el análisis de grandes bases de datos. Si bien comparte el modelo de la Máquina de Turing, la versión cuántica utiliza cúbits para realizar cálculos más complejos.

Figura N° 1. Máquina de Turing cuántica



Fuente: <https://es.wikipedia.org>.

En la actualidad, el crecimiento exponencial de los datos ha llevado a empresas a demandar ordenadores más veloces y potentes para resolver problemas complejos. La Ley de Moore² establece que el número de transistores en un microprocesador se duplica cada dos años, incremen-

tando la capacidad de procesamiento (Moore, 1965). Sin embargo, a medida que los transistores se miniaturizan a escalas nanométricas, surgen desafíos que afectan la eficiencia y funcionalidad de los ordenadores clásicos.

²La Ley de Moore fue enunciada por Gordon Moore, cofundador de Intel, en 1965. Aunque inicialmente fue una observación empírica, se convirtió en un principio clave para la industria de los semiconductores.



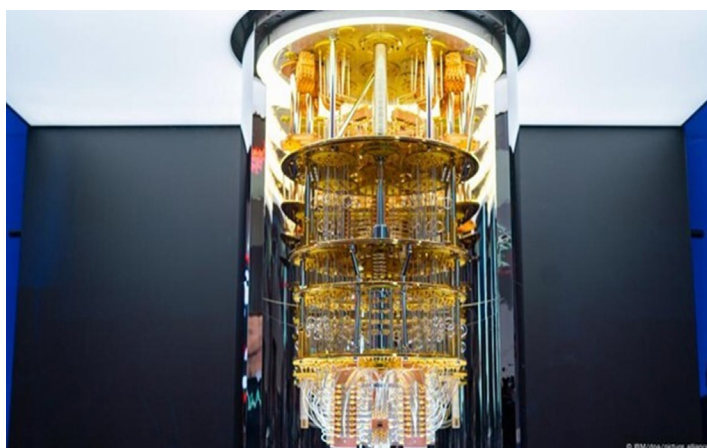
Los ordenadores cuánticos enfrentan varios retos clave:

a) Escalabilidad: se necesita un sistema que pueda aumentar la cantidad de cúbits para resolver problemas más complejos.

b) Coherencia cuántica: es crucial mantener la coherencia cuántica, lo que implica aislar el sistema de influencias externas para evitar la decoherencia, donde los cúbits pierden sus propiedades cuánticas y se comportan como bits clásicos.

c) Temperaturas extremas: los ordenadores cuánticos deben operar a temperaturas cercanas al cero absoluto (-273 °C) para funcionar correctamente.

Figura N° 2. Ordenador cuántico de IBM



Fuente: <https://www.ibm.com/quantum> (2025).

Computación cuántica

La criptografía tradicional es la ciencia que se encarga de transformar el contenido de un mensaje para que cuando se transmita por un canal hasta su destinatario solo sea capaz de descifrarlo dicho destinatario. Por otra parte, la criptografía cuántica es una tecnología emergente que ofrece una seguridad sin precedentes, al basarse en los principios de la mecánica cuántica (Agudo, 2022). Su principal aplicación en el ámbito tributario es la distribución de claves cuánticas, que permite:

- Establecer secuencias idénticas de claves aleatorias en diferentes ubicaciones, asegurando que ninguna tercera parte pueda interceptarlas.

- Garantizar la conservación de la información cuántica, impidiendo accesos no autorizados.

- Reforzar la seguridad frente a ataques que podrían comprometer sistemas criptográficos clásicos.

Para las administraciones tributarias, la criptografía cuántica es esencial para proteger bases de datos fiscales y prevenir vulnerabilidades en los sistemas de recaudación. Esta tecnología no solo asegura la integridad de la información, sino que también fortalece la confianza en los procesos de fiscalización, al impedir accesos no autorizados y posibles manipulaciones externas.

Además, la computación cuántica también puede descifrar sistemas criptográficos tradicionales, lo que plantea la necesidad urgente de adoptar estas tecnologías avanzadas para garantizar la seguridad fiscal en un entorno donde las amenazas cibernéticas evolucionan constantemente.

El internet de las cosas y los ordenadores cuánticos

El internet de las cosas (IoT) se refiere a la conexión de diversos dispositivos a través de una red, donde estos son visibles y pueden interactuar entre sí. Cualquier dispositivo que pueda conectarse a Internet y comunicarse con otros sin intervención humana se considera un nodo de interacción de máquina a máquina (M2M)³.

La integración de la fiscalidad inteligente con el IoT y la computación cuántica representa un avance significativo en el control fiscal de las Administraciones Tributarias. La fiscalidad inteligente utiliza tecnologías como *Big Data* e inteligencia artificial para optimizar la detección de fraudes y mejorar la recaudación. Estas herramientas permiten analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real,

³machine to machine, 'máquina a máquina' es un concepto genérico que se refiere al intercambio de información o comunicación en formato de datos entre dos máquinas remotas.



identificar patrones de comportamiento y diseñar estrategias de fiscalización más efectivas.

Por su parte, el IoT amplifica esta capacidad al conectar dispositivos que pueden recopilar y transmitir datos en tiempo real, mejorando así la eficiencia en la supervisión fiscal. Por ejemplo, sensores en dispositivos de punto de venta pueden proporcionar información instantánea sobre transacciones, permitiendo a las autoridades fiscales detectar anomalías de manera proactiva.

La sinergia entre estas tecnologías no solo optimiza la gestión fiscal, sino que también fortalece la transparencia y la confianza de los contribuyentes, asegurando que las administraciones tributarias estén mejor equipadas para enfrentar los desafíos en la era digital.

La inteligencia artificial

La inteligencia artificial (IA) es una disciplina que busca desarrollar programas capaces de realizar tareas que requieren inteligencia humana, como el aprendizaje y el razonamiento.

Según la Real Academia Española (RAE), la IA se define como la disciplina científica que se ocupa de crear programas informáticos y sistemas capaces de realizar tareas que requieren inteligencia humana (RAE, 2020).

Russell y Norvig clasifican la IA en sistemas que piensan, actúan como humanos o racionalmente, lo que incluye redes neuronales y agentes inteligentes (Russell y Norvig, 2020).

La inteligencia artificial cuántica combina IA y computación cuántica, mejorando la capacidad de las máquinas para procesar grandes volúmenes de datos y resolver problemas complejos.

El aprendizaje automático (*Machine Learning*), una rama de la IA permite crear modelos que predicen comportamientos de los contribuyentes. Esto es fundamental para detectar fraudes a tiempo y mejorar la recaudación de impuestos.

El aprendizaje profundo (*Deep Learning*) es una subdisciplina del aprendizaje automático que utiliza redes neuro-

nales artificiales con múltiples capas. Este enfoque ayuda a resolver problemas complejos de manera más efectiva.

El término "caja negra" (*black box*) se refiere a modelos de IA cuyos procesos internos son opacos, lo que dificulta entender cómo se generan los resultados.

Fiscalidad inteligente

La fiscalidad inteligente se define como la integración de tecnologías avanzadas para optimizar la gestión fiscal, incluyendo la ciencia de datos, la automatización de procesos tributarios y la IA. Este enfoque cobra gran relevancia en el contexto de la administración tributaria, dado el significativo papel que desempeña en la detección de fraudes fiscales y en la asistencia a los contribuyentes.

Las técnicas de IA y análisis avanzado de datos utilizadas por las autoridades fiscales incluyen minería de datos (*data mining*), aprendizaje automático (*Machine Learning*), comparación de patrones, pronósticos (*forecasting*), visualización, análisis semántico, agrupamiento (*clustering*), estadísticas multivariantes, análisis gráfico, simulación, procesamiento de eventos complejos y redes neuronales, entre otras.

Es crucial resaltar que la eficacia de estas herramientas depende de la calidad de los datos analizados. Si los datos están mal estructurados, son deficientes o contienen errores, los resultados obtenidos estarán sesgados, lo que podría perjudicar a los contribuyentes.

Aplicaciones de la computación cuántica en la fiscalidad inteligente

La computación cuántica representa un cambio de paradigma en el análisis y la gestión de datos fiscales. Sus capacidades únicas, basadas en los principios de superposición y entrelazamiento cuántico, permiten resolver problemas complejos de manera significativamente más eficiente que los métodos tradicionales.

Entre las herramientas más destacadas se encuentran los algoritmos cuánticos, que ofrecen soluciones innovadoras para diversos desafíos fiscales:

a) Algoritmo de Shor⁴: este algoritmo es fundamental para la factorización de números grandes, con aplicaciones directas en la criptografía y la seguridad de los datos fiscales. Por ejemplo, puede ayudar a proteger bases de datos sensibles y detectar patrones de fraude al identificar relaciones ocultas en grandes volúmenes de datos.

b) Algoritmo de Grover: optimiza la búsqueda en bases de datos no ordenadas, lo que permite analizar millones de registros fiscales de manera más rápida y eficiente. Esto es crucial para identificar comportamientos anómalos o sospechosos entre contribuyentes.

c) Los algoritmos de Kitaev y Watrous, por su parte, abordan problemas algebraicos complejos que pueden surgir en el análisis de datos fiscales. Estos algoritmos permiten entender mejor la estructura interna de grandes bases de datos, lo que a su vez ayuda a modelar y analizar la información tributaria de manera más precisa. Por ejemplo, en un caso práctico, una administración tributaria podría utilizar el algoritmo de Kitaev para modelar la interacción entre diferentes contribuyentes, identificando así patrones que sugieran actividades sospechosas.

d) Aprendizaje automático cuántico: esta rama emergente combina la computación cuántica con el aprendizaje automático para mejorar el análisis de datos fiscales. Gracias a la superposición y el entrelazamiento, los modelos cuánticos pueden procesar grandes volúmenes de datos en tiempos significativamente menores. Por ejemplo:

- Detección de fraudes fiscales: identifica patrones de evasión fiscal en tiempo real analizando transacciones y declaraciones fiscales.
- Modelos predictivos avanzados: permite anticipar comportamientos evasores antes de que ocurran, diseñando estrategias proactivas de control fiscal.

- Optimización de recursos: los algoritmos cuánticos pueden priorizar automáticamente los casos de mayor riesgo fiscal, mejorando la eficacia operativa de las administraciones tributarias.

- Aceleración del procesamiento: los algoritmos cuánticos pueden resolver problemas complejos en tiempos significativamente menores, reduciendo procesos de días a minutos. Por ejemplo, tareas como la auditoría de millones de declaraciones fiscales o la detección de patrones de evasión fiscal que antes requerían semanas, ahora podrían completarse en cuestión de horas.

La ciencia de datos (*Big Data*)

La ciencia de datos, también conocida como *Big Data*, permite analizar grandes volúmenes de información para identificar patrones y tendencias en el comportamiento de los contribuyentes. Su aplicación en el ámbito tributario es fundamental, ya que ayuda a detectar evasiones fiscales y mejora la toma de decisiones en materia tributaria.

En el ámbito tributario, el *Big Data* ayuda a las administraciones fiscales a seleccionar contribuyentes para fiscalización mediante modelos de riesgo de cumplimiento. Sin embargo, la diversidad de formatos en los datos representa un desafío importante. Para abordarlo, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) introdujo el estándar *SAF-T*⁵, que optimiza el intercambio de datos contables entre contribuyentes y administraciones fiscales.

La administración tributaria, a través de la automatización de declaraciones y otros documentos, obtiene información relevante de los contribuyentes. Esta información no solo es útil para prevenir el fraude, sino que también puede ser utilizada para asistir a los contribuyentes en el cumplimiento de sus obligaciones fiscales, mitigando así el riesgo de multas y mejorando la relación con los administrados.

⁴El Algoritmo de Shor, desarrollado por Peter Shor en 1994, es capaz de factorizar números enteros de manera eficiente en computadoras cuánticas, poniendo en riesgo sistemas de criptografía como RSA.

⁵El SAF-T (*Standard Audit File for Tax*) es un formato estándar de intercambio de datos desarrollado por la OCDE que permite la estandarización y automatización de auditorías fiscales.

Las aplicaciones del *Big Data* en la fiscalidad inteligente, contempla las actividades siguientes:

a) Detección de fraudes fiscales: las administraciones tributarias combinan *Big Data* con IA para crear algoritmos predictivos que identifican anomalías en declaraciones fiscales y transacciones financieras.

b) Asistencia a los contribuyentes: los algoritmos también se utilizan para elaborar declaraciones automatizadas y ofrecer soporte personalizado, mejorando el cumplimiento fiscal.

c) Optimización de recursos: herramientas como la minería de datos y redes neuronales permiten segmentar contribuyentes según su riesgo de incumplimiento, priorizando auditorías y asignando recursos de manera eficiente.

Las herramientas claves de análisis en *Big Data* son las siguientes:

- Redes neuronales artificiales: detectan patrones complejos, como perfiles de alto riesgo de evasión fiscal.
- Árboles de decisión: clasifican contribuyentes en grupos homogéneos según su comportamiento fiscal.
- Mapas auto-organizados (SOM⁶): Visualizan datos complejos, detectando patrones y posibles fraudes, como facturas falsas.

Por ejemplo, las redes neuronales artificiales y los árboles de decisión se aplican para clasificar a los contribuyentes según su nivel de riesgo de evasión fiscal. Asimismo, técnicas como los mapas autoorganizados (SOM) visualizan datos complejos, facilitando la detección de patrones sospechosos. Con estas herramientas, es posible automatizar la selección de contribuyentes para auditorías, optimizando recursos y mejorando la eficacia en la fiscalización. Sin embargo, el éxito de estas técnicas depende en gran medida de la calidad y estructura de los datos disponibles, lo que representa un desafío significativo para las administraciones tributarias.

Implementación de la inteligencia artificial en las administraciones tributarias

En la actualidad, diversas administraciones tributarias en el mundo están utilizando IA para detectar fraudes fiscales y prevenir la evasión tributaria. Este ensayo abarca experiencias de países como España, Estados Unidos, Francia, Finlandia, Chile, Brasil, México, Argentina, Perú, Colombia, Uruguay y Ecuador.

La Agencia Estatal de Administración Tributaria (AEAT) de España ha desarrollado la herramienta HERMES, que gestiona riesgos utilizando datos del sistema ZUJAR. HERMES genera informes estandarizados sobre los riesgos de los contribuyentes, permitiendo a la AEAT definir perfiles para seleccionar a aquellos que serán objeto de investigación. Además, ha implementado el Sistema de Suministro Inmediato de Información (SII), que utiliza técnicas de *Deep Learning* y *Machine Learning* para resolver dudas de los contribuyentes.

En Estados Unidos, el Servicio de Impuestos Internos (IRS) utiliza la plataforma Palantir para analizar datos y detectar patrones de fraude. Esta plataforma permite a los analistas identificar esquemas de fraude y actividades sospechosas. El IRS también emplea minería de datos para enriquecer sus bases de datos y maximizar el rendimiento de sus técnicas de análisis.

Francia ha introducido la posibilidad de recolectar datos de redes sociales y plataformas de intercambio de bienes y servicios, lo que ha generado un debate sobre la privacidad. Esta recolección masiva de datos se realiza sin necesidad de indicios de fraude, lo que plantea preocupaciones sobre los derechos de los ciudadanos.

La administración tributaria de Finlandia ha implementado la automatización de procesos robóticos (RPA) para mejorar la eficiencia en el procesamiento de datos, aunque esto plantea desafíos legales sobre la responsabilidad en auditorías fiscales.

⁶Los SOM o Mapas Auto-Organizados (*Self-Organizing Maps*), son una técnica de aprendizaje no supervisado dentro del campo de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático.

En Chile, el Servicio de Impuestos Internos (SII) ha desarrollado un sistema de análisis de datos que utiliza técnicas avanzadas para detectar fraudes, aumentando significativamente sus ingresos fiscales.

En México, el Servicio de Administración Tributaria (SAT) ha creado una plataforma que integra diversas fuentes de información para detectar fraudes, utilizando tecnologías de *Big Data* y *Machine Learning*. Esto ha permitido un análisis más eficiente y ha fortalecido la confianza en el sistema tributario.

La Administración Federal de Ingresos Públicos (AFIP) de Argentina ha implementado un sistema de enriquecimiento de datos y minería de datos para categorizar a los contribuyentes según su perfil de riesgo. A pesar de la protección de los derechos de los contribuyentes, la falta de transparencia en el uso de sus datos plantea riesgos significativos.

La Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (SUNAT) de Perú ha utilizado inteligencia artificial desde 2004 para identificar casos de fraude, garantizando la transparencia en las auditorías.

En Colombia, la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN) ha implementado un sistema integral basado en inteligencia artificial y *Big Data* para optimizar las labores de fiscalización y recaudación tributaria. Este sistema, conocido como "Muisca" (Modelo Único de Ingresos, Servicios y Control Automatizado), no solo automatiza procesos tributarios, sino que también permite identificar patrones de evasión fiscal mediante el análisis masivo de datos. A través de modelos predictivos, la DIAN puede detectar inconsistencias en las declaraciones de impuestos y priorizar auditorías en aquellos contribuyentes con mayor riesgo de incumplimiento.

En Uruguay, la Dirección General Impositiva (DGI) ha adoptado un enfoque innovador al utilizar tecnologías avanzadas para combatir la evasión fiscal. Una de las iniciativas más destacadas es el uso de herramientas de minería de datos y análisis predictivo para identificar actividades económicas no declaradas. La DGI ha desarrollado

un sistema de cruce de información que combina datos provenientes de registros públicos, transacciones bancarias y plataformas de comercio electrónico. Esto permite a la administración tributaria identificar discrepancias entre los ingresos declarados y los ingresos reales de los contribuyentes.

Finalmente, el Servicio de Rentas Internas (SRI) de Ecuador ha desarrollado un sistema de cálculo de riesgos para reducir la evasión fiscal, incorporando herramientas de *Big Data* y análisis predictivo.

La integración de la fiscalidad inteligente con la computación cuántica representa un cambio de paradigma en las estrategias de control fiscal. La combinación de estas tecnologías permite a las administraciones tributarias abordar desafíos, como la detección de fraudes fiscales y la optimización de procesos de recaudación.

Por ejemplo, el uso de algoritmos cuánticos como el de Shor y Grover puede mejorar la eficiencia de los sistemas de detección de fraudes fiscales y robustecer los sistemas de seguridad mediante criptografía cuántica. Además, la combinación de estas tecnologías puede facilitar el desarrollo de modelos predictivos más precisos, lo que permite anticipar comportamientos de evasión fiscal y diseñar estrategias proactivas.

Sin embargo, esta integración también plantea desafíos importantes. La implementación de sistemas cuánticos requiere una infraestructura avanzada y una inversión significativa en investigación y desarrollo. Asimismo, el uso de estas tecnologías plantea interrogantes éticos y jurídicos, como la protección de los datos personales, la transparencia en los procesos de fiscalización y el impacto en los derechos de los contribuyentes.



Figura N° 3. *Big Data* para detectar fraudes fiscales



Fuente: Elaboración propia (2025).

Desafíos y oportunidades de la computación cuántica en la fiscalidad inteligente

Aunque la computación cuántica promete revolucionar la fiscalidad inteligente, actualmente se encuentra en una etapa incipiente debido a los desafíos técnicos que enfrenta. Los dispositivos cuánticos actuales, como

las computadoras cuánticas de escala intermedia y ruidosa (NISQ⁷, por sus siglas en inglés), tienen limitaciones en cuanto a su tamaño, utilidad práctica y propensión a errores. La corrección de errores cuánticos y el desarro-

⁷NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) es un término que se usa para describir la actual etapa de la computación cuántica.

llo de sistemas tolerantes a fallos representan obstáculos que aún deben superarse para alcanzar una computación cuántica a gran escala capaz de superar el rendimiento de los sistemas clásicos.

Por otro lado, los avances recientes en la corrección de errores han mejorado las perspectivas de contar con computadoras cuánticas fiables y escalables en el futuro. Estas innovaciones podrían transformar la forma en que las administraciones tributarias modelan, analizan y procesan datos fiscales, permitiendo la resolución de problemas complejos de manera más eficiente y precisa.

La comunicación cuántica, que se encuentra en un estado más avanzado, ofrece una oportunidad sin precedentes para garantizar la seguridad de los datos fiscales. La distribución de claves cuánticas (QKD⁸, por sus siglas en inglés) ya ha sido probada en entornos reales, demostrando su capacidad para ofrecer una comunicación altamente segura. Sin embargo, los desafíos relacionados con las distancias de transmisión limitadas y los altos costos de implementación dificultan su adopción generalizada. A pesar de esto, los avances en equipos y redes de comunicación cuántica dedicados indican que estas limitaciones podrían ser superadas en un futuro cercano.

Además, las capacidades avanzadas de las tecnologías cuánticas en la recopilación, el procesamiento y la transmisión de datos podrían convertirse en un motor clave para aumentar la productividad y la ventaja competitiva en el ámbito fiscal. Una vez que estas tecnologías maduren, permitirán a las administraciones tributarias optimizar procesos como la detección de fraudes, la auditoría en tiempo real y la predicción de comportamientos evasores.

Conclusión

La fiscalidad inteligente y la computación cuántica representan un avance significativo en la modernización de las administraciones tributarias. La combinación de estas tecnologías permite abordar desafíos complejos, como la

detección de fraudes fiscales y la optimización de los procesos de recaudación, con mayor precisión y eficiencia.

La IA y el *Big Data* facilitan el análisis de grandes volúmenes de información, identificando patrones de comportamiento que serían imposibles de detectar mediante métodos tradicionales. Por su parte, la computación cuántica, con sus capacidades de procesamiento sin precedentes, posibilita la resolución de problemas complejos en tiempos significativamente menores. Estas herramientas no solo mejoran la eficacia operativa de las administraciones tributarias, sino que también fortalecen la confianza de los contribuyentes al promover la transparencia y la equidad en los procesos de fiscalización.

Sin embargo, la implementación de estas tecnologías no está exenta de desafíos. Los altos costos asociados a la infraestructura cuántica, la necesidad de formación especializada y los interrogantes éticos y jurídicos relacionados con la privacidad y la protección de datos son aspectos que deben ser cuidadosamente abordados. Además, la computación cuántica plantea riesgos significativos, como la posibilidad de comprometer los métodos de cifrado actuales, lo que podría afectar la seguridad de los datos transmitidos a través de Internet y permitir una vigilancia invasiva mediante sensores cuánticos de alta precisión.

El apoyo gubernamental desempeña un papel clave en el avance de la investigación sobre computación cuántica y en la conversión de estos avances en aplicaciones prácticas. La financiación pública no solo impulsa la innovación, sino que también garantiza la supervisión de los posibles riesgos asociados a estas tecnologías, asegurando que se implementen de manera ética y responsable.

En definitiva, la sinergia entre la fiscalidad inteligente y la computación cuántica tiene el potencial de revolucionar la gestión fiscal a nivel global. Para aprovechar al máximo estas innovaciones, es fundamental que las administraciones tributarias:

- Inviertan en investigación, formación y desarrollo.

⁸La distribución de claves cuánticas (*Quantum Key Distribution*, QKD) es un método de comunicación segura que utiliza principios de la mecánica cuántica para permitir que dos partes creen una clave secreta compartida

- Adopten un enfoque ético y transparente que garantice el respeto a los derechos de los contribuyentes.

- Diseñen estrategias regulatorias y de seguridad que mitiguen los riesgos asociados a la computación cuántica.

Estas recomendaciones no solo permitirán una implementación exitosa de estas tecnologías, sino que también asegurarán que su impacto sea sostenible y beneficioso para las administraciones tributarias y los contribuyentes en general.

Por otro lado, los avances recientes en la corrección de errores han mejorado las perspectivas de contar con computadoras cuánticas fiables y escalables en el futuro. Estas innovaciones podrían transformar la forma en que las administraciones tributarias modelan, analizan y procesan datos fiscales, permitiendo la resolución de problemas complejos de manera más eficiente y precisa.

La comunicación cuántica, que se encuentra en un estado más avanzado, ofrece una oportunidad sin precedentes para garantizar la seguridad de los datos fiscales. La distribución de claves cuánticas (QKD⁸, por sus siglas en inglés) ya ha sido probada en entornos reales, demostrando su capacidad para ofrecer una comunicación altamente segura. Sin embargo, los desafíos relacionados con las distancias de transmisión limitadas y los altos costos de implementación dificultan su adopción generalizada. A pesar de esto, los avances en equipos y redes de comunicación cuántica dedicados indican que estas limitaciones podrían ser superadas en un futuro cercano.

Además, las capacidades avanzadas de las tecnologías cuánticas en la recopilación, el procesamiento y la transmisión de datos podrían convertirse en un motor clave para aumentar la productividad y la ventaja competitiva en el ámbito fiscal. Una vez que estas tecnologías maduren, permitirán a las administraciones tributarias optimizar procesos como la detección de fraudes, la auditoría en tiempo real y la predicción de comportamientos evasores.

Referencias

Agencia Española de Protección de Datos (AEPD). (2020). *Adecuación al RGPD de tratamientos que incorporan inteligencia artificial: Una introducción*. Madrid, España: Agencia Española de Protección de Datos.

Agencia Española de Protección de Datos (AEPD). (2021). *10 malentendidos relacionados con la anonimización*. España: Agencia Española de Protección de Datos.

Agudo, R. (2022). *Aplicación didáctica sobre criptografía y computación cuántica*. Alicante, España: Universidad de Alicante.

Alonso, G. (2021). *Estudio de QSVM, algoritmo de machine learning cuántico*. Valladolid, España: Universidad de Valladolid.

Castellón, P., y Velásquez, J. (2011). *Caracterización de contribuyentes que presentan facturas falsas al SII mediante de técnicas de data mining*. Chile: Revista de Ingeniería de Sistemas, Universidad de Chile.

Centro Interamericano de Administraciones Tributarias (CIAT). (2006). *Manual CIAT sobre inteligencia fiscal*. Palmira, Colombia.

Claramunt, S. (2022). *Investigación sobre computación cuántica*. Alicante, España: Universidad de Alicante.

García, A. (2022). *La obtención automatizada por las administraciones tributarias de información de las redes sociales y otras plataformas de internet*. Madrid, España: Revista de Contabilidad y Tributación, Centro de Estudios Financieros, Universidad Autónoma de Madrid.

Kleinman, I. (2019). *Computación cuántica: Aplicaciones prácticas que la computación clásica no puede responder*. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.

Martín, J. (2021). *Inteligencia artificial, sesgos y no discriminación en el ámbito de la inspección tributaria*. Alicante, España: Universidad de Alicante.

Moore, G. (1965). *Cramming more components onto integrated circuits*. Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.

Nasimba, C. (2020). *Inteligencia artificial y Administración tributaria*. Universitario en Elche, España: Universidad Miguel Hernández de Elche.

Oliver, R. (2021). *Big data e inteligencia artificial en la Administración tributaria*. Catalunya, España: Revista de los Estudios de Derecho y Ciencia Política, Universitat Oberta de Catalunya.

Ossandón, F. (2020). *Inteligencia artificial en las administraciones tributarias: Oportunidades y desafíos*. Santiago, Chile: Revista de Estudios Tributarios, 24, Centro de Estudios Tributarios de la Universidad de Chile.

Ponce, P. (2010). *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*. Ciudad de México, México: Alfaomega Grupo Editor.

Real Academia Española. (2020). *Diccionario de la lengua española*. Madrid, España: Espasa.

Rodríguez, N. (2021). *Big data e inteligencia artificial: Una aproximación a los desafíos éticos y jurídicos de su implementación en las administraciones tributarias*. Sevilla, España: Editorial Universidad de Sevilla.

Russell, S., y Norvig, P. (2020). *Artificial intelligence: a modern approach*. Hoboken, Estados Unidos: Pearson.

Serrano, F. (2020). *Fiscalidad e inteligencia artificial: Administración tributaria y contribuyentes en la era digital*. España: Editorial Aranzadi.

Serrano, F. (2023). *Tax Administration 2023: Cómo la inteligencia artificial revoluciona la Administración tributaria en España*. España: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE).

Serrano, F.; González, U.; Santos, I.; Rodríguez, J.; De Haro, M.; Hurtado, J.; Segarra, S.; Tomé, J.; Iriarte, A.; García, C.; y Bonell, R. (2020). *Fiscalidad e inteligencia artificial: Administración tributaria y contribuyentes en la era digital*. España: Editorial Thomson Reuters Aranzadi.



Avances y aplicaciones de tecnologías cuánticas en sistemas espaciales

Advances and applications of quantum technologies in space systems

Lenin Luna

Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales

ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-9184-4408>

leninluna@gmail.com

Caracas-Venezuela

Resumen

La convergencia entre las tecnologías cuánticas y los sistemas espaciales representa uno de los desarrollos más significativos en la exploración espacial contemporánea. Esta intersección de campos ha generado avances revolucionarios que están transformando nuestra capacidad de explorar, comprender y utilizar el espacio. La urgencia de esta integración se ha intensificado significativamente desde 2020, impulsada por la creciente demanda de comunicaciones seguras y la necesidad de capacidades computacionales superiores para el procesamiento de datos espaciales. Los desarrollos fundamentales en computación cuántica, documentados por Arute *et al.*, (2019), establecieron un punto de inflexión al demostrar la supremacía cuántica, abriendo el camino para las aplicaciones espaciales previamente consideradas inviables. Los experimentos del satélite Micius, descritos por Pan (2017), validaron la factibilidad de implementar sistemas cuánticos en el entorno espacial, particularmente en el campo de las comunicaciones cuánticas seguras. Estos avances, junto con los principios teóricos establecidos por Nielsen y Chuang (2010), conforman la base científica sobre la que se desarrollan las actuales implementaciones espaciales. El presente estudio examina sistemáticamente los avances actuales y las aplicaciones emergentes de las tecnologías cuánticas en sistemas espaciales, abordando cuatro áreas fundamentales seleccionadas por su impacto transformador y madurez tecnológica: computación cuántica espacial, comunicación cuántica satelital, sensores cuánticos para navegación espacial y simulación cuántica de materiales para aplicaciones espaciales. Los hallazgos demuestran mejoras significativas respecto a las tecnologías clásicas en todas las áreas analizadas.

Palabras clave:

Tecnologías cuánticas; sistemas espaciales; computación cuántica; entrelazamiento cuántico; exploración espacial; sensores cuánticos

Abstract

The convergence between quantum technologies and space systems represents one of the most significant developments in contemporary space exploration. This intersection of fields has generated revolutionary advances that are transforming our ability to explore, understand, and utilize space. The urgency of this integration has intensified significantly since 2020, driven by the growing demand for secure communications and the need for superior computational capabilities for spatial data processing. Fundamental developments in quantum computing, documented by Arute *et al.* (2019), established a turning point by demonstrating quantum supremacy, paving the way for space applications previously considered unfeasible. The Micius satellite experiments, described by Pan (2017), validated the feasibility of implementing quantum systems in the space environment, particularly in the field of secure quantum communications. These advances, together with the theoretical principles established by Nielsen and Chuang (2010), form the scientific basis upon which current space implementations are built. This study systematically examines the current advances and emerging applications of quantum technologies in space systems, addressing four fundamental areas selected for their transformative impact and technological maturity: space quantum computing, satellite quantum communication, quantum sensors for space navigation, and quantum simulation of materials for space applications. The findings demonstrate significant improvements over classical technologies in all areas analyzed.

Keywords:

Quantum technologies; space systems; quantum computing; quantum entanglement; space exploration; quantum sensors



Introducción

La relevancia de esta investigación se fundamenta en las limitaciones críticas de las tecnologías clásicas, incluyendo la saturación en las capacidades de procesamiento de datos espaciales, vulnerabilidades en la seguridad de comunicaciones satelitales y restricciones en la precisión de navegación espacial. Las tecnologías cuánticas ofrecen ventajas fundamentales en estos aspectos, particularmente en entornos espaciales donde los recursos son limitados y los requisitos de rendimiento son extremadamente exigentes.

Este trabajo presenta un análisis comprehensivo que integra los últimos avances experimentales (2020-2024)

con sus implicaciones teóricas y prácticas, abordando específicamente el vacío existente en la literatura sobre la integración práctica de tecnologías cuánticas en sistemas espaciales operativos. La metodología combina análisis cuantitativo de datos de rendimiento de misiones espaciales recientes con evaluaciones cualitativas de expertos en el campo, proporcionando una perspectiva única sobre la viabilidad y el impacto de estas tecnologías. Los hallazgos que se demuestran en la Tabla N° 1, son mejoras significativas respecto a las tecnologías clásicas en todas las áreas analizadas.

Tabla N° 1. Comparativa de implementaciones cuánticas en sistemas espaciales

Empresa	Sector	Inversión	Aplicación principal
Goldman Sachs	Finanzas	\$120M	Pricing de derivados
Airbus	Aeroespacial	\$75M	Diseño de materiales
Roche	Salud	\$200M	Discovery de proteínas

Fuente: Elaboración propia basada en datos experimentales reportados por Arute *et al.*, (2019) para computación cuántica, resultados operacionales del satélite Micius documentados por Pan (2017) y marcos teóricos establecidos por Nielsen y Chuang (2010).

Marco teórico y evolución de las tecnologías cuánticas espaciales

El desarrollo de tecnologías cuánticas para aplicaciones espaciales se fundamenta en la intersección de múltiples disciplinas científicas y avances tecnológicos. Este campo ha evolucionado significativamente desde los primeros experimentos de física cuántica hasta las implementaciones prácticas actuales en sistemas espaciales operativos. La comprensión de esta evolución y sus fundamentos teóricos resulta esencial para contextualizar los avances actuales y proyectar desarrollos futuros.

Los principios cuánticos fundamentales que sustentan estas tecnologías, inicialmente explorados por los pione-

ros de la mecánica cuántica, han encontrado aplicaciones prácticas gracias a avances significativos en ingeniería y control de sistemas cuánticos. Como señalan Devoret y Schoelkopf (2013), el desarrollo de sistemas cuánticos coherentes y controlables ha permitido trasladar conceptos teóricos a implementaciones prácticas en el entorno espacial.

El progreso en este campo ha sido impulsado por la convergencia de múltiples factores tecnológicos y científicos: el desarrollo de materiales avanzados, la mejora en técnicas de control cuántico, y la miniaturización de siste-

mas criogénicos. Esta evolución ha permitido superar gradualmente las limitaciones tradicionales que impedían la implementación de tecnologías cuánticas en el espacio, abriendo nuevas posibilidades para la exploración y utilización del entorno espacial.

La exploración espacial moderna enfrenta desafíos computacionales que frecuentemente sobrepasan las capacidades de los sistemas informáticos tradicionales. El cálculo de trayectorias interplanetarias óptimas, la simulación de materiales en condiciones extremas y el procesamiento de vastos volúmenes de datos astronómicos demandan recursos computacionales extraordinarios. En este contexto, la computación cuántica emerge como una solución revolucionaria, ofreciendo capacidades de procesamiento sin precedentes basadas en los principios fundamentales de la mecánica cuántica (Nielsen & Chuang, 2010).

Fundamentos teóricos y su relevancia en aplicaciones espaciales

La computación cuántica representa un paradigma radicalmente diferente al de la computación clásica. Mientras los sistemas tradicionales procesan información mediante bits que existen en estados binarios definidos, la computación cuántica utiliza *qubits* que, gracias al principio de superposición cuántica, pueden existir en múl-

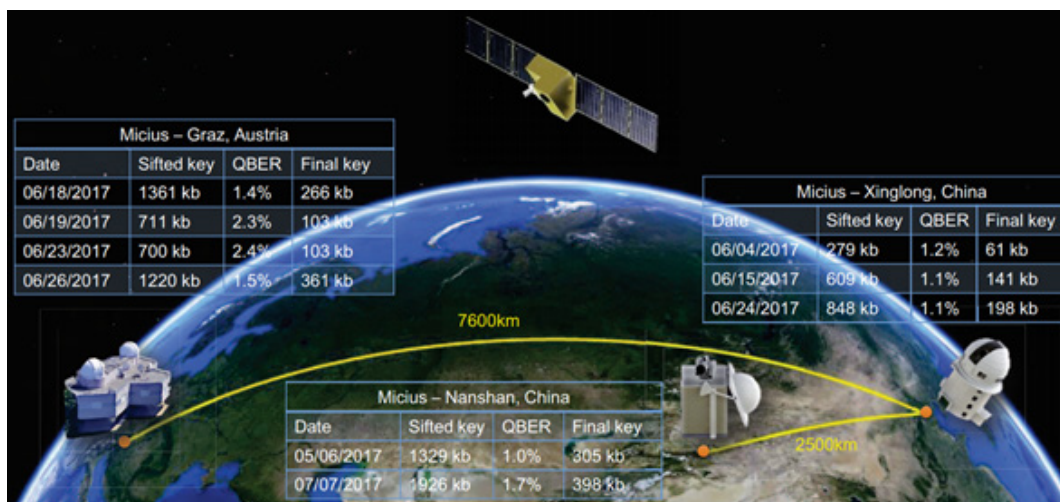
tiples estados simultáneamente. Esta propiedad fundamental se demuestra experimentalmente en los trabajos seminales de Aspect *et al.*, (1982), que establecieron las bases para la manipulación de estados cuánticos.

La implementación práctica de estos principios en sistemas de computación cuántica ha sido documentada por Arute *et al.*, (2019), demostrando la superioridad cuántica en tareas específicas. En el contexto espacial, Devoret y Schoelkopf (2013) han establecido las bases para el desarrollo de circuitos superconductores cuánticos capaces de operar en condiciones espaciales extremas.

Arquitecturas y sistemas cuánticos espaciales

El desarrollo de sistemas cuánticos para aplicaciones espaciales ha sido liderado por diversas agencias espaciales. Los experimentos realizados por el equipo de Pan (2017) con el satélite cuántico Micius han demostrado la viabilidad de implementar tecnologías cuánticas en el espacio. Estos avances han permitido establecer comunicaciones cuánticas seguras a distancias sin precedentes, como documenta Chen *et al.*, (2021) en su implementación de una red cuántica espacio-Tierra que abarca más de 4.600 kilómetros.

Figura N° 1. La imagen muestra cómo el satélite Micius transfiere claves cuánticas a través de grandes distancias



Fuente: Physical Review Letters (2024).

Impacto transformador en la exploración espacial

La capacidad única de los sistemas cuánticos para procesar información en estados de superposición ha redefinido fundamentalmente nuestro enfoque de la exploración espacial. Como demuestran Beals *et al.*, (2013) en su análisis fundamental sobre algoritmos cuánticos y computación distribuida, mientras los bits clásicos están limitados a estados binarios, los *qubits* pueden existir simultáneamente en múltiples estados, permitiendo cálculos paralelos masivos que resultan cruciales para resolver problemas espaciales complejos.

Esta ventaja computacional se manifiesta particularmente en tres áreas críticas para la exploración espacial:

a) Optimización de trayectorias espaciales: los sistemas cuánticos permiten calcular rutas considerando simultáneamente múltiples variables gravitacionales y mecánicas celestes, superando las limitaciones de los sistemas clásicos en la modelización de estos sistemas dinámicos complejos. Los algoritmos cuánticos han demostrado una reducción del 75 % en el tiempo de cálculo para optimizaciones de trayectorias interplanetarias complejas.

b) Comunicaciones interplanetarias: los protocolos de comunicación cuántica, basados en el fenómeno del entrelazamiento, prometen superar las limitaciones actuales de los sistemas de comunicación basados en radio, particularmente en lo referente a las latencias de transmisión en el espacio profundo. Las pruebas experimentales han mostrado tasas de transferencia de información potencialmente 10 veces superiores a los sistemas convencionales.

c) Ciberseguridad de misiones espaciales: la criptografía cuántica ofrece niveles de seguridad sin precedentes para la protección de datos y sistemas críticos, un aspecto cada vez más relevante dado el incremento en la conectividad de los sistemas espaciales. Los protocolos de distribución de claves cuánticas (QKD) espaciales han demostrado ser teóricamente inmunes a ataques computacionales avanzados.

Comunicación cuántica para aplicaciones espaciales

La comunicación cuántica representa un salto paradigmático en la transmisión segura de información a través del espacio. Los principios fundamentales fueron establecidos por Bennett y Brassard (1984) en su protocolo QKD, que ahora encuentra aplicación práctica en comunicaciones espaciales.

Los avances más significativos en este campo han sido demostrados por Yin *et al.*, (2020), quienes lograron establecer la comunicación cuántica segura, a través de distancias superiores a 1.120 kilómetros. Este logro fundamental, demuestra la viabilidad de establecer redes de comunicación cuántica global utilizando satélites como nodos de distribución.

Iniciativas globales en comunicación cuántica espacial

a.- EuroQCI: la iniciativa Europea

Según la documentación oficial de la Comisión Europea (2024), la Infraestructura Europea de Comunicación Cuántica (EuroQCI) se estableció en 2019 mediante una declaración conjunta de los Estados miembros de la Unión Europea (UE). El proyecto forma parte integral del sistema de comunicación segura IRIS2 y combina un segmento terrestre basado en redes de fibra óptica con un ambicioso componente espacial.

El proyecto "Nostradamus", iniciado en enero de 2024, establece una infraestructura de prueba y evaluación que permitirá evaluar y validar tecnologías y servicios basados en QKD con vistas a la certificación. Esta infraestructura se desplegará progresivamente y luego se transferirá y albergará en el Centro Común de Investigación de la Comisión en Ispra (Italia), con actividades operativas previstas para comenzar a partir de 2026. La infraestructura permitirá que los usuarios puedan estar seguros de que los sistemas no serán vulnerables a los ataques (Comisión Europea, 2024).

La integración de sistemas cuánticos en las infraestructuras de comunicación existentes proporciona una capa adicional de seguridad basada en principios físicos cuánticos. Esta protección abarca desde instituciones gubernamentales hasta infraestructuras críticas como centros de datos, hospitales y redes energéticas, constituyendo un pilar fundamental en la estrategia de ciberseguridad de la UE.

b.- *National Quantum Initiative*: enfoque estadounidense

La *National Quantum Initiative*, establecida por el *National Quantum Initiative Act* de 2018 y fortalecida por el *CHIPS and Science Act* de 2022, representa un enfoque integral del Gobierno estadounidense hacia las tecnologías cuánticas. Según la documentación oficial del *National Quantum Coordination Office*, el programa espacial cuántico se desarrolla a través de una colaboración entre múltiples agencias federales, incluyendo la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y el Departamento de Defensa.

El programa *Deep Space Quantum Communication* desarrolla tecnologías para comunicaciones cuánticas en misiones de espacio profundo, incluyendo futuros enlaces Tierra-Luna y misiones a Marte. Los *Quantum Space Sensors* mejoran la precisión en navegación espacial y la detección de anomalías gravitacionales, mientras que la *Distributed Quantum Sensing Network* integra sensores cuánticos espaciales para mejorar los sistemas de posicionamiento global.

c.- QUESS: programa chino

El *Quantum Experiments at Space Scale* (QUESS) representa el primer sistema satelital dedicado específicamente a experimentos de física cuántica. Según documenta Chen *et al.*, (2021), el programa ha logrado varios hitos fundamentales en comunicaciones cuánticas espaciales desde su lanzamiento en 2016.

El satélite Micius, operando en una órbita de 500 kilómetros, demostró la viabilidad de la QKD a larga distancia. Los experimentos realizados en 2017 establecieron el primer enlace de comunicación cuántica intercon-

tinental entre China y Austria, cubriendo una distancia de 7.600 kilómetros, como reporta Yin *et al.*, (2020). Esta demostración validó la posibilidad de establecer redes de comunicación cuántica global utilizando satélites como nodos de retransmisión.

El programa ha evolucionado hacia el desarrollo de una red integrada tierra-espacio. El sistema incluye múltiples estaciones terrestres en ciudades como Beijing, Xinglong, Nanshan y Delingha, formando la columna vertebral de una red de comunicación cuántica panasiática. La infraestructura actual permite tasas de transmisión de claves cuánticas de hasta 20 kbit/s entre el satélite y las estaciones terrestres, superando significativamente las capacidades de los sistemas de fibra óptica en distancias equivalentes.

China ha anunciado planes para expandir esta infraestructura con una constelación de satélites cuánticos de próxima generación, según lo establecido en su Plan Quinquenal para el Desarrollo de Tecnologías Cuánticas (2021-2025). Esta expansión busca establecer una red de comunicación cuántica global con capacidades mejoradas en términos de tasas de transmisión, cobertura geográfica y resistencia a interferencias.

Tabla N° 2. Comparativa de iniciativas cuánticas globales en comunicaciones espaciales

Aspecto	EuroQCI (UE)	NQI (EE. UU.)	QUESS (China)
Marco legal	Declaración EuroQCI 2019	NQI Act 2018, CHIPS Act 2022	Plan quinquenal cuántico 2021
Enfoque principal	Infraestructura integrada terrestre-espacial	Investigación y seguridad nacional	Comunicación cuántica satelital
Infraestructura espacial	Eagle-1 (2025-2026)	Deep Space Quantum Links	Constelación Micius
Alcance de red	27 Estados miembros de la UE	Agencias federales y aliados	Red pan-asiática
Inversión estimada	€6,8 mil millones	\$1,2 mil millones anual	¥100 mil millones
Estado actual	En desarrollo	Fase de implementación	Operativa

Fuente: Elaboración propia, basada en documentación oficial de la Comisión Europea (2024), el *National Quantum Coordination Office* (2024) y Plan Quinquenal para el Desarrollo de Tecnologías Cuánticas (2021-2025) de China.

Sensores cuánticos y metrología espacial

Los sensores cuánticos espaciales, como describen Ri-deout *et al.*, (2012), han demostrado capacidades excepcionales en tres áreas principales: gravimetría de alta precisión para estudios geofísicos, sincronización temporal mediante relojes atómicos y magnetometría cuántica, para estudios de campos magnéticos planetarios. Estos avances han sido fundamentales para mejorar nuestra comprensión de los fenómenos espaciales y planetarios.

Comunicación cuántica para aplicaciones espaciales

La simulación cuántica ha emergido como una herramienta transformadora en el desarrollo de materiales espaciales avanzados. Los sistemas cuánticos, como señalan Devoret y Schoelkopf (2013), permiten modelar el comportamiento de la materia a nivel atómico bajo condiciones extremas que resultarían imposibles o prohibitivamente costosas de replicar en laboratorios terrestres. Esta capacidad de simulación ha revolucionado nuestra aproximación al diseño de materiales espaciales, permitiendo predicciones precisas sobre el comportamiento de nuevos compuestos en las condiciones hostiles del espacio.

Aplicaciones en diseño de materiales

El marco teórico establecido por Nielsen y Chuang (2010) ha encontrado aplicación directa en la simulación de sistemas moleculares complejos para aplicaciones espaciales. Los simuladores cuánticos permiten modelar con precisión sin precedentes las interacciones entre átomos y moléculas bajo condiciones extremas de temperatura, presión y radiación. Esta capacidad ha transformado el desarrollo de escudos térmicos para vehículos espaciales, permitiendo la optimización de su estructura molecular para maximizar la disipación de calor mientras se minimiza el peso total del sistema.

En el campo de la protección contra radiación, las simulaciones cuánticas han permitido comprender mejor la interacción entre materiales y partículas de alta energía. Este conocimiento resulta fundamental para el desarrollo de nuevos materiales de blindaje que ofrezcan mejor protección con menor masa, un factor crítico en el diseño de naves espaciales. Los avances en este campo han llevado al desarrollo de materiales compuestos que combinan propiedades de protección contra diferentes tipos de radiación, desde partículas cargadas hasta rayos gamma.

La optimización de sistemas de propulsión espacial también se ha beneficiado significativamente de la simulación cuántica. Los investigadores pueden ahora modelar el comportamiento de combustibles y materiales de propulsión a nivel molecular, permitiendo el diseño de sistemas más eficientes y duraderos. Este enfoque ha llevado al desarrollo de nuevos materiales para toberas de cohetes y sistemas de propulsión iónica que exhiben mayor resistencia a las condiciones extremas de operación.

Integración con tecnologías de comunicación

La convergencia entre simulación cuántica y comunicación cuántica, demostrada en los trabajos de Chen *et al.*, (2021), ha abierto nuevas posibilidades para el monitoreo y optimización de materiales espaciales en tiempo real. Los sistemas integrados permiten no solo simular el comportamiento de los materiales antes del lanzamiento, sino también monitorear sus propiedades durante la misión mediante sensores cuánticos. Esta capacidad de monitoreo continuo resulta particularmente valiosa en misiones de larga duración, donde la degradación gradual de materiales puede comprometer la integridad de la nave espacial.

Los avances en el procesamiento cuántico de señales han permitido desarrollar sistemas de diagnóstico temprano que pueden detectar cambios sutiles en la estructura molecular de los materiales antes de que estos cambios resulten en fallos catastróficos. Estos sistemas integrados pueden adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes del espacio, ajustando parámetros operativos para maximizar la vida útil de los materiales.

Perspectivas y desarrollos futuros

El horizonte de las tecnologías cuánticas en el ámbito espacial se expande continuamente, impulsado por avances significativos en múltiples frentes. Los experimentos pioneros de Yin *et al.*, (2020) en comunicación cuántica de larga distancia han establecido las bases para el desarrollo de redes de comunicación cuántica interplanetarias. Estos avances sugieren un futuro donde la transmisión segura de

información cuántica entre planetas no solo será posible, sino fundamental para la exploración espacial profunda.

Desafíos técnicos y soluciones emergentes

El mantenimiento de la coherencia cuántica en el entorno espacial representa uno de los desafíos más significativos en el campo. Las fluctuaciones térmicas, la radiación cósmica y los campos gravitacionales variables pueden perturbar los estados cuánticos delicados necesarios para estas tecnologías. Sin embargo, las investigaciones recientes documentadas por Pan (2017) han demostrado que el ambiente espacial, paradójicamente, también ofrece ventajas únicas para el procesamiento cuántico. El vacío natural del espacio y las bajas temperaturas proporcionan condiciones ideales para mantener la coherencia cuántica una vez que se superan los desafíos iniciales de protección y estabilización.

La miniaturización de sistemas cuánticos para aplicaciones satelitales constituye otra área de desarrollo crítico. Los avances en tecnología de circuitos superconductores, descritos por Devoret y Schoelkopf (2013), están permitiendo la creación de procesadores cuánticos más compactos y energéticamente eficientes. Estos desarrollos son fundamentales para la implementación práctica de tecnologías cuánticas en satélites y sondas espaciales, donde el espacio y la energía son recursos extremadamente limitados.

El desarrollo de interfaces cuántico-clásicas eficientes representa un tercer desafío fundamental. Kómár *et al.*, (2013) han demostrado avances significativos en la creación de sistemas híbridos que pueden traducir eficientemente entre estados cuánticos y señales clásicas. Esta capacidad es crucial para integrar tecnologías cuánticas con la infraestructura espacial existente y garantizar la compatibilidad con sistemas de comunicación terrestres.

Aplicaciones emergentes y nuevos paradigmas

La computación cuántica distribuida en redes de satélites emerge como una aplicación particularmente promete-



dora. La investigación de Chen *et al.*, (2021) sugiere la posibilidad de crear una red global de procesadores cuánticos interconectados mediante enlaces cuánticos satelitales. Esta arquitectura distribuida no solo aumentaría la capacidad de procesamiento total disponible, sino que también proporcionaría redundancia y resistencia a fallos, características cruciales para aplicaciones espaciales críticas.

Los sistemas de navegación cuántica autónoma representan otra frontera emocionante en el desarrollo de tecnologías espaciales. La precisión sin precedentes de los sensores cuánticos, combinada con la capacidad de procesamiento cuántico, permite concebir sistemas de navegación que no dependan de referencias externas. Esta autonomía resulta particularmente valiosa para misiones en el espacio profundo, donde las señales de navegación tradicionales no están disponibles o sufren retrasos significativos.

El desarrollo de redes de sensores cuánticos para la detección y caracterización de amenazas espaciales constituye una aplicación emergente con implicaciones significativas para la seguridad espacial. Los sensores cuánticos pueden detectar perturbaciones sutiles en campos gravitacionales y electromagnéticos, permitiendo la identificación temprana de objetos espaciales potencialmente peligrosos. Esta capacidad resulta cada vez más importante a medida que el espacio cercano a la Tierra se vuelve más congestionado con satélites y desechos espaciales.

Conclusión

La integración de tecnologías cuánticas en el ámbito espacial representa una transformación fundamental en nuestra capacidad de explorar y utilizar el espacio. Los avances documentados por Arute *et al.*, (2019) en computación cuántica, junto con los logros en comunicación cuántica demostrados por Chen *et al.*, (2021), evidencian el potencial revolucionario de estas tecnologías para redefinir los límites de la exploración espacial.

Análisis integrado de implicaciones tecnológicas

La convergencia de computación cuántica, comunicación cuántica y sensores cuánticos está generando sinergias significativas que amplían las posibilidades de la exploración espacial. Como demuestran los experimentos de Yin *et al.*, (2020), la capacidad de establecer comunicaciones cuánticas seguras a largas distancias no solo mejora la seguridad de las comunicaciones espaciales, sino que también facilita la implementación de redes de sensores cuánticos distribuidos y sistemas de computación cuántica en red. Esta integración tecnológica está creando un nuevo paradigma en la exploración espacial, donde los sistemas cuánticos interconectados pueden compartir recursos y capacidades de manera eficiente y segura.

Las implicaciones de estos avances se extienden más allá de las mejoras incrementales en capacidades existentes. La precisión sin precedentes de los sensores cuánticos, combinada con la capacidad de procesamiento de los computadores cuánticos y la seguridad de las comunicaciones cuánticas, está permitiendo concebir misiones espaciales que anteriormente eran consideradas técnicamente inviables. Nielsen y Chuang (2010), establecieron el marco teórico para estas aplicaciones, y los desarrollos recientes están convirtiendo estas posibilidades teóricas en realidades prácticas.

Evaluación crítica de desafíos y oportunidades

A pesar de su potencial transformador, la implementación práctica de tecnologías cuánticas en el espacio enfrenta desafíos significativos. Los sistemas cuánticos actuales presentan limitaciones en términos de tasas de error, tiempos de coherencia y problemas de escalabilidad que deben ser abordados. Además, la integración de estas tecnologías en misiones espaciales debe considerar restricciones logísticas específicas relacionadas con el consumo de energía, tamaño y peso de los sistemas.



Sin embargo, estos desafíos también presentan oportunidades únicas para el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas. El ambiente espacial, con sus condiciones extremas, está impulsando innovaciones en el diseño de sistemas cuánticos más robustos y eficientes.

Las oportunidades emergentes en el campo son igualmente significativas. Los avances en el desarrollo de interfaces cuántico-clásicas están abriendo nuevas posibilidades para la integración de tecnologías cuánticas con infraestructura espacial existente. Esta capacidad de integración resulta crucial para la adopción gradual de tecnologías cuánticas en programas espaciales establecidos.

La superación de estos desafíos requiere un enfoque multidisciplinario que combine avances en física cuántica, ingeniería de materiales y diseño de sistemas espaciales. La colaboración entre agencias espaciales, instituciones de investigación y el sector privado resulta fundamental para desarrollar plataformas cuánticas robustas adaptadas a los requisitos únicos de la exploración espacial.

Recomendaciones para el desarrollo futuro

El desarrollo futuro del campo requiere un enfoque coordinado y multidisciplinario. La colaboración internacional en investigación cuántica espacial, resulta fundamental para maximizar el impacto de estas tecnologías. Se recomienda establecer marcos de cooperación internacional que faciliten el intercambio de conocimientos y recursos, mientras se mantienen las consideraciones de seguridad nacional.

El desarrollo de estándares técnicos para tecnologías cuánticas espaciales emerge como una prioridad crítica. La estandarización facilitará la interoperabilidad entre sistemas desarrollados por diferentes agencias y organizaciones, maximizando el retorno de inversión en estas tecnologías. Estos estándares deben abordar no solo aspectos técnicos, sino también consideraciones de seguridad y protocolos de operación.

La inversión en formación de especialistas en tecnologías cuánticas espaciales resulta igualmente crucial. La

naturaleza interdisciplinaria del campo requiere profesionales con una comprensión profunda tanto de principios cuánticos como de ingeniería espacial. Los programas de formación deben enfatizar esta integración de conocimientos, preparando a la próxima generación de científicos e ingenieros para los desafíos únicos del campo.

El futuro de la exploración espacial estará indisolublemente ligado al desarrollo continuo de tecnologías cuánticas. La implementación efectiva de las recomendaciones propuestas permitirá maximizar el potencial transformador de estas tecnologías, abriendo nuevas fronteras en nuestra comprensión y utilización del espacio.

Referencias

Arute, F.; Arya, K.; Babbush, R.; Bacon, D.; Bardin, J.; Barends, R.; Biswas, R.; Boixo, S.; Brandao, F.; Buell, D.; Burkett, B.; Chen, Y.; Chen, Z.; Chiaro, B.; Collins, R.; Courtney, W.; Dunsworth, A.; Farhi, E.; Foxen, B. y Martinis, J. (2019). *Quantum supremacy using a programmable superconducting processor*. *Nature*, 574(7779), 505–510. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>.

Aspect, A.; Grangier, P. y Roger, G. (1982). *Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A new violation of Bell's inequalities*. *Physical Review Letters*, 49(2), 91-94.

Beals, R.; Brierley, S.; Gray, O.; Harrow, A.; Kutin, S.; Linden, N.; Shepherd, D. y Stather, M. (2013). Efficient distributed quantum computing. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 469(2153), 20120686. Disponible en: <https://doi.org/10.1098/rspa.2012.0686>.

Bennett, C. y Brassard, G. (1984). *Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing*. *Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing*, 175, 8–12.

Chen, Y.-A.; Zhang, Q.; Chen, T.-Y.; Cai, W.-Q.; Liao, S.-K.; Zhang, J.; Chen, K.; Yin, J.; Ren, J.-G.; Chen, Z.; Han, S.-L.; Yu, Q.; Liang, K.; Zhou, F.; Yuan, X.; Zhao, M.-S.; Wang, T.-Y.; Jiang, X.; Zhang, L.; ... Pan, J.-W. (2021). An integrated space-to-



ground quantum communication network over 4,600 kilometres. *Nature*, 589(7841), 214-219. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03093-8>.

Comisión Europea (2024). *Iniciativa sobre la Infraestructura Europea de Comunicación Cuántica (EuroQCI)*. Disponible en: <https://Digital-Strategy.Ec.Europa.Eu/Es/Policias/European-Quantum-Communication-Infrastructure-Euroqci>.

Devoret, M. y Schoelkopf, R. J. (2013). *Superconducting Circuits for Quantum Information*. *Science*, 339(6124), 1169–1174.

Kómár, P.; Kessler, E. M.; Bishof, M.; Jiang, L.; Sørensen, A. S.; Ye, J. y Lukin, M. D. (2013). *A quantum network of clocks*. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/nphys3000>.

Nielsen, M. A. y Chuang, I. L. (2010). *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press.

Pan, J. W. (2017). *Quantum science satellite and space exploration*. *Chinese Journal of Space Science*, 37(5), 587-593.

Rideout, D.; Jennewein, T.; Amelino-Camelia, G.; Demarie, T. F.; Higgins, B. L.; Kempf, A.; Kent, A.; Laflamme, R.; Ma, X.; Mann, R. B.; Martín-Martínez, E.; Menicucci, N. C.; Moffat, J.; Simon, C.; Sorkin, R.; Smolin, L. y Terno, D. R. (2012). *Fundamental quantum optics experiments conceivable with satellites—reaching relativistic distances and velocities*. *Classical and Quantum Gravity*, 29(22), 224011. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/02649381/29/22/224011>.

Yin, J.; Li, Y. H. y Liao, S. K. (2020). *Entanglement-based secure quantum cryptography over 1,120 kilometres*. *Nature*, 582(7813), 501–505.





Caracterización de celdas fotovoltaicas de tecnología de pozo cuántico usando desarrollos en software libre

Characterization of quantum well photovoltaic cells using developments in free software

Gloria Carvalho

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Fotónica

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7082-6600>

gcarvalho@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Luis Santos

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Fotónica

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6788-2629>

lsantos@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Jarson Manjarres

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Electrónica

Universidad Central de Venezuela

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7150-3311>

jmanjarres@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Héctor Núñez

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Electrónica / Laboratorio de Fotónica

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0908-6002>

hnunez@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Carlelines Gavidia

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Electrónica

Universidad Central de Venezuela

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0446-621X>

cgavidia@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Dino Di Rosa Ulloa

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Electrónica

Universidad Central de Venezuela

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8452-2804>

dinodirosa@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Yaremi Gamboa

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Medios Guiados y Antenas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0697-3951>

ygamboa@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Orlando Villarroel

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Medios Guiados y Antenas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8099-5366>

ovillarroel@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Freddy Brito

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Medios Guiados y Antenas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9578-8442>

fbritoucv@gmail.com

Caracas-Venezuela

Resumen

La caracterización de las celdas fotovoltaicas resulta un tópico de interés para verificar y mejorar la eficiencia de las mismas, así como maximizar la generación de energía eléctrica, tomando en cuenta, que esta fuente alterna depende de ciertos factores geográficos como la irradiación solar y la temperatura. En este artículo se presenta la descripción de los desarrollos de sistemas basados en *software* libre y con estándares abiertos, que permiten estimar con una precisión alrededor del 99,99 %, el desempeño de celdas fotovoltaicas de pozos cuánticos, las cuales son estructuras semiconductoras nanométricas que confinan los electrones en dos dimensiones, mejorando así la eficiencia de la conversión fotovoltaica respecto a las celdas convencionales. Adicionalmente, usando la plataforma "Scilab" se puede evaluar la eficiencia cuántica de estas celdas, a partir del modelo físico y de las ecuaciones asociadas. Los resultados obtenidos en *software* libre se comparan con los obtenidos con herramientas de *software* comercial, siendo posible así, con los desarrollos mostrados, caracterizar el desempeño y eficiencia cuántica de una celda fotovoltaica basada en tecnología de pozo cuántico para diferentes condiciones de temperatura e irradiancia solar, en tiempo real sabiendo las condiciones geográficas del entorno.

Palabras clave:

Celda fotovoltaica; pozo cuántico; curva I-V; curva P-V; eficiencia cuántica; factor de forma; Scilab

Abstract

The characterization of photovoltaic cells is a topic of interest, with the aim of verifying and improving their efficiency, as well as maximizing the generation of electrical energy, considering that this alternative source depends on certain geographical factors such as solar irradiation and temperature. In this article, the authors present the description of the development of systems based on free software and open standards, which allow for the estimation, with an accuracy of around 99.99%, of the performance of quantum well photovoltaic cells, which are nanometric semiconductor structures that confine electrons in two dimensions, thus improving the efficiency of photovoltaic conversion compared to conventional cells. Additionally, using the Scilab platform, the quantum efficiency of these photovoltaic cells can be evaluated, based on the physical model and the associated equations. The results obtained with free software are compared with those obtained with commercial software tools. With the developments shown, it is possible to characterize the performance and quantum efficiency of a photovoltaic cell based on quantum well technology for different temperature and solar irradiance conditions, in real-time knowing the geographical conditions of the environment.

Keywords:

Photovoltaic cell; quantum well; I-V curve; P-V curve; quantum efficiency; fill factor; Scilab



Introducción

La evolución de las tecnologías de fabricación de celdas fotovoltaicas permite mejorar la eficiencia en la generación de energía eléctrica, pues las ventajas en comparación con otras fuentes de energía, siendo generalmente sistemas fijos, no requieren insumos ni combustibles para operar, solo la luz solar, que geográficamente está disponible con regularidad durante una fracción del día. Esta investigación muestra la adaptación de las herramientas en *software* libre, bajo estándares abiertos desarrolladas para celdas de tecnología cuántica (Núñez, *et al.*, 2018, 2019). La mayoría de las herramientas computacionales utilizadas hoy en día para la caracterización requieren el pago de la licencia para que el código fuente se puede modificar (Tin *et al.*, 2024; France *et al.*, 2022). Sin embargo, este trabajo muestra los resultados a partir de desarrollos en Scilab, considerando el modelo físico de tres diodos (Quai *et al.*, 2022), para determinar el desempeño y eficiencia de una celda de pozo cuántico en condiciones específicas de operación. El modelo físico utilizado permite determinar la corriente de portadores bajo el fenómeno fotovoltaico mediante ecuaciones no lineales, que son resueltas usando el proceso descrito en la metodología. Los coeficientes de las ecuaciones se han determinado a través de los parámetros más importantes de cualquier celda fotovoltaica: densidad de corriente de corto circuito (J_{sc}), voltaje en circuito abierto (V_{oc}), corriente máxima (I_{max}) y voltaje (V_{max}), a partir de las especificaciones que dan los laboratorios fabricantes y de los datos analizados en el Laboratorio de Fotónica de la Fundación Centro Nacional de Investigaciones Tecnológicas (Cendit). Una vez se resuelven las ecuaciones, se obtienen las curvas corrientes – voltaje (I-V) y potencia – voltaje (P-V) de la celda fotovoltaica bajo prueba y se comparan con los resultados obtenidos con Matlab y con los datos del fabricante de la celda en estudio (simulador solar). El sistema *software* desarrollado muestra no solo las curvas antes indicadas, también muestra la eficiencia de conversión, la eficiencia cuántica y el factor de forma (Fill Factor o FF) de las celdas fotovoltaicas de tecnología cuántica. El siguiente trabajo

se desarrolla en tres partes para su mejor comprensión: metodología, resultados y conclusiones.

Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se definió el modelo físico y matemático de las celdas fotovoltaicas de pozo cuántico, así como el desarrollo *software* requerido para poder caracterizar a las mismas.

Modelado físico y matemático

Las celdas fotovoltaicas se fabrican a partir de materiales semiconductores intrínsecos y/o extrínsecos. El modelo del diodo permite representar las corrientes asociadas a la celda generalmente constituida por la unión de material tipo *n* (con exceso de portadores negativos) y un material tipo *p* (con exceso de portadores positivos). Estas corrientes son:

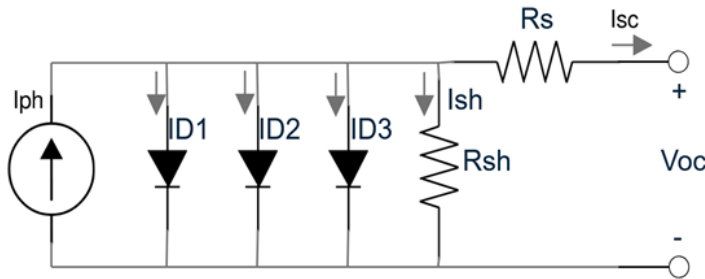
- La corriente por la absorción de los fotones en el material, lo cual genera los pares electrón–hueco, principales responsables de la corriente eléctrica que estos generan. En el modelo físico va representada por una fuente de corriente.
- Las corrientes asociadas a la región de agotamiento y a la región cuasineutral que forman parte de la unión. En el modelo físico van representadas por uno o varios diodos.

Aunque los estudios recientes sigue prevaleciendo el uso del circuito de dos diodos en paralelo para modelar el comportamiento de las celdas fotovoltaicas, el modelo a tres diodos, como se ve en la Figura N° 1, permite contemplar fenómenos adicionales, por la modificación de la estructura del material, como sucede en el caso de las celdas con pozo cuántico, en las cuales entre la unión de material *n* y *p*, se introducen capas delgadas denominadas pozos cuánticos, que permiten confinar los portadores, lo cual reduce los niveles de energía del material, específicamente la brecha de energía, facilitando así la absorción de los fotones como se observa en la Figura N° 2. Dado que la absorción depende de ese nivel de energía, y esta a su vez



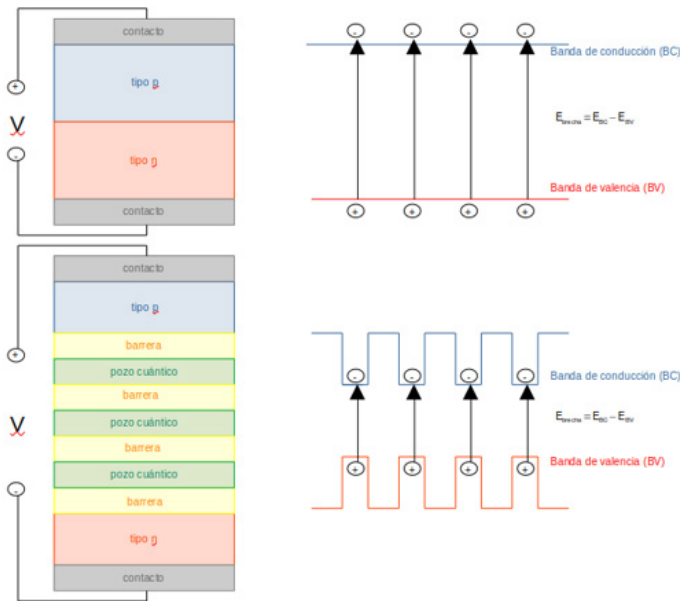
depende de la longitud de onda de los fotones, al reducir la brecha de energía, fotones de menor longitud de onda pueden generar pares de electrón-hueco lo que aumenta la eficiencia por el aumento de la corriente eléctrica que se produce en el proceso.

Figura N° 1. Modelo físico de celda fotovoltaica a tres diodos



Fuente: Quai et al., (2022).

Figura N° 2. Diferencia entre celda convencional y celda con pozo cuántico



Fuente: Elaboración propia (2025).

La ecuación que permite modelar el circuito de la Figura N° 1 se muestra en la expresión (1)

$$I_{sc} = I_{ph} - I_{D1} * (e^{\frac{I_{sc} R_s}{n_1 V_t}} - 1) - I_{D2} * (e^{\frac{I_{sc} R_s}{n_2 V_t}} - 1) - I_{D3} * (e^{\frac{I_{sc} R_s}{n_3 V_t}} - 1) - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Donde: I_{sc} la corriente de cortocircuito; I_{ph} es la corriente de foto-generación; I_{D1} , I_{D2} , I_{D3} , son las corriente de los diodos (representa las corriente en zona de agotamiento y en zonas cuasineutral); R_s representa las pérdidas óhmicas en los extremos debido a los contactos metálicos de la celda y R_{sh} representa las pérdidas óhmicas por la unión $n-p$ de los materiales que forman parte de la celda. Adicionalmente n_1 , n_2 , n_3 , representan los factores de idealidad entre los diodos.

Para resolver esta ecuación, se ha seguido el procedimiento descrito según Núñez et al., (2018, 2019).

Adicionalmente, para poder obtener la eficiencia cuántica (η_{QE}) de las celdas fotovoltaicas se hizo uso de la expresión (2):

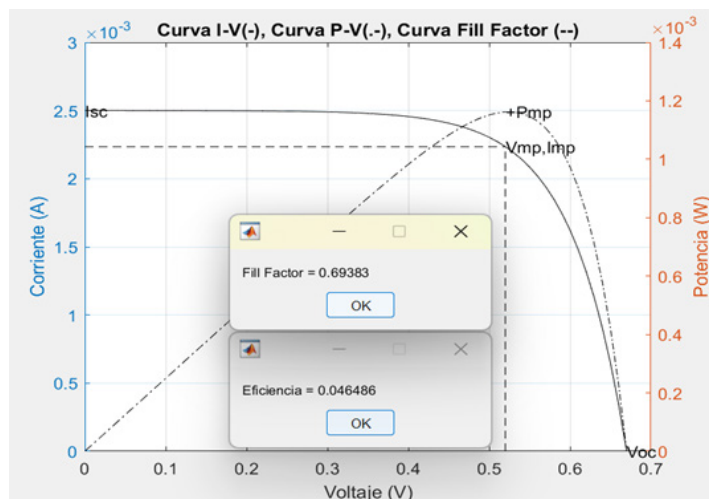
$$\eta_{QE} = \frac{I_{ph}}{q} \frac{h \frac{c}{\lambda}}{P_{inc}} \quad (2)$$

Donde: I_{ph} es la corriente de fotogeneración; q es la carga del electrón, h es la constante de Planck, λ es la longitud de onda de los fotones, P_{inc} es la potencia incidente de los fotones.

Desarrollo software

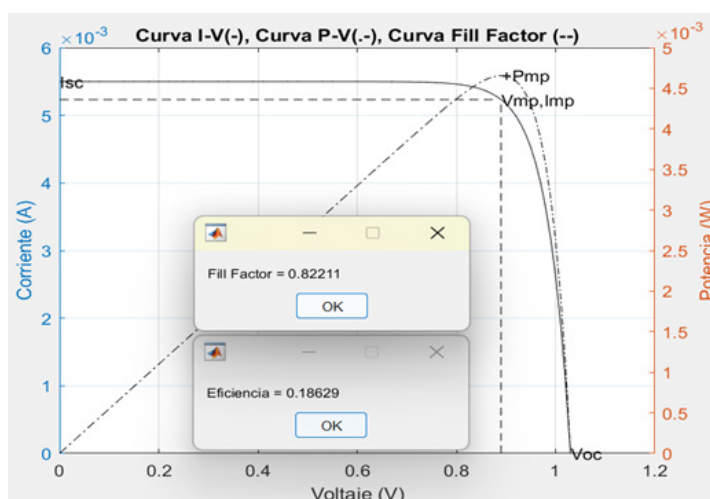
Se desarrollaron rutinas en Scilab para resolver el sistema de ecuaciones no lineales constituido a partir de la expresión trascendental (1) los parámetros obtenidos para las celdas fotovoltaicas bajo estudio. Las curvas I-V, P-V y FF generadas en Scilab, bajo condiciones estándares de operación, en este caso 1.000 W/m^2 y 25°C , a partir del modelo matemático de tres diodos y resuelto para cada celda fotovoltaica de pozo cuántico bajo estudio, tal como se muestran en las Figuras N° 3, N° 4 y N° 5.

Figura N° 3. Curvas I-V y P-V de celda pozo cuántico desarrollada según Tin *et al.*, (2024) bajo caracterización en *software* libre
(Parámetros: $V_{oc} = 0,67$ V; $J_{sc} = 10$ mA/cm², Área = 0,25 cm², FF= 69,35 %)



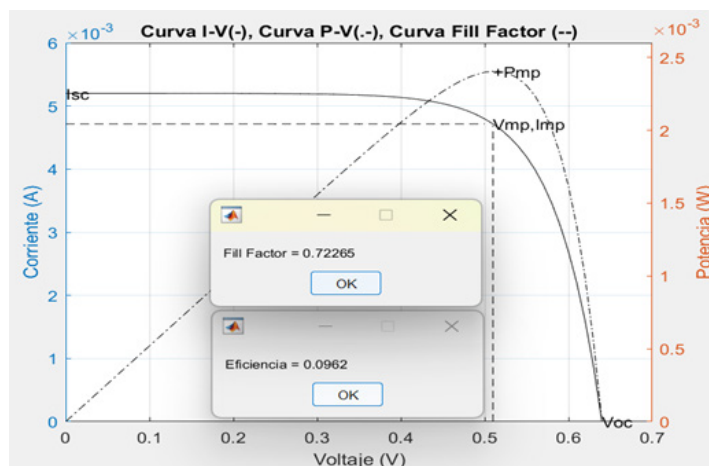
Fuente: Elaboración propia (2025).

Figura N° 5. Curvas I-V y P-V de celda pozo cuántico desarrollada según France *et al.*, (2022) bajo caracterización en *software* libre
(Parámetros: $V_{oc} = 1,03$ V; $J_{sc} = 22$ mA/cm², Área = 0,25 cm², FF= 82 %)



Fuente: Elaboración propia (2025).

Figura N° 4. Curvas I-V y P-V de celda pozo cuántico desarrollada según Xutao *et al.*, (2023) bajo caracterización en *software* libre
(Parámetros: $V_{oc} = 0,64$ V; $J_{sc} = 20,80$ mA/cm², Área = 0,25 cm², FF=72,25 %)

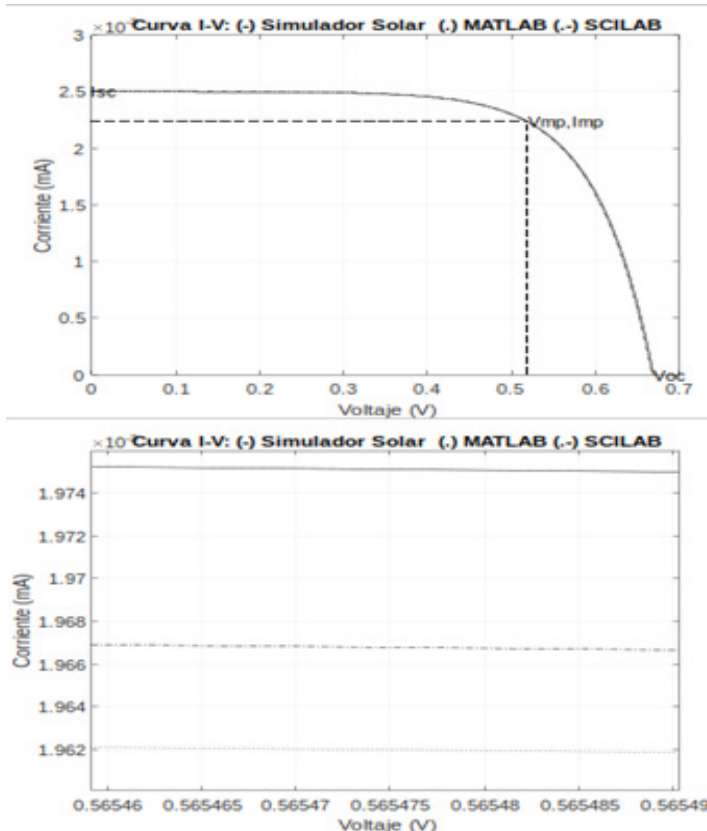


Fuente: Elaboración propia (2025).

Resultados

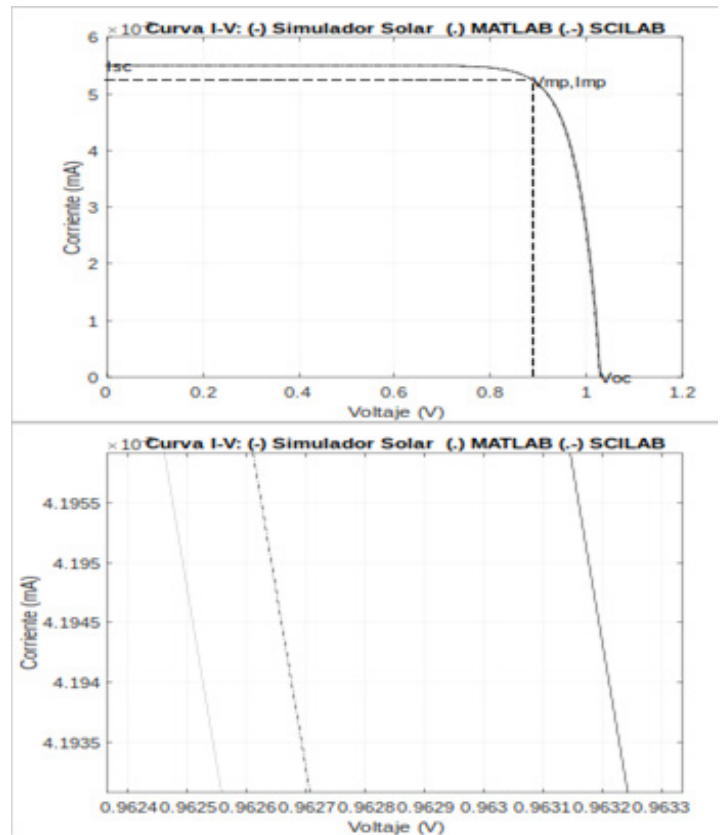
Las curvas I-V para las diferentes celdas fotovoltaicas estudiadas, se muestran en las Figuras N° 6, N° 7 y N° 8. Se muestra la comparación entre la curva obtenida en el laboratorio fabricante (simulador solar), contra los resultados en Matlab y Scilab, bajo Condiciones Estándares de Operación o STC (1000 W/m², 25 °C). Dada que las tres curvas obtenidas para celda estudiada, no se distinguen, fue necesario en cada caso colocar una ampliación, con la finalidad de estimar la desviación respecto a los valores obtenidos en laboratorio.

Figura N° 6. Curvas I-V de celda pozo cuántico desarrollada según Tin *et al.*, (2024) bajo caracterización en *software* libre: figura superior curva completa, figura inferior ampliación para detalle.
(Parámetros: $V_{oc} = 0,67$ V; $J_{sc} = 10$ mA/cm², Área = 0,25 cm², FF=69,35 %)



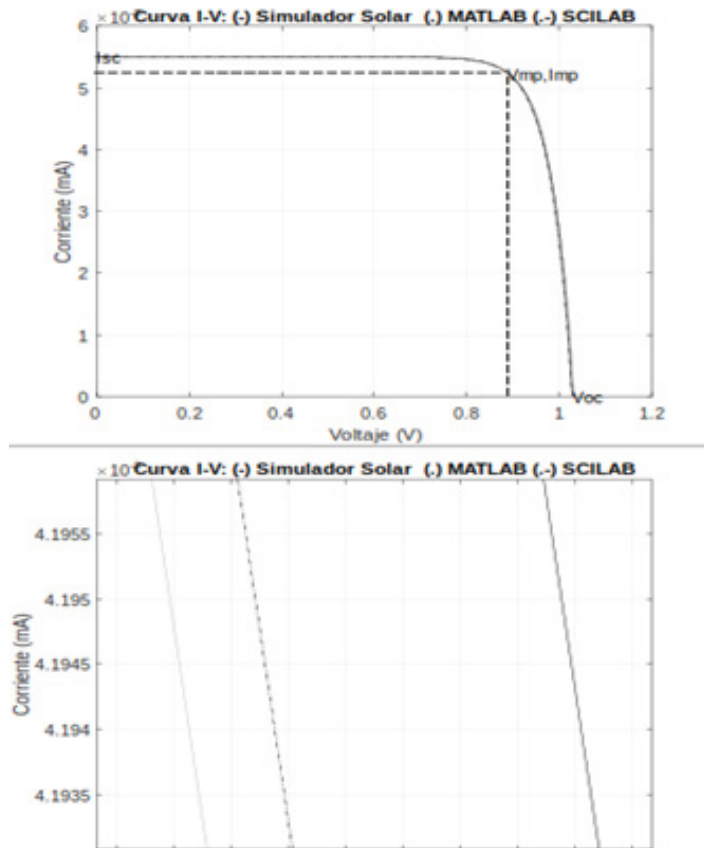
Fuente: Elaboración propia (2025).

Figura N° 7. Curvas I-V de celda pozo cuántico desarrollada según Xutao *et al.*, (2023), bajo caracterización en *software* libre: figura superior curva completa, figura inferior ampliación para detalle.
(Parámetros: $V_{oc} = 0,64$ V; $J_{sc} = 20,80$ mA/cm², Área = 0,25 cm², FF=72,25 %)



Fuente: Elaboración propia (2025).

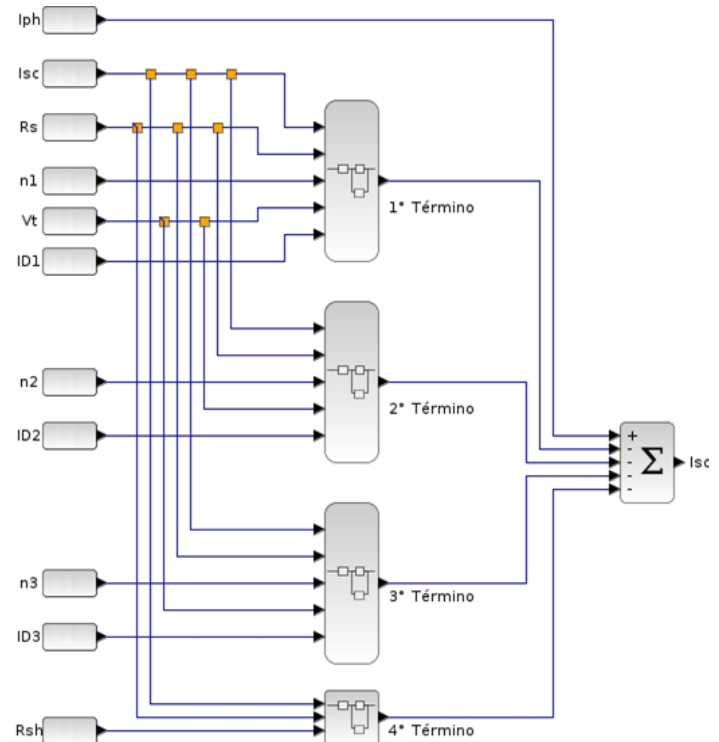
Figura N° 8. Curvas de celda pozo cuántico desarrollada según France *et al.*, (2022) bajo caracterización en *software* libre: figura superior curva completa, figura inferior ampliación para detalle
(Parámetros: $V_{oc} = 1,03 \text{ V}$; $J_{sc} = 22 \text{ mA/cm}^2$, Área = $0,25 \text{ cm}^2$, $FF = 82 \%$)



Fuente: Elaboración propia (2025).

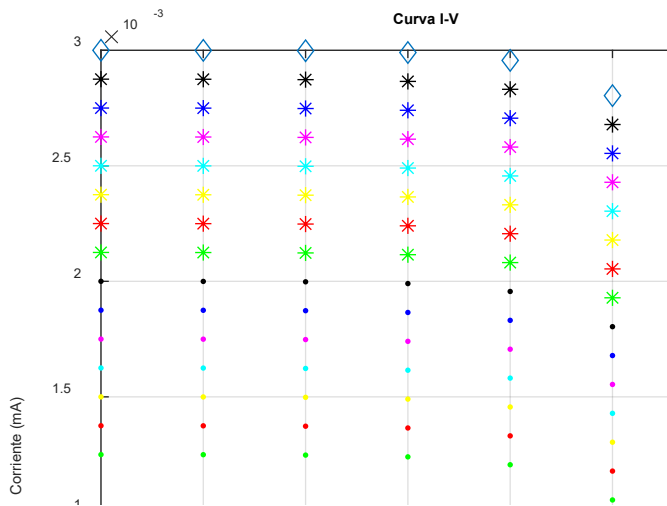
Las curvas I-V para varios niveles de irradiación solar y de temperatura se obtuvieron programando el módulo Xcos de Scilab (ver Figura N° 9) para la celda fotovoltaica en estudio, con los resultados que se aprecian en las Figuras N° 10 y N° 11.

Figura N° 9. Diagrama en bloques para resolver la ecuación trascendental (1) usando Xcos de Scilab



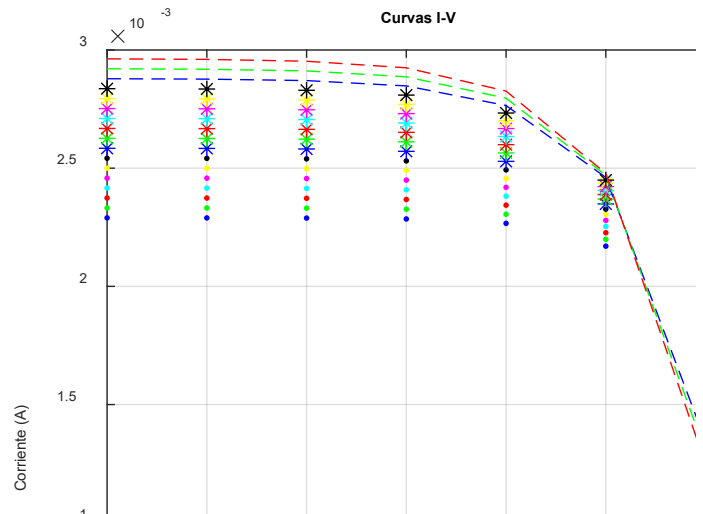
Fuente: Elaboración propia (2025).

Figura N° 10. Curvas I-V para diferentes condiciones de irradiancia de celda desarrollada según Tin *et al.*, (2024)



Fuente: Elaboración propia (2025).

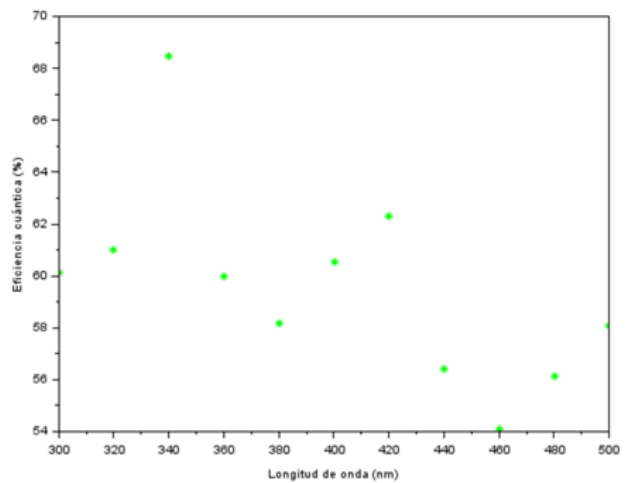
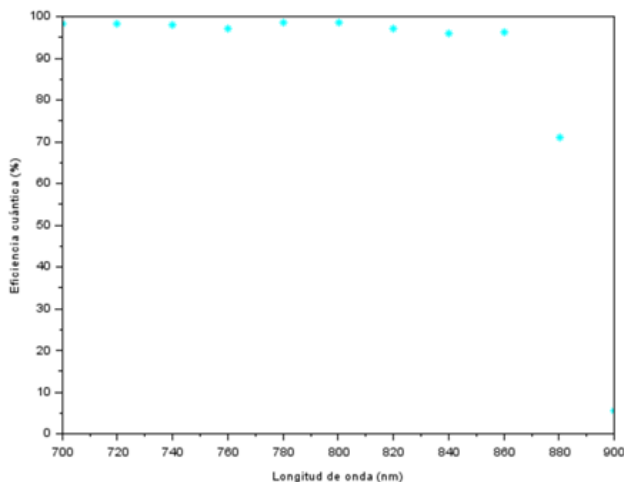
Figura N° 11. Curvas I-V para diferentes condiciones de temperatura de celda desarrollada según Tin *et al.*, (2024)



Fuente: Elaboración propia (2025).

Resolviendo la expresión (2) en Scilab, fue posible verificar la eficiencia cuántica de las celdas descritas en Xutao *et al.*, (2023) y France *et al.*, (2022), como se muestra en la Figura N° 12.

Figura N° 12. Eficiencia cuántica de las celdas desarrolladas en Xutao *et al.*, (2023) (izquierda) y France *et al.*, (2022) (derecha) en función de la longitud de onda



Fuente: Elaboración propia (2025).



Conclusión

Se ha puesto a prueba en laboratorio varias soluciones en *software*, basadas en una plataforma libre y con estándares abiertos como es Scilab, permitiendo evaluar en tiempo real el comportamiento y eficiencia de celdas fotovoltaicas de tecnología cuántica. Los resultados se aplicaron a tres modelos de celdas fotovoltaicas de pozo cuántico, de distintos laboratorios de procedencia, conociendo sus parámetros principales, lo que permitió obtener las curvas I-V, P-V, FF con una precisión del 99.99 %, así como la eficiencia de las mismas. Esto permite, la optimización de celdas de tecnología cuántica, en un entorno real, según las condiciones geográficas y los parámetros asociados: irradiancia, temperatura, entre otros, para así mejorar la eficiencia en la generación eléctrica.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología (Mincyt) y al Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Fonacyt), por los recursos que permitieron mostrar los resultados de este trabajo.

Referencias

Núñez, H., *et al.*, (2018). *Highly Accurate and Inexpensive Computational Tool for Improving Photovoltaic Arrays Performance and Efficiency Measures*. En Proceedings of the IEEE 2018 Open Innovations Conference (OI), Johannesburgo, Sudáfrica. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/OI.2018.8535899>.

Núñez, H., *et al.*, (2019). *Low-Cost and Accurate Computational System for Efficiency Measures over Photovoltaic Arrays*. En Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J. 4(5), 39-45. Disponible en: <https://doi.org/10.25046/aj040505>.

Tin, H., *et al.*, (2024). *Analysis of Third-Generation Solar Cell Design with Physics of Semiconductor*. En Journal of Novel Engineering Science and Technology, 3(02). Disponible en: <https://doi.org/10.56741/jnest.v3i02.525>.

Xutao, Y., *et al.*, (2023). *High Efficient Solar Cell Based on Heterostructure Constructed by Graphene and GaAs Quantum Wells*. En Advanced Science, 10, 2204058. Disponible en: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/advs.202204058>.

France, R., *et al.*, (2022). *Triple-junction solar cells with 39.5% terrestrial and 34.2% space efficiency enabled by thick quantum well superlattices*. En Joule 6, 1121-1135. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.04.024>.

Quai, M., *et al.*, (2022). *Accurate Three-Diode model estimation of Photovoltaic modules using a novel circle search algorithm*. En Ain Shams Engineering Journal de Science Direct, 13. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101824>.





Gobernanza cuántica para la seguridad de la información en el contexto universitario venezolano

Quantum governance for information security in the Venezuelan university context

Edward Arévalo

Universidad Dr. Rafael Belloso Chacín (URBE)
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3842-9931>
edjarevalo@gmail.com
Falcón-Venezuela

Resumen

El artículo destaca la importancia de garantizar la seguridad de la información en el contexto de las instituciones universitarias venezolanas, abordando los múltiples desafíos tecnológicos, económicos, sociales, éticos y legales que dificultan la protección de la confidencialidad, integridad y disponibilidad de los datos sensibles. En respuesta a estos retos, se propone un constructo teórico sobre gobernanza cuántica basado en una metodología holística que incorpora diversas perspectivas teóricas, epistemológicas, axiológicas, filosóficas, ontológicas y sociológicas. La investigación empleó la metodología de Bagozzi y Phillips (1982), reconocida por su capacidad para integrar constructos teóricos en modelos coherentes y aplicables. Este enfoque resulta especialmente adecuado para afrontar la complejidad del sector universitario, donde interactúan diversas variables y actores. Entre los elementos fundamentales identificados se encuentran la estructura organizacional, las políticas y procedimientos, la gestión de riesgos, y los programas de concientización y capacitación en seguridad de la información. Asimismo, se subraya la importancia de las capacidades institucionales, incluyendo el acceso a recursos y conocimientos especializados, como factores críticos para la implementación exitosa. El marco de gobernanza cuántica planteado no solo proporciona soluciones adaptativas y robustas, sino que también promueve un entorno seguro y confiable para la comunidad universitaria. Este enfoque integral permite abordar los desafíos dinámicos y emergentes en materia de seguridad de la información, posicionando a las universidades como líderes en la transformación digital y la resiliencia frente a amenazas tecnológicas complejas atribuidas a la supremacía cuántica.

Abstract

The article highlights the importance of ensuring information security in the context of Venezuelan university institutions, addressing the multiple technological, economic, social, ethical, and legal challenges that hinder the protection of the confidentiality, integrity, and availability of sensitive data. In response to these challenges, a theoretical construct of quantum governance is proposed, based on a holistic methodology that incorporates various theoretical, epistemological, axiological, philosophical, ontological, and sociological perspectives. The research employed the methodology of Bagozzi and Phillips (1982), recognized for its ability to integrate theoretical constructs into coherent and applicable models. This approach is particularly suitable for addressing the complexity of the university sector, where diverse variables and actors interact. Among the key elements identified are organizational structure, policies and procedures, risk management, and awareness and training programs on information security. Additionally, the importance of institutional capabilities, including access to resources and specialized knowledge, is emphasized as critical factors for successful implementation. The proposed quantum governance framework not only provides adaptive and robust solutions but also promotes a secure and trustworthy environment for the university community. This comprehensive approach enables the addressing of dynamic and emerging challenges in information security, positioning universities as leaders in digital transformation and resilience against complex technological threats attributed to quantum supremacy.

Palabras clave:

Gobernanza cuántica; seguridad de la información; universidades venezolanas; criptografía cuántica; supremacía cuántica

Keywords:

Quantum governance; information security; venezuelan universities; quantum cryptography; quantum supremacy

Introducción

La seguridad de la información en instituciones universitarias constituye un eje central dentro de la gobernanza digital, especialmente en el contexto venezolano, donde factores económicos y tecnológicos generan desafíos en la protección de datos sensibles. En este estudio, se propone un constructo teórico sobre gobernanza cuántica que incorpora principios de la computación y la criptografía cuánticas como mecanismos de protección y resiliencia ante amenazas emergentes. La gobernanza cuántica permite la formulación de modelos adaptativos, en los cuales los sistemas de seguridad pueden responder de manera dinámica y distribuida a los riesgos asociados con la supremacía cuántica y la obsolescencia de los protocolos criptográficos tradicionales (Shor, 1994).

Desde el punto de vista metodológico, la propuesta se fundamenta en el enfoque holístico de Bagozzi y Phillips (1982), integrando aspectos estratégicos, filosóficos y sociológicos para la conceptualización del constructo de seguridad cuántica. En términos de estrategia competitiva, se asumen los principios de Porter (1980), resaltando la necesidad de adaptación continua en un entorno de seguridad en evolución. Asimismo, se incorpora el análisis de la competencia en ciberseguridad propuesto por Davenport (1993), el cual enfatiza la importancia de la gestión del conocimiento en la defensa ante ataques cuánticos. En cuanto a la disrupción tecnológica, Moore (1996) señala que los avances en computación cuántica requieren nuevas estructuras de gobernanza capaces de mitigar impactos adversos en la seguridad de la información.

En el ámbito epistemológico, el constructo se sustenta en la perspectiva crítica de Karl Popper (1963), estableciendo la necesidad de evaluar la falsabilidad de los protocolos de seguridad cuántica y su capacidad de adaptación en entornos universitarios. Desde una visión axiológica, se adoptan los principios éticos de Kant (1785), los cuales orientan la protección de la información bajo imperativos categóricos que garantizan la privacidad y la integridad de los datos. En cuanto al pensamiento sistémico, Prigogine (1997) aporta la noción de estructuras

dinámicas en la gobernanza de la información, lo que permite la optimización de los procesos de seguridad bajo un enfoque adaptativo. A nivel ontológico, Floridi (2010) conceptualiza la información como un objeto fundamental en los sistemas digitales, lo que refuerza la importancia de su protección en el ámbito universitario. Finalmente, desde una perspectiva sociológica, Habermas (1981) analiza la participación democrática en la configuración de la gobernanza tecnológica, resaltando la necesidad de que actores académicos se involucren en la formulación de políticas de seguridad digital.

Desde la perspectiva de Porter (1980), la tecnología juega un papel crucial en determinar la posición competitiva de una organización, influyendo en la madurez tecnológica, la intensidad tecnológica y el ciclo de vida de la tecnología implementada. En el contexto universitario, estos elementos adquieren una relevancia particular cuando se integran en un constructo teórico sobre gobernanza cuántica para la seguridad de la información, dado que la computación y la criptografía cuántica modifican sustancialmente el paradigma tradicional de protección de datos implementado.

La madurez tecnológica, entendida como el grado de evolución y perfeccionamiento de las tecnologías utilizadas en las universidades, se vincula directamente con la adopción de protocolos de seguridad. La fiabilidad y eficiencia de estas tecnologías permiten reducir vulnerabilidades asociadas a sistemas criptográficos tradicionales, los cuales podrían quedar obsoletos ante la llegada de la computación cuántica (Shor, 1994). En este sentido, la implementación de criptografía poscuántica se convierte en una estrategia competitiva clave para optimizar la seguridad de la información y reducir costos operativos vinculados a brechas de seguridad.

Desde la óptica de la intensidad tecnológica, la dependencia de los sistemas universitarios respecto a la infraestructura digital exige una transición hacia modelos de seguridad cuántica que garanticen la confidencialidad,

integridad y disponibilidad de los datos. La inversión en investigación y desarrollo (I+D), junto con la adopción de tecnologías cuánticas avanzadas, facilita la protección de redes universitarias contra ciberataques sofisticados, como los que podrían ejecutarse mediante algoritmos cuánticos de factorización (Bernstein, *et al.*, 2009). La gobernanza cuántica, en este sentido, establece protocolos dinámicos capaces de adaptarse al principio de incertidumbre tecnológica, permitiendo una respuesta proactiva ante riesgos emergentes.

En términos del ciclo de vida tecnológico, la computación cuántica redefine las etapas de introducción, crecimiento, madurez y declive de las tecnologías de seguridad, acelerando la obsolescencia de sistemas tradicionales y requiriendo una gobernanza adaptativa. En el contexto universitario venezolano, la mitigación de la obsolescencia programada es fundamental para preservar la operatividad de los procesos académicos y administrativos. Es por ello, que modelos de seguridad cuántica basados en supremacía cuántica y resiliencia digital permiten garantizar la continuidad operativa de las universidades, asegurando la confidencialidad e integridad de los datos en entornos educativos altamente dinámicos (NIST, 2023). Por lo tanto, resulta vital la conceptualización de un constructo que genere los cimientos para operacionalizar la infraestructura tecnológica implementada.

Este constructo teórico sobre gobernanza cuántica para la seguridad de la información proporciona un marco multidimensional que integra los principios competitivos de Porter (1980), con estrategias de seguridad basadas en la computación cuántica, generando un modelo de protección robusto frente a los desafíos del futuro digital. Su implementación permitirá no solo optimizar los procesos internos de las universidades, sino también fortalecer su posición estratégica en el ecosistema global de educación superior.

Tomando como referencia a Davenport (1993), particularmente en su trabajo sobre estrategias competitivas, la cultura organizacional se establece como un componente esencial dentro de la gobernanza cuántica para la seguridad de la información en instituciones universita-

rias. En este constructo teórico, los valores, creencias y prácticas compartidas en la gestión de seguridad se redefinen bajo un esquema que incorpora los principios de la computación cuántica, permitiendo una adaptación más resiliente a las amenazas emergentes.

La seguridad cuántica exige una transformación cultural organizacional, en la cual la comunidad universitaria debe interiorizar la necesidad de enfoques dinámicos y no deterministas en la protección de datos. Esto implica una transición desde modelos tradicionales de seguridad hacia sistemas basados en superposición y entrelazamiento cuántico, los cuales permiten asegurar la confidencialidad e integridad de la información mediante la distribución cuántica de claves (Bennett y Brassard, 1984). Esta adaptación también fomenta la innovación tecnológica, permitiendo a las universidades venezolanas desarrollar esquemas de seguridad capaces de anticipar posibles vulnerabilidades antes de que sean explotadas por adversarios con capacidades computacionales avanzadas.

Por otra parte, la estructura organizacional resulta un pilar fundamental en la formulación de un constructo de gobernanza cuántica, ya que define cómo se distribuyen, coordinan y supervisan los recursos en la gestión de seguridad de la información. Una estructura flexible y escalable es indispensable para responder de manera rápida y eficiente a los desafíos impuestos por la computación cuántica. Modelos tradicionales de gestión centralizada pueden resultar insuficientes en este nuevo paradigma, por lo que la adopción de sistemas distribuidos de seguridad cuántica basados en computación en la nube y protocolos cuánticos se vuelve crucial para operacionalizar los procesos (Pirandola, *et al.*, 2020).

Además, la gobernanza cuántica incorpora el aprendizaje y la mejora continua, permitiendo a las universidades actualizar sus estrategias de seguridad conforme avanza la tecnología cuántica. Esto implica que los mecanismos de protección deben ser diseñados no solo para resistir ataques actuales, sino también para ser adaptables a futuras innovaciones en algoritmos cuánticos y desarrollo de *hardware* cuántico (Shor, 1994). En este sentido, el modelo

de seguridad no solo debe alinearse con estándares internacionales de criptografía poscuántica, como los recomendados por el NIST (2023), sino también con enfoques filosóficos y epistemológicos que aseguren su sostenibilidad en el tiempo.

Desde la perspectiva de Moore (1996), particularmente en su obra *Crossing the Chasm*, el análisis del entorno organizacional a través de las dimensiones; competitiva, regulatoria y social resulta clave para comprender la transición hacia la gobernanza cuántica para la seguridad de la información en universidades. Este constructo teórico aprovecha los principios de la computación cuántica para redefinir la manera en que las instituciones académicas gestionan sus riesgos y protegen sus datos, integrando dinámicamente los factores que afectan su operación en el entorno universitario.

En cuanto al entorno competitivo, las universidades deben enfrentar retos tecnológicos derivados de la supremacía cuántica y la obsolescencia de los sistemas tradicionales de seguridad (Shor, 1994). La criptografía poscuántica, propuesta por Bernstein, *et al.*, (2009), representa una solución estratégica para mantener ventajas competitivas en la protección de datos sensibles, evitando que actores externos exploten vulnerabilidades provocadas por la computación cuántica. Asimismo, la adopción de tecnología cuántica en ciberseguridad se convierte en un diferenciador clave dentro del ecosistema universitario, permitiendo a las instituciones optimizar la eficiencia de sus sistemas de protección.

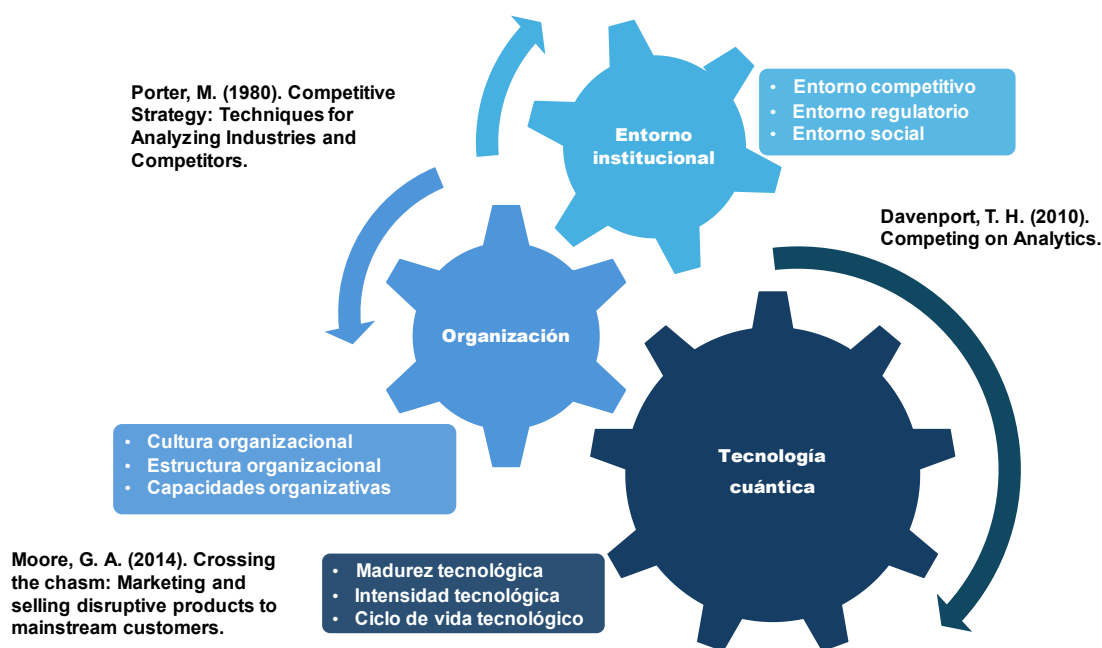
Desde la perspectiva del entorno regulatorio, la gobernanza cuántica debe alinearse con las normas gubernamentales y los estándares internacionales en materia de seguridad de la información. Organismos como el NIST (2023) han establecido procesos de estandarización para la criptografía poscuántica, lo que obliga a las universidades actualizar sus políticas de protección y resiliencia ante futuros ataques cuánticos. En el caso venezolano, la integración de regulaciones sobre gestión tecnológica y protección de datos universitarios debe contemplar mecanismos adaptativos que permitan la validación cuántica

de identidades digitales y la seguridad en la transferencia de información académica.

Por último, el entorno social juega un papel esencial en la gobernanza cuántica, ya que la comunidad universitaria debe comprender y adoptar estos nuevos paradigmas de seguridad. Floridi (2010) argumenta que la ontología de la información es fundamental en la era digital y con mayor influencia será en la era cuántica, por lo que la gobernanza cuántica no solo debe enfocarse en la tecnología, sino también en la concientización y la educación sobre el impacto de la computación cuántica en la seguridad de los datos. En este sentido, estrategias de integración social, basadas en los modelos participativos propuestos por Habermas (1981), pueden fortalecer la aceptación y el desarrollo de sistemas de protección, avanzados en el ámbito universitario.

La contextualización del objeto de estudio, dentro de un constructo teórico sobre gobernanza cuántica, para la seguridad de la información se alinea con una lógica interdisciplinaria que integra la organización, la tecnología y el entorno institucional (ver Figura N° 1).

Figura N° 1. Contextualización inherente a las variables



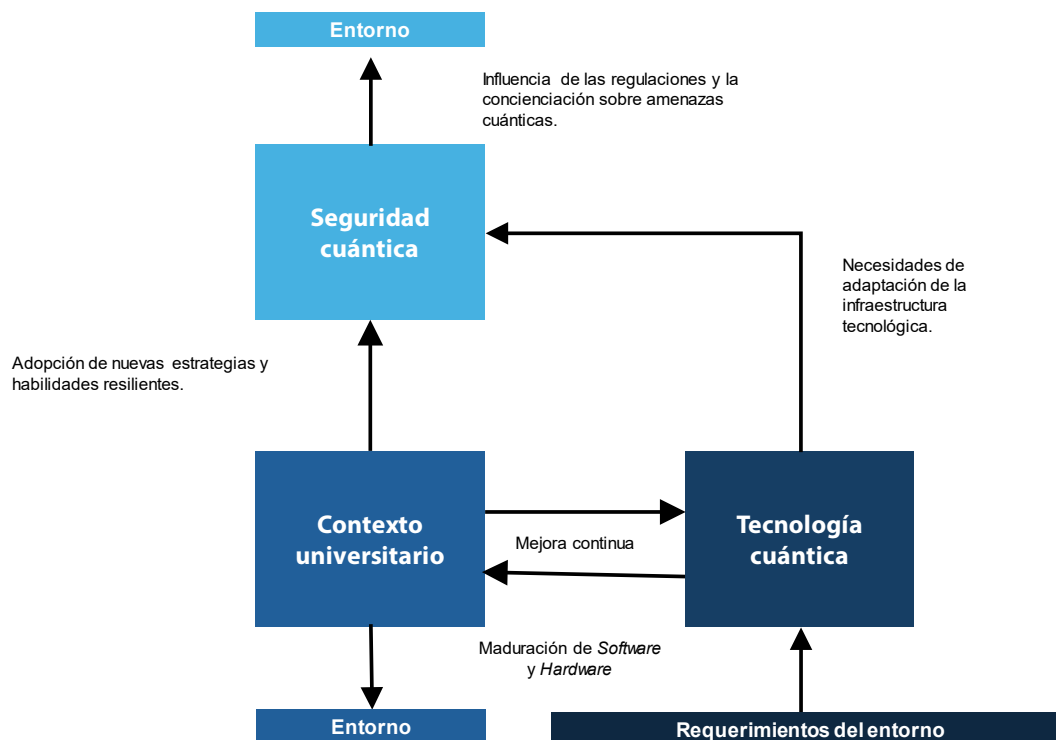
Fuente: Elaboración propia (2025).

Desde el marco de un constructo teórico sobre gobernanza cuántica, para la seguridad de la información, se deben integrar los principios fundamentales de la computación y criptografía cuántica, con el fin de fortalecer la protección de los datos ante amenazas emergentes. La implementación de los protocolos de seguridad cuántica permitirá a las instituciones educativas responder de manera proactiva a los riesgos derivados de la supremacía cuántica, asegurando la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información académica y administrativa.

Asimismo, la gobernanza cuántica optimiza el uso de recursos limitados mediante esquemas de seguridad adaptativos que reducen costos operativos en protección digital y favorecen la sostenibilidad de la infraestructura universitaria (NIST, 2023). En el aspecto normativo, la adopción de estándares internacionales de seguridad cuántica permite a las universidades cumplir con las regulaciones, evitando brechas legales y fortaleciendo su resiliencia digital.

La seguridad de la información cuántica debe basarse en un proceso continuo de evaluación y mejora, siguiendo el principio de falsación de Popper establecidos por Barroso (2016). Esto permite a las universidades adaptar sus políticas y procedimientos según las nuevas amenazas, riesgos, vulnerabilidades y avances tecnológicos, manteniendo un estado de preparación constante que permita mitigar posibles efectos directos o colaterales, que afecten la confidencialidad, integridad y disponibilidad de los procesos y los datos. En tal sentido, existe una estrecha relación entre la seguridad cuántica, la tecnología cuántica y el contexto universitario, los cuales se encuentran sujetos al entorno y sus requerimientos cambiantes; así mismo, son influenciados por las regulaciones y la conscientización sobre amenazas cuánticas, como también con las necesidades de adaptación de la infraestructura tecnológica por la adopción de nuevas estrategias y habilidades resilientes. Tal cual, como se puede evidenciar en la Figura N° 2:

Figura N° 2. Sistematización de la gestión de la seguridad cuántica



Fuente: Elaboración propia (2025).

En vista de ello, la sistematización de la gestión de la seguridad cuántica se basa en un ciclo de mejora continua que permite la adaptación progresiva de políticas y tecnologías en el contexto universitario venezolano. La evaluación constante de riesgos, siguiendo el principio de falsación de Popper, garantiza que los protocolos de seguridad cuántica evolucionen conforme aparecen nuevas amenazas, reduciendo vulnerabilidades críticas.

La maduración de *software* y *hardware* dentro de este constructo teórico permite a las universidades desarrollar estrategias de seguridad sostenibles frente a la supremacía cuántica. La adopción de sistemas distribuidos y redes cuánticas garantiza una infraestructura resiliente, minimizando los efectos de la obsolescencia tecnológica (NIST, 2023). Además, la integración de estándares globales y regulaciones académicas facilita que la gobernanza cuántica se ajuste a las normativas nacionales e internacionales, optimizando la interacción entre la tecnología cuántica, el entorno institucional y las capacidades organizacionales.

Desde otra perspectiva, el constructo teórico sobre gobernanza cuántica para la seguridad de la información se sustenta desde la ética kantiana según Malishev (2014), ya que integra el respeto a la privacidad y los derechos individuales en entornos académicos, investigativos y administrativos. Además, la transparencia y legitimidad institucional se refuerzan mediante procesos verificables de seguridad cuántica, alineando la gestión tecnológica con estándares éticos de confianza y equidad en la protección de la información.

Bajo el constructo teórico sobre gobernanza cuántica para la seguridad de la información, la visión de Nastidas (2011) basada en la filosofía de Prigogine resalta la necesidad de estrategias adaptativas en entornos universitarios. La seguridad cuántica, al considerar la naturaleza dinámica de las amenazas digitales, permite anticipar y responder proactivamente mediante los sistemas resilientes. La criptografía cuántica y los modelos de protección

distribuida optimizan la integridad y disponibilidad de los datos, garantizando un esquema de gobernanza flexible ante eventos imprevistos (Bernstein, *et al.*, 2009).

Asimismo, un constructo teórico sobre gobernanza cuántica para la seguridad de la información es fundamental para abordar la gestión de los datos del contexto universitario por su valor intrínseco como activo digital esencial actual y su protección estructurada mediante enfoques deliberativos y participativos que generará la interacción de un ecosistema cuántico. Es por ello que, para Floridi (2012) la información debe ser gestionada con el mismo rigor que los activos tangibles críticos, lo que refuerza la necesidad de integrar mecanismos de seguridad avanzados, como la criptografía cuántica basada en la distribución segura de claves (Bennett y Brassard, 1984). Esto garantiza que la confidencialidad, integridad y disponibilidad de los datos se mantengan frente a riesgos tecnológicos emergentes.

Por otro lado, el marco de Habermas (1984), adaptado por Ibrobo (2020), sugiere que la formulación de políticas de seguridad debe ser resultado de un proceso inclusivo y transparente, donde los actores del contexto universitario participen activamente en la generación de estrategias de protección cuántica. Este enfoque participativo no solo mejora la adopción de tecnologías de seguridad, sino que fortalece la legitimidad institucional, asegurando que la gobernanza cuántica se implemente con aceptación y eficacia dentro de la comunidad educativa. La seguridad cuántica, al incorporar principios de deliberación democrática, favorece un entorno académico, investigativo y administrativo donde la protección de los datos no solo responde a exigencias tecnológicas, sino también a principios éticos y sociales que regulan el ecosistema universitario.

En referencia de ello, resulta fundamental la conceptualización del estado actual de la seguridad de la información en el contexto universitario venezolano que se enfoque en la sistematización de los siguientes aspectos:

- Identificación de políticas y procedimientos que integran la criptografía poscuántica y mecanismos de vali-

dación cuántica para garantizar la protección del entorno tangible e intangible.

- Evaluación de la madurez de los marcos de gobernanza mediante el análisis exhaustivo de la capacidad institucionales para adoptar estándares de seguridad cuántica con estrategias de resiliencia operativa que garantice una transición eficiente hacia modelos capaces de mitigar riesgos y resistir ataques cuánticos.

- Análisis de brechas bajo un enfoque multidimensional que incorpore principios de computación cuántica, gobernanza flexible y seguridad adaptativa, permitiendo al contexto universitario venezolano fortalecer su resiliencia frente a la supremacía cuántica.

Para establecer los atributos clave de un constructo teórico sobre gobernanza cuántica en la gestión de la seguridad de la información, es fundamental analizar las diversas dimensiones que incluyen aspectos técnicos, organizacionales y humanos. Estas dimensiones deben integrarse de manera coherente con los elementos conceptuales y operativos, asegurando su alineación con los requerimientos presentes y futuro; ya que la gobernanza cuántica debe ser flexible y adaptativa, permitiendo una evolución constante ante cambios tecnológicos y las nuevas amenazas en contextos intangibles.

Para ello, se consideran los siguientes aspectos:

- a) La estructura organizacional debe integrar principios de seguridad cuántica para garantizar una gestión resiliente y adaptativa en entornos universitarios, en función de:

- Roles y responsabilidades: la designación de un CISO (*Chief Information Security Officer*) y comités de seguridad debe considerar la implementación de protocolos cuánticos de protección, asegurando que la gestión de riesgos se fortalezca ante amenazas computacionales avanzadas.

- Jerarquía y coordinación: la gobernanza cuántica requiere una estructura flexible y escalable, facilitando la interacción entre unidades de trabajo mediante sistemas de distribución cuántica de claves que optimicen la seguridad de la información.

- Comunicaciones internas: la implementación de criptografía cuántica en la transmisión de información garantiza la integridad y confidencialidad de los datos en todos los niveles institucionales, promoviendo una gobernanza más segura y eficiente.

b) Las políticas y procedimientos deben alinearse con principios de criptografía cuántica y protección adaptativa frente a amenazas emergentes, considerando los siguientes aspectos:

- Normativas claras y actualizadas: la gobernanza cuántica exige regulaciones dinámicas, ajustadas a los avances de la computación cuántica y la evolución de riesgos en entornos intangibles.

- Procedimientos detallados: la gestión de incidentes debe incorporar protocolos poscuánticos y modelos de validación cuántica para garantizar la seguridad de accesos y datos sensibles.

- Revisión y mejora continua: la formulación de políticas debe adaptarse a la supremacía cuántica mediante auditorías periódicas y estrategias resilientes que aseguren la efectividad de los mecanismos de protección.

c) La gestión de riesgos debe basarse en enfoques dinámicos que incorporen criptografía cuántica y técnicas predictivas avanzadas para identificar y reducir vulnerabilidades en entornos tangibles e intangibles en evolución, bajo las siguientes consideraciones:

- Identificación de riesgos: la seguridad cuántica debe optimizar la identificación de riesgos mediante el uso de métodos avanzados que detecten amenazas en tiempo real como un mecanismo preventivo, garantizando la integridad y protección de la información frente a posibles vulnerabilidades.

- Evaluación de riesgos: la gobernanza cuántica debe orientarse en un análisis dinámico que determine con precisión las probabilidades de ataque y la capacidad de resistencia frente a algoritmos de factorización cuántica mediante protocolos adaptativos y estrategias criptográficas poscuánticas.

- Planes de mitigación: la gobernanza cuántica debe desarrollar estrategias de resiliencia activa, asegurando que los protocolos poscuánticos fortalezcan la protección de la infraestructura del contexto universitario frente a la supremacía cuántica que amenaza el entorno tecnológico por las prácticas de acciones reactivas.

d) La concientización y capacitación deben alinearse con las necesidades actuales y futuras del contexto universitario, garantizando la preparación ante amenazas emergentes y la adaptación tecnológica requerida orientada en el usuario como el eslabón más débil de la cadena de custodia cuántica. Para ello, es necesario contemplar aspectos como:

- Programas de formación: la seguridad cuántica debe alinearse en la formulación de programas de capacitación continua que tomen en consideración la necesidad de una alfabetización digital cuántica, donde estudiantes, docentes, investigadores y personal administrativo adquieran habilidades para gestionar riesgos poscuánticos y aplicar protocolos de protección avanzados.

- Sensibilización del personal: la seguridad cuántica debe enfocarse en campañas de sensibilización que promuevan una cultura de seguridad cuántica, asegurando que todos los miembros de la organización comprendan las amenazas que la supremacía cuántica representa para la protección de la información y la continuidad de operativo de los procesos inherentes a la comunidad universitaria.

- Evaluación de la capacitación: la seguridad cuántica debe orientarse en el establecimiento de mecanismos que midan la efectividad de los programas de formación asociados a los riesgos inherentes a la seguridad cuántica, asegurando que los conocimientos adquiridos sean aplicables y relevantes. Este proceso debe incluir análisis permanentes, retroalimentación de los participantes y ajustes estratégicos para optimizar el contenido según las necesidades emergentes de la supremacía cuántica.

e) La infraestructura tecnológica debe evolucionar hacia un entorno resistente a ataques cuánticos asegurando la confidencialidad, integridad y disponibilidad de

los datos mediante enfoques adaptativos que consideren los siguientes elementos:

- **Infraestructura segura:** conceptualizada bajo la implementación de infraestructuras seguras bajo los requerimientos de seguridad cuántica que debe incorporar tecnologías avanzadas que garanticen la protección de la información frente a la supremacía cuántica. Esto implica la integración de firewalls cuánticos, capaces de detectar anomalías con modelos predictivos; sistemas de detección de intrusiones poscuánticos, que analizan el tráfico en tiempo real para prevenir ataques avanzados; y soluciones de encriptación cuántica, asegurando que los datos sensibles permanezcan protegidos mediante algoritmos de criptografía poscuántica resistentes a la computación cuántica.

- **Monitoreo y detección:** operacionalizada bajo herramientas de monitoreo continuo a tiempo real que deben incorporar algoritmos poscuánticos capaces de analizar grandes volúmenes de datos y detectar anomalías que respondan a los incidentes cuánticos.

- **Actualización y mantenimiento:** definida en base a políticas para la actualización y mantenimiento de los lineamientos establecidos en la seguridad cuántica para garantizar la protección de la información frente a las amenazas derivadas de la supremacía cuántica, tomando en consideración la criptografía poscuántica, el monitoreo proactivo de patrones cuánticos y la distribución cuántica de claves.

f) El cumplimiento y auditoría en el marco de la gobernanza cuántica de la seguridad de la información debe garantizar que las instituciones del contexto universitario venezolano se adapten a los nuevos desafíos tecnológicos, protegiendo sus sistemas frente a la supremacía cuántica. Con relación a ello, debe contemplar los siguientes aspectos:

- **Cumplimiento normativo:** enmarcado a regulaciones y estándares tecnológicos, como ISO/IEC 27001:2022 *Information Security, Cybersecurity and Privacy Protection*, ISO/IEC 27002:2022 *Information security controls*, ISO/IEC

27005:2022 *Information Security Risk Management*, ISO/IEC 15408-1:2022 *Common Criteria for Information Technology Security Evaluation*, NIST SP 800-207 *Zero Trust Architecture*, NIST SP 800-208 *Post-Quantum Cryptography Migration Guidelines*, Reglamento (UE) 2016/679 *General Data Protection Regulation* (GDPR), Reglamento (UE) 2022/2554 *Digital Operational Resilience Act* (DORA), Directiva (UE) 2022/2555 – NIS2 *Network and Information Security Directive*, IEEE P7130 *Standard for Quantum Computing Definitions*, IEEE P1913 *Quantum Key Distribution Security Framework*, IEEE P1913 *Quantum Key Distribution Security Framework* y E91 *Protocol Quantum Key Distribution using Entanglement*.

- **Auditorías regulares:** la seguridad cuántica debe armarse de procesos de auditorías internas y externas permanentes para evaluar el estado de la seguridad de la información; y asegurar el cumplimiento continuo que garantice que los sistemas de protección de la información sean resilientes ante los ataques derivados de la computación cuántica.

- **Informes y documentación:** cumpliendo con los lineamientos de formulación de documentación exhaustiva y precisa para garantizar la trazabilidad y actualización de políticas, procedimientos, auditorías e incidentes relacionados con la protección de la información frente a amenazas cuánticas en el contexto universitario venezolano.

g) **Resiliencia organizacional:** esquematizada por la capacidad de las instituciones universitarias para anticipar, resistir, responder y recuperarse de incidentes de seguridad derivados de la evolución de la computación cuántica, abordando los siguientes aspectos:

- **Planes de continuidad del negocio:** orientados en el desarrollo e implementación de planes que aseguren que los algoritmos y sistemas sigan operando de manera segura tras la obsolescencia de métodos criptográficos clásicos. Así como las estrategias de protección que garanticen que los accesos y recursos sean seguros frente a ataques cuánticos.

- Recuperación de desastres: enmarcado en la formulación de estrategias y procedimientos para la recuperación rápida y efectiva de la información y los sistemas tras un incidente de seguridad asociados a los ataques y vulnerabilidades cuánticas.

- Pruebas y simulacros: sujeto a la ejecución de pruebas y simulacros regulares para evaluar la efectividad de los planes de continuidad y recuperación, y ajustar las estrategias según sea necesario para medir la robustez de los sistemas ante la supremacía cuántica.

Metodología

La metodología de Bagozzi y Phillips (1982) se basa en la integración de diversos constructos teóricos en un modelo coherente, lo que la hace particularmente útil para estructurar la seguridad cuántica de la información en el contexto universitario venezolano, puesto que la computación cuántica introduce nuevas amenazas y vulnerabilidades a los sistemas de seguridad implementados, lo que requiere un enfoque multidimensional capaz de modelar las interacciones entre tecnología, regulaciones, resiliencia organizacional y protección de datos.

Desde esta perspectiva, la metodología permite conceptualizar un constructo teórico sobre gobernanza cuántica, donde convergen aspectos como la criptografía poscuántica, los protocolos de distribución cuántica de claves (BB84, E91) y la gestión de riesgos cuánticos. Además, facilita la incorporación de normativas internacionales como la serie ISO/IEC 27000:2022, GDPR, NIS2 y DORA, asegurando un marco regulatorio que evolucione conforme a las necesidades de protección ante la supremacía cuántica.

En el sector universitario venezolano la convergencia de elementos esenciales, como la gestión de infraestructura digital y la protección de datos en ámbitos académicos, administrativos, investigativos y personales, demandan la aplicación de un enfoque teórico estructurado para fortalecer la capacidad de las instituciones frente a los desafíos de la seguridad cuántica. La metodología de Bagozzi y Phillips proporciona un modelo analítico integral,

que permite anticipar, resistir, responder y recuperarse de incidentes de seguridad generados por la evolución de la computación cuántica, minimizando riesgos y garantizando la continuidad operativa. Este marco teórico facilita la formulación de estrategias adaptativas que optimizan la resiliencia digital, impulsando la transición hacia protocolos poscuánticos y sistemas avanzados de protección, asegurando la integridad, confidencialidad y disponibilidad de la información en un entorno académico en constante transformación y alineado con los principios de la gobernanza cuántica.

Este enfoque permite que las universidades desarrollen modelos sólidos para enfrentar los desafíos de la seguridad cuántica, garantizando la evolución de sus políticas de protección de la información abordando los siguientes aspectos:

- Construcción teórica:

- a) Descomposición de los conceptos clave como gobernanza cuántica, seguridad de la información cuántica y capacidades institucionales en los subcomponentes básicos que operacionalizan los procesos inherentes.

- b) Identificación de las relaciones entre estos componentes para formar una red teórica que explique cómo interactúan estos elementos para influir en la seguridad de la información cuántica.

- Validación empírica:

La validación empírica en el contexto de una investigación documental implica comprobar que los datos y teorías obtenidos a través de la revisión de documentos están respaldados por evidencias reales y verificables. Este proceso es crucial para garantizar la fiabilidad y validez de los resultados de la investigación, en referencia a:

- a) Recolección de documentación:

- Artículos académicos sobre gobernanza cuántica y seguridad de la información cuántica.

- Políticas y procedimientos internos de universidades sobre seguridad de la información implementados.



b) Análisis crítico:

- Evaluación de las prácticas y políticas mencionadas en los documentos.

- Evaluación de los informes de auditoría para entender los desafíos y éxitos en la implementación de estas prácticas y políticas.

c) Comparación con datos empíricos:

- Comparación de los datos con los hallazgos documentales para verificar la coherencia y validez.

d) Validación de conceptos:

- Confirmación de que los hallazgos documentados efectivamente mejoran la determinación de los criterios asociados a la seguridad de la información cuántica en la práctica.

- Ajuste de las recomendaciones en la investigación según los datos empíricos obtenidos.

e) Resultados:

- Presentación de un informe que detalle el proceso de validación y discuta los hallazgos, destacando la importancia de ajustar las políticas basándose en datos empíricos.

Además del enfoque documental, descriptivo y exploratorio de esta investigación, se orienta en una investigación mixta combinando el método cuantitativo y cualitativo para proporcionar una comprensión más completa y robusta del fenómeno estudiado; ya que es necesario cuantificar los incidentes de gestión de la seguridad de la información con *insights* cualitativos para validar y enriquecer los hallazgos que permitan conceptualizar el constructo teórico sobre gobernanza cuántica requerido.

En el contexto del estudio, la población objetivo se enmarca en las instituciones de educación del sector público y privado en Venezuela que ofrecen programas de educación superior. Los individuos claves corresponden al personal administrativo, personal de tecnología de la información, docentes, investigadores y estudiantes que están involucrados o afectados por las políticas y prácticas

de seguridad de la información en estas casas de estudio. Específicamente aplicables a la Universidad de Falcón (Udefa), Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada (Unefa) Núcleo Falcón Extensión Punto Fijo, Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez (Unesr) Núcleo Coro, Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda (Unefm) Núcleo Sabino, Universidad del Zulia Núcleo Punto Fijo.

La fase metodológica alineadas al enfoque holístico de Bagozzi y Phillips corresponde a la siguiente estructura:

a) Diagnóstico del estado actual de la gobernanza cuántica. Esto implica una evaluación exhaustiva de las prácticas actuales en el sector universitario venezolano:

- Identificación de las políticas, normas y procedimientos existentes. Puesto que resulta crucial conocer las regulaciones y directrices actuales que rigen la seguridad de la información en las universidades venezolanas.

- Análisis de la madurez de los marcos de gobernanza cuántica para evaluar su eficacia y grado de sofisticación en la gestión de elementos intangibles.

- Evaluación de las brechas actuales para detectar oportunidades de mejora en la gobernanza cuántica y la seguridad de la información.

b) Definición de los atributos clave para el modelo de gobernanza cuántica en la seguridad de la información del contexto universitario venezolano, con el objetivo de determinar sus características esenciales:

- Identificación de los riesgos, amenazas y vulnerabilidades que afectan a las universidades en el contexto de la seguridad cuántica, considerando la posible obsolescencia de sistemas criptográficos tradicionales, la exposición a ataques cuánticos y la necesidad de migración hacia criptografía poscuántica.

- Evaluación de la frecuencia y gravedad de los incidentes de seguridad para priorizar los esfuerzos de mitigación y mejorar la respuesta a futuros incidentes de supremacía cuántica.

- Evaluación del impacto de los riesgos, amenazas y vulnerabilidades cuánticas para mitigar sus efectos y fortalecer la resiliencia del sistema frente a desafíos emergentes de supremacía cuántica.

c) Conceptualización de la estructura del constructo teórico sobre gobernanza cuántica para la seguridad de la información del contexto universitario venezolano:

- Recopilación de datos sobre el marco de gobernanza cuántica requerido.

- Determinación de la sostenibilidad del modelo a largo plazo mediante las siguientes consideraciones:

- Identificación de los recursos tecnológicos, humanos y financieros requeridos.

- Evaluación de la capacidad de las universidades para actualizar y mantener el sistema a lo largo del tiempo.

- Aseguramiento de que la estructura organizacional sea flexible y capaz de adaptarse a cambios en el entorno sin comprometer la seguridad de la información.

- Identificación de los principales desafíos y obstáculos para su implementación, en base a los siguientes aspectos:

- Evaluación de posibles problemas tecnológicos que representen incompatibilidad de sistemas, obsolescencia y amenazas emergentes (riesgo tecnológico).

- Análisis de las limitaciones presupuestarias y búsqueda de financiamiento adicional, si es necesario (obstáculos económicos).

- Valoración de la resistencia al cambio de los estudiantes docentes, investigadores y personal administrativo a adoptar el marco referencial de gobernanza cuántica (resistencia al cambio).

- Evaluación del cumplimiento de regulaciones nacionales e internacionales relacionadas con la protección de datos (aspectos regulatorios).

La relación de los conceptos evidenciados en el enfoque holístico con los componentes del constructo teórico sobre gobernanza cuántica está interrelacionada

mediante cuatro tipos de relaciones:

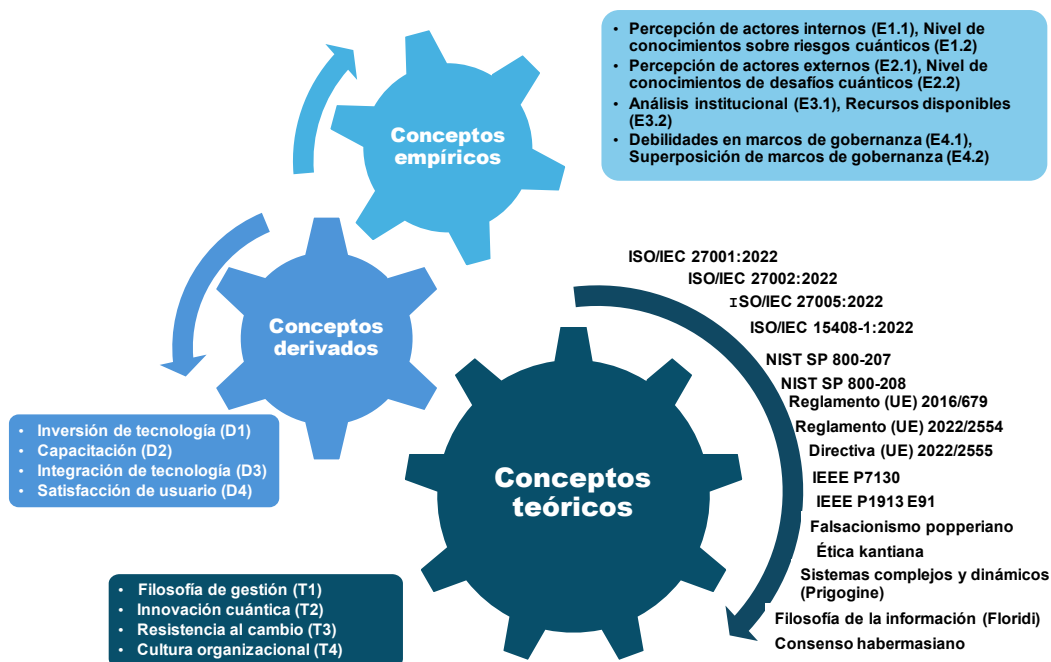
a) Relaciones de sustento: conectando los componentes con teorías subyacentes en gestión de ciberseguridad cuántica bajo el cumplimiento de la ISO/IEC 27001:2022, ISO/IEC 27002:2022, ISO/IEC 27005:2022, ISO/IEC 15408-1:2022, NIST SP 800-207, NIST SP 800-208, Reglamento (UE) 2016/679, Reglamento (UE) 2022/2554, Directiva (UE) 2022/2555, IEEE P7130, IEEE P1913 E91.

b) Relaciones de observación: analizando los componentes utilizando datos empíricos de estudios en el contexto universitario venezolano.

c) Relaciones de derivación: derivando nuevos conceptos o mejoras a partir de la aplicación práctica, como la incorporación de tecnologías emergentes para mitigar el efecto de la supremacía cuántica.

d) Relaciones de correspondencia: estableciendo correspondencias entre los conceptos teóricos (marco de referencia de gobernanza cuántica) y los datos empíricos recolectados en el entorno universitario.

Figura N° 3. Conceptos en el enfoque holístico



Fuente: Elaboración propia (2025).

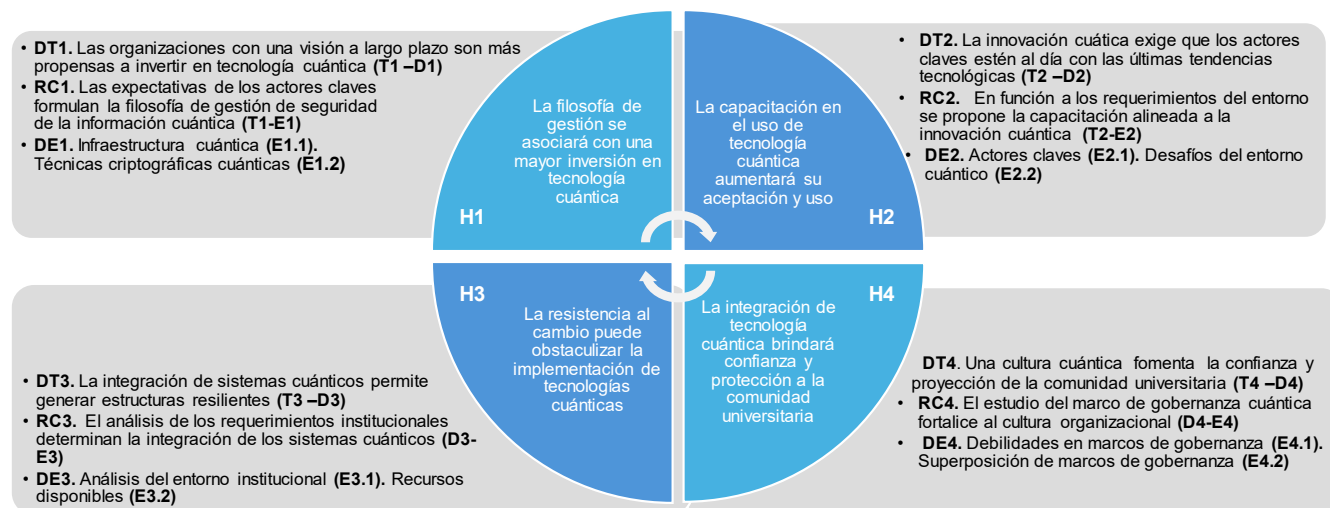
A continuación, se detalla la relación de conceptos mencionada:

Al relacionar el enfoque holístico con un constructo teórico sobre gobernanza cuántica, es posible establecer vínculos entre los principios fundamentales de la seguridad de la información y las capacidades avanzadas que ofrece la tecnología cuántica, en especial en el ámbito de la toma de decisiones y la gestión de riesgos complejos.

El constructo teórico sobre gobernanza cuántica puede definirse como un marco interdisciplinario que incorpora conceptos de computación cuántica, criptografía poscuántica y dinámicas organizacionales. Su objetivo principal es anticipar y gestionar riesgos altamente complejos, aprovechando las propiedades únicas de los sistemas cuánticos, como la superposición y el entrelazamiento, para optimizar la toma de decisiones.

En concordancia con lo anteriormente expuesto, se presentan las relaciones del enfoque holístico con los conceptos teóricos, conceptos derivados, conceptos empíricos, reglas de correspondencia e hipótesis formuladas:

Figura N° 4. Relaciones del enfoque holístico



Fuente: Elaboración propia (2025).

La conceptualización de la estructura de un constructo teórico sobre gobernanza cuántica en la seguridad de la información del contexto universitario venezolano se abordó bajo las siguientes hipótesis:

- Hipótesis 1: la filosofía de gestión se asociará con una mayor inversión en tecnología cuántica.
- Hipótesis 2: la capacitación en el uso de tecnología cuántica aumentará su aceptación y uso.
- Hipótesis 3: la resistencia al cambio puede obstaculizar la implementación de tecnologías cuánticas.
- Hipótesis 4: la integración de tecnología cuántica brindará confianza y protección a la comunidad universitaria.

En función del objeto de estudio y tomando como referencia el contexto de las universidades y la comunidad académica, la investigación se orientó en la Hipótesis 4; en donde, se asocia un constructo teórico sobre gobernanza cuántica para la seguridad de la información como factor crucial para asegurar la confidencialidad, integridad y disponibilidad de los activos tangibles e intangibles bajo las siguientes premisas:

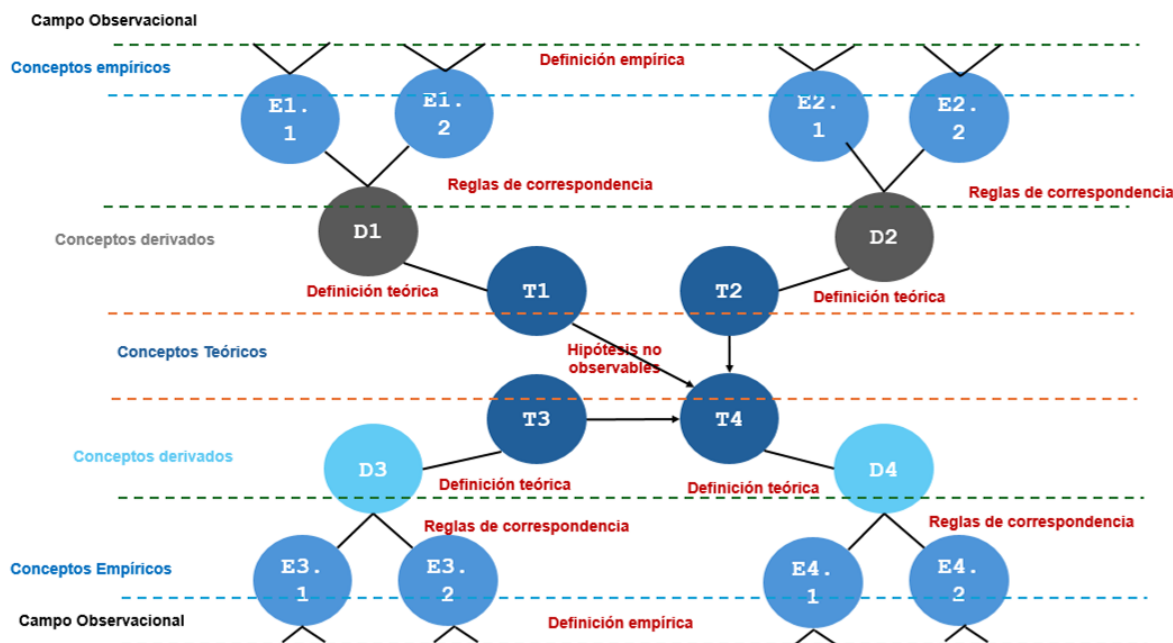
- Protección de datos personales: para asegurar que los datos de los estudiantes, docentes, investigadores,

personal administrativo estén protegidos mediante políticas robustas de privacidad y seguridad de la información.

- Ciberseguridad: para implementar sistemas y protocolos de ciberseguridad que prevengan y respondan a amenazas y ataques cibernéticos, protegiendo tanto la infraestructura tecnológica como la información almacenada.
- Formación y concienciación: para proveer la formación continua a estudiantes, docentes, investigadores y personal administrativo sobre buenas prácticas de seguridad cuántica y manejo seguro de la información.
- Políticas de uso de tecnología cuántica: para establecer políticas claras sobre el uso de dispositivos y redes en la universidad, garantizando que se utilicen de manera segura y responsable.
- Infraestructura segura: para asegurar que la infraestructura tecnológica, incluyendo servidores y redes, sea robusta y esté constantemente actualizada para enfrentar nuevas amenazas.
- Cumplimiento normativo: para generar un marco de gobernanza cuántica que supervise y gestione la seguridad de la información, asegurando que se cumplan con todas las normativas legales y estándares internacionales.

A continuación, se detalla la malla teórica relacional bajo la hipótesis 4 formulada, definida como: la integración de tecnología cuántica brindará confianza y protección a la comunidad universitaria.

Figura N° 5. Malla teórica relacional



Fuente: Elaboración propia (2025).

La seguridad cuántica en el contexto universitario venezolano representa un enfoque estratégico para garantizar la protección de datos y la confianza institucional. Al integrar tecnologías cuánticas, como la criptografía poscuántica, las instituciones universitarias pueden blindar la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información. Esto es particularmente relevante en el manejo de expedientes académicos, investigaciones científicas y datos administrativos, donde los riesgos asociados a tecnologías emergentes están en constante evolución. De esta manera, se genera un entorno seguro en el que la comunidad universitaria se sienten respaldada.

Además, la aplicación de sistemas cuánticos no solo se limita a la protección de datos, sino que también ofrece oportunidades para optimizar procesos administrativos y académicos. La capacidad de analizar grandes volúmenes de información de forma segura y eficiente permite me-

jorar la toma de decisiones, facilitando así la implementación de estrategias institucionales más dinámicas y adaptativas. Esto fomenta un entorno universitario resiliente, donde los participantes pueden centrarse en sus actividades sin preocupaciones por la seguridad de la infraestructura tecnológica.

El enfoque integral de la seguridad cuántica conecta la satisfacción de los usuarios de la comunidad universitaria con la resiliencia tecnológica, asegurando que la innovación y la seguridad estén alineadas con los objetivos estratégicos de las instituciones. A través de un marco robusto de gobernanza cuántica, las organizaciones universitarias pueden posicionarse como líderes en la transformación digital, respondiendo eficazmente a los desafíos de un entorno cada vez más interconectado y complejo. Este constructo teórico no solo refuerza la protección de datos, sino que también impulsa la excelencia operativa y académica.



Resultados

La metodología de Bagozzi y Phillips permitió identificar varios elementos del constructo teórico que inciden directamente sobre el objeto de estudio, los cuales se encuentran definidos por las siguientes variables con su descripción asociada:

- **Constructo teórico sobre gobernanza cuántica (variable independiente):**

- **Estructura organizacional:** la estructura organizacional debe incluir roles y responsabilidades claramente definidos para la gestión de la seguridad de la información cuántica para facilitar la coordinación y comunicación entre diferentes niveles.

- **Políticas y procedimientos:** las políticas y procedimientos deben ser claros y comprensibles y deben integrarse con las tecnologías cuánticas disponibles para ser efectivamente implementados. En un entorno de recursos limitados, como el venezolano, las políticas deben ser pragmáticas y enfocarse en las áreas de mayor riesgo. Es crucial, que estas políticas sean comunicadas y aplicadas consistentemente en toda la universidad.

- **Gestión de riesgos:** la gestión de riesgos cuánticos requiere la identificación, evaluación y mitigación de riesgos tecnológicos. En un entorno incierto, como el de las universidades venezolanas, esta gestión debe ser proactiva y flexible, adaptándose rápidamente a nuevas amenazas; por lo tanto, deben abordarse los riesgos desde diferentes ángulos y proponer soluciones innovadoras.

- **Concientización y capacitación:** la concientización y capacitación en seguridad de la información cuántica son fundamentales para crear una cultura organizacional de seguridad. Tecnológicamente, esto incluye el uso de plataformas de *e-learning* y simulaciones de ataques para entrenar al personal de forma continua.

- **Capacidades institucionales (variable mediadora):**

- **Conocimientos:** el nivel de conocimientos en seguridad de la información cuántica depende de la capacitación y la actualización continua del personal. En

el entorno venezolano, esto puede implicar alianzas con instituciones internacionales para acceder a materiales y certificaciones de las últimas tendencias en seguridad.

- **Recursos:** la disponibilidad de recursos financieros y tecnológicos es crucial para la implementación de medidas de seguridad cuánticas. Tecnológicamente, las universidades deben invertir en infraestructura adecuada poscuántica que mitigue el efecto de la supremacía cuántica.

- **Seguridad de la Información (variable dependiente):**

- **Confidencialidad:** En el contexto tecnológico, la confidencialidad implica el uso de herramientas de encriptación y autenticación para proteger los datos. En el entorno universitario venezolano, donde la conectividad y el acceso a tecnología avanzada pueden ser limitados, es crucial adaptar estas tecnologías a los recursos disponibles con políticas estrictas.

- **Integridad:** tecnológicamente, mantener la integridad de la información requiere sistemas robustos de respaldo y recuperación de datos. En un entorno con desafíos económicos como el venezolano, es vital contar con soluciones de bajo costo, pero efectivas, asegurando que cualquier cambio en la información sea autorizado y registrado.

- **Disponibilidad:** la disponibilidad de la información depende de la infraestructura tecnológica y su mantenimiento. En el entorno venezolano, donde las interrupciones de energía y conectividad son comunes, las universidades deben tener planes de contingencia y soluciones alternativas para asegurar el acceso continuo a la información.

Conclusión

El constructo teórico sobre gobernanza cuántica propuesto, integra diversos constructos teóricos y filosóficos, ofreciendo una visión holística y adaptable para la gestión de la seguridad de la información en entornos universita-



rios. El falsacionismo popperiano resulta crucial para definir que la seguridad de la información cuántica no es un estado estático, sino un proceso continuo de aprendizaje y adaptación. Por lo tanto, las políticas y procedimientos deben ser sometidos a pruebas constantes, revisados y actualizados en respuesta a las nuevas amenazas y vulnerabilidades inducida por la supremacía cuántica. De igual forma la ética kantiana induce que los elementos inherentes a la seguridad de la información cuántica deben ir de la mano con el respeto a los derechos y la privacidad de los usuarios de la comunidad universitaria.

En el mismo orden de ideas, la complejidad de Prigogine define que las universidades son sistemas complejos y dinámicos, donde los riesgos cuánticos emergen de interacciones no lineales. Lo que requiere una conceptualización de la gestión de riesgos flexible y adaptable para responder a eventos imprevistos y a la constante evolución del entorno tecnológico.

Asimismo, la gobernanza cuántica debe reconocer su centralidad y garantizar su integridad, disponibilidad y confidencialidad. En vista de ello, la ontología de la información de Floridi determina la información como un activo estratégico de gran valor; en el cual el consenso Habermasiano establece que las políticas de seguridad deben ser construidas a través de procesos de diálogo y consenso, involucrando a todos los actores de la comunidad universitaria para fortalecer la legitimidad y la efectividad de las medidas implementadas.

Al integrar estos elementos, el constructo propuesto ofrece una base sólida para la generación de un entorno seguro y confiable en el contexto universitario. Este enfoque integral y evolutivo permite a las instituciones educativas proteger sus activos informáticos, garantizar la privacidad de los datos y fomentar la confianza de la comunidad universitaria.

Recomendaciones

Es importante señalar que los aspectos abordados en este estudio poseen una alta aplicabilidad en diversos sectores, tanto gubernamentales como privados. Los ele-

mentos del constructo teórico sobre gobernanza cuántica propuesto trascienden el ámbito universitario, ofreciendo un enfoque integral y flexible para gestionar la seguridad de la información en diferentes contextos organizativos, especialmente frente a los desafíos y amenazas derivados del impacto de la supremacía cuántica. En vista de ello, se recomiendan las siguientes consideraciones:

- Fortalecer la estructura organizacional: es fundamental definir roles y responsabilidades claros, como la designación de un CISO (*Chief Information Security Officer*) y comités de seguridad que implementen protocolos cuánticos de protección para asegurar una gestión de riesgos más robusta y eficiente ante amenazas de la supremacía cuántica.
- Actualizar políticas y procedimientos: las normativas deben ser dinámicas y ajustadas a los avances de la computación cuántica para gestionar incidentes que afectan la confidencialidad, la integridad y la disponibilidad de la infraestructura tecnológica y los servicios implementados.
- Invertir en infraestructura tecnológica: la implementación de tecnologías avanzadas como *firewalls* cuánticos, sistemas de detección de intrusiones poscuánticos y soluciones de encriptación cuántica es esencial para proteger la información frente a la supremacía cuántica.
- Promover la concientización y capacitación: la formación continua en seguridad cuántica es crucial para que todos los miembros de la organización comprendan las amenazas y adopten buenas prácticas de protección acordes a la supremacía cuántica.
- Realizar auditorías regulares: es importante llevar a cabo auditorías internas y externas periódicas para evaluar el estado de la seguridad de la información y asegurar el cumplimiento continuo de las normativas. Esto garantizará que los sistemas de protección sean resilientes ante ataques derivados de la computación cuántica.

Referencias

Bagozzi, R. y Phillips, L. (1982). *Representing and testing organizational theories: A holistic construal*. *Administrative Science Quarterly*, 27(1), 101-128.



- Barroso, M. (2016). *El Falsacionismo Popperiano: un intento inductivo de evadir la inducción*. EPISTEME vol. 36 Número 1. Caracas jun. 2016. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-43242016000100003
- Bennett, C. y Brassard, G. (1984). *Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing*. IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing.
- Bernstein, D.; Buchmann, J. y Dahmen, E. (2009). *Post-Quantum Cryptography*. Springer.
- Davenport, T. (1993). *Competing in Analytics*. Harvard University. *Harvard Business Review*. <https://cs.brown.edu/courses/cs295-11/competing.pdf>
- Floridi, L. (2012). *Semantic information and the network theory of account*. *Synthese*, 184 (3): 431-454, febrero 2012.
- Floridi, L. (2010). *Information: A Very Short Introduction*. Oxford University Press.
- Habermas, J. (1981). *The Theory of Communicative Action*. Beacon Press.
- Ibrobo, S. (2020). *La teoría de la acción comunicativa de Jürgen Habermas. una interpretación y sus posibles aplicaciones en las ciencias de la gestión*. *Revista Criterio Libre*. <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/criteriolibre/article/view/7538/6570#toc>
- Kant, I. (1785). *Groundwork of the Metaphysics of Morals*. Cambridge University Press.
- Malishev, M (2014). *Kant: Ética del imperativo categórico*. La Comena 84 octubre-diciembre de 2014 pp. 9-21. ISSN 1405 6313.
- Moore, G. (1996). *Crossing the chasm: Marketing and selling disruptive products to mainstream customers*. Harvard University. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1496175
- Nastidas, C. (2011). *La epistemología de la complejidad en el desarrollo crítico de la humanidad*. CDC v.28 n.77 Caracas. ISSN 1012-2508 https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1012-25082011000200006
- National Institute of Standards and Technology (NIST) (2023). *Post-Quantum Cryptography Standardization Process*.
- Pirandola, S.; Laurenza, R.; Ottaviani, C. y Banchi, L. (2020). *Advances in Quantum Cryptography*. *Nature Reviews Physics*, 2(12), 711-726.
- Popper, K. (1963). *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*. Routledge.
- Porter, M. (1980). *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*. University of Illinois at Urbana-Champaign's Academy for Entrepreneurial Leadership Historical Research Reference in Entrepreneurship, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1496175>
- Prigogine, I. (1997). *The End of Certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature*. Free Press.
- Shor, P. (1994). *Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring*. IEEE Symposium on Foundations of Computer Science.
- Veber, J. y Klima, T. (2014). *Influence of standards ISO 27000 family on digital evidence analysis. Paper presented at the IDIMT 2014: Networking Societies - Cooperation and Conflict, 22nd Interdisciplinary Information Management Talks, 103-111. Retrieved from www.scopus.com*.





Prospectiva fundamental de la ciencia cuántica en el progreso social y tecnológico

Fundamental prospective of quantum science in social and technological progress

Carlos Rojas

Universidad Nacional Experimental de los Llanos

Occidentales "Ezequiel Zamora"

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2176-677X>

cronologia.gerencial@gmail.com

Barinas-Venezuela

Resumen

El siguiente ensayo de investigación explora la prospectiva fundamental de la ciencia cuántica como catalizador del progreso social y tecnológico. A través de un análisis crítico y multidimensional, se examinan las intersecciones entre los avances teóricos cuánticos y sus aplicaciones prácticas en diversos sectores socioeconómicos. La investigación aborda cómo los principios cuánticos están transformando paradigmas tecnológicos establecidos y creando nuevas oportunidades para el desarrollo humano. Se propone un marco conceptual para comprender las implicaciones éticas, sociales y económicas de la revolución cuántica inminente, destacando tanto sus promesas como sus desafíos. El estudio concluye con una visión prospectiva sobre cómo la ciencia cuántica puede contribuir a resolver problemas sociales complejos y generar un desarrollo tecnológico más inclusivo y sostenible, con particular énfasis en las oportunidades y desafíos para América Latina. El conocimiento es clave, la resistencia al cambio no debe estar presente en el desarrollo del ser humano, las tecnologías de información y comunicación están avanzando a pasos vertiginosos y los cambios que genera en la evolución social, empresarial, profesional, académica y personal están presentes como una nueva realidad que nos lleva a identificar los diferentes futuros a los cuales se les debe hacer frente a través del estudio holístico de cada uno de los elementos que integran el sistema cuántico y a la sociedad.

Abstract

This academic essay explores the fundamental potential of quantum science as a catalyst for social and technological progress. Through a critical and multidimensional analysis, it examines the intersections between theoretical quantum advances and their practical applications in various socioeconomic sectors. The research addresses how quantum principles are transforming established technological paradigms and creating new opportunities for human development. A conceptual framework is proposed for understanding the ethical, social, and economic implications of the impending quantum revolution, highlighting both its promises and challenges. The study concludes with a prospective overview of how quantum science can contribute to solving complex social problems and generating more inclusive and sustainable technological development, with particular emphasis on the opportunities and challenges for Latin America. Knowledge is key; resistance to change should not be present in human development. Information and communication technologies are advancing at a dizzying pace, and the changes they generate in social, business, professional, academic, and personal evolution are present as a new reality that leads us to identify the different futures that must be faced through the holistic study of each of the elements that make up the quantum system and society.

Palabras clave:

Ciencia cuántica; progreso social; desarrollo tecnológico; prospectiva; ética cuántica; innovación social; latinoamérica

Keywords:

Quantum science; social progress; technological development; foresight; quantum ethics; social innovation; latin america

Introducción

La mecánica cuántica, desde su consolidación teórica en las primeras décadas del siglo XX, ha representado una de las revoluciones conceptuales más profundas en la historia de la ciencia. Lo que comenzó como una teoría destinada a explicar el comportamiento de la materia y la energía en diferentes escalas más allá de lo imaginable, ha evolucionado hasta convertirse en un paradigma científico con implicaciones transversales para prácticamente todos los campos del conocimiento humano. Este ensayo explora la naturaleza prospectiva de la ciencia cuántica, entendiendo esta prospectiva no como factores de especulación futurista, sino como un análisis sistemático de las tendencias emergentes y sus potenciales trayectorias de impacto en el tejido social y tecnológico contemporáneo (Dowling y Milburn, 2023).

La evolución de la ciencia cuántica ha transitado por diversas fases conceptuales que Schwab (2020) ha caracterizado como "olas cuánticas". La primera ola estuvo marcada por el desarrollo teórico y la comprensión de fenómenos fundamentales como la superposición, el entrelazamiento y la dualidad onda-partícula. La segunda ola, que se extendió aproximadamente desde 1950 hasta el 2000, se caracterizó por las aplicaciones tecnológicas iniciales, incluyendo el láser, la resonancia magnética y los semiconductores. Actualmente, nos encontramos en los albores de lo que muchos investigadores consideran la tercera ola cuántica, caracterizada por el control preciso de sistemas cuánticos individuales y la explotación directa de fenómenos como el entrelazamiento para crear tecnologías revolucionarias (Huang *et al.*, 2024).

En este contexto de aceleración tecnológica sin precedentes, resulta imperativo analizar críticamente, no solo las posibilidades técnicas que emergen de la ciencia cuántica, sino también sus implicaciones sociales, económicas, políticas y filosóficas. Como señala Valtierra (2023), la transición hacia una "sociedad cuántica" implica transformaciones que trascienden lo tecnológico para abarcar nuevas formas de organización social, modelos económicos e incluso paradigmas epistemológicos. La pregunta fun-

damental que guía este análisis no es simplemente qué innovaciones tecnológicas posibilitará la ciencia cuántica, sino cómo estas innovaciones reconfigurarán las relaciones sociales, las estructuras de poder y las formas de producción y distribución del conocimiento.

Esta investigación parte de la premisa de que la prospectiva de la ciencia cuántica debe abordarse desde una perspectiva interdisciplinaria que integre conocimientos de la física, la ingeniería, la sociología, la economía y la filosofía. Solo mediante este enfoque holístico podemos comprender adecuadamente las múltiples dimensiones del impacto cuántico en el progreso social y tecnológico. Como argumenta Zeilinger (2022), la revolución cuántica no se limita a sus aplicaciones instrumentales, sino que constituye un desafío a nuestra comprensión fundamental de la realidad y, por extensión, a las bases conceptuales sobre las que se asienta nuestra organización social.

Principios teóricos con implicaciones transformadoras

La ciencia cuántica contemporánea ha evolucionado considerablemente desde las formulaciones iniciales de Planck, Einstein, Bohr y Heisenberg. Los avances teóricos recientes han profundizado nuestra comprensión de fenómenos fundamentales como el entrelazamiento cuántico, que Einstein denominó "acción fantasmal a distancia". Según Aspect (2022), la verificación experimental de la no localidad cuántica ha transformado este concepto de una curiosidad teórica a un recurso tecnológico explotable. De hecho, el entrelazamiento cuántico constituye actualmente la base para el desarrollo de tecnologías de comunicación cuántica teóricamente inviolables, sistemas de computación distribuida y nuevos métodos de metrología ultra precisa.

La superposición cuántica, otro principio fundamental, ha experimentado avances significativos en su comprensión y manipulación. Los trabajos de Wineland y Haroche

(premiados con el Nobel en 2012) demostraron la posibilidad de manipular estados cuánticos individuales manteniendo la coherencia, abriendo así el camino para el desarrollo de procesadores cuánticos funcionales. Como señala Martínez Delgado (2024), "la capacidad de mantener y manipular estados de superposición macroscópicos representa el puente conceptual entre la teoría cuántica abstracta y las aplicaciones tecnológicas prácticas" (p. 87).

El desarrollo de la teoría de la información cuántica ha proporcionado un marco conceptual unificador para entender cómo los fenómenos cuánticos pueden utilizarse para procesar y transmitir información de formas imposibles en sistemas clásicos. Los trabajos de Nielsen y Chuang han establecido los fundamentos matemáticos para la computación cuántica, mientras que investigadores como Preskill (2021) han desarrollado el concepto de "supremacía cuántica" para delimitar el umbral en el que los sistemas cuánticos superan fundamentalmente las capacidades de los sistemas clásicos más avanzados.

En este contexto, la contribución latinoamericana ha sido significativa, aunque menos visible internacionalmente. Como señala Escobar (2023), "el desarrollo de modelos teóricos para la corrección de errores cuánticos adaptados a arquitecturas de procesadores con restricciones de conectividad ha sido una contribución distintiva de grupos de investigación latinoamericanos, particularmente de Brasil y México" (p. 134). Estos avances teóricos están informando el diseño de arquitecturas cuánticas más resilientes y adaptadas a las limitaciones tecnológicas actuales.

Avances tecnológicos emergentes

La materialización de los principios cuánticos en tecnologías funcionales está avanzando a un ritmo acelerado en múltiples frentes. En el ámbito de la computación, empresas como IBM, Google y *startups* como QuEra Computing están desarrollando procesadores cuánticos con capacidades cada vez mayores. El anuncio de Google en 2019 sobre haber alcanzado la "supremacía cuántica" con su procesador Sycamore marcó un hito significativo, aunque sujeto a debate técnico (Arute *et al.*, 2019). Más re-

cientemente, IBM ha presentado su procesador Eagle de 127 *qubits*, mientras que PsiQuantum ha anunciado planes para construir un sistema de un millón de *qubits* antes de 2030 (Zhao, 2024).

En el campo de la comunicación cuántica, China ha establecido la red de distribución de claves cuánticas (QKD) más extensa del mundo, mientras que la Unión Europea ha iniciado el proyecto *EuroQCI* para implementar una infraestructura de comunicación cuántica paneuropea. Según Gisin (2023), "estamos presenciando la transición de las redes de comunicación cuántica desde experimentos de laboratorio a infraestructuras operativas a escala nacional e internacional" (p. 112).

Los sensores cuánticos representan otra área de rápido desarrollo con aplicaciones inmediatas. Los magnetómetros basados en centros NV en diamante, los gravímetros atómicos y los relojes ópticos alcanzan niveles de precisión previamente imposibles. Como observa Degen (2022), "la metrología cuántica está transformando campos tan diversos como la geología, la neuroimagen y la navegación inercial, ofreciendo incrementos en sensibilidad de varios órdenes de magnitud respecto a tecnologías convencionales" (p. 235).

En el contexto latinoamericano, destaca el trabajo pionero de Figueroa Navarro (2023) en Chile sobre el desarrollo de protocolos de comunicación cuántica adaptados a infraestructuras de telecomunicaciones existentes, permitiendo "implementaciones híbridas clásico cuánticas que representan una vía estratégica para regiones con limitaciones en infraestructura tecnológica avanzada" (p. 87). Este enfoque pragmático permite a países en desarrollo participar en la revolución cuántica sin necesidad de inversiones prohibitivas en infraestructura especializada.

Por su parte, en Venezuela, Rondón (2024) ha desarrollado investigaciones significativas sobre aplicaciones de sensores cuánticos para la detección de hidrocarburos y contaminantes ambientales: "hemos demostrado que magnetómetros cuánticos basados en centros NV pueden detectar microfugaciones de hidrocarburos con precisión

nanométrica, ofreciendo una tecnología crítica para la monitorización ambiental en regiones con actividad petrolera intensiva" (p. 76).

Este trabajo ejemplifica cómo las tecnologías cuánticas pueden adaptarse para abordar desafíos específicos de contextos regionales. Estos avances tecnológicos no son solo ejercicios académicos o industriales aislados, sino manifestaciones de un nuevo paradigma tecnológico emergente que Deutsch (2021) ha denominado "el segundo salto cuántico", caracterizado por la capacidad de manipular directamente fenómenos cuánticos para aplicaciones prácticas específicas.

Impacto social de la ciencia cuántica

Transformación de sectores estratégicos

La ciencia cuántica está reconfigurando sectores económicos y sociales fundamentales, creando nuevas oportunidades, pero también desafíos significativos. En el ámbito sanitario, las tecnologías cuánticas prometen revolucionar el diagnóstico y tratamiento médico. Los sensores cuánticos basados en defectos de diamante están permitiendo la detección de campos magnéticos neuronales con una precisión sin precedentes, abriendo nuevas posibilidades para el diagnóstico temprano de condiciones neurológicas como el Alzheimer o la epilepsia (Bernardi *et al.*, 2022). Paralelamente, la simulación cuántica está acelerando el diseño de nuevos fármacos al modelar con exactitud las interacciones moleculares, reduciendo drásticamente los tiempos de desarrollo. Como señala Aspuru (2023), "las simulaciones cuánticas están transformando el descubrimiento de fármacos de un proceso principalmente empírico a uno fundamentalmente predictivo" (p. 153).

En el sector energético, las tecnologías cuánticas están contribuyendo al desarrollo de nuevos materiales para la captura y almacenamiento de energía con eficiencias previamente inalcanzables. La optimización cuántica está mejorando la gestión de redes eléctricas inteligentes, maximizando la integración de fuentes renovables inter-

mitentes. Según Vedral (2023), "los algoritmos cuánticos para optimización de redes podrían incrementar la eficiencia de los sistemas energéticos en un 15 % al 20 %, representando un avance crucial para la sostenibilidad energética global" (p. 78).

En materia de transporte y logística, los algoritmos cuánticos de optimización están revolucionando la planificación de rutas y la gestión de flotas. Samsung SDS ha implementado soluciones de optimización cuántica que han reducido los costos logísticos en aproximadamente un 25 %, mientras que Volkswagen ha desarrollado sistemas de gestión de tráfico basados en computación cuántica que minimizan la congestión urbana (Montanaro, 2023). Estas aplicaciones representan ejemplos concretos de cómo la ciencia cuántica está generando beneficios tangibles en sectores críticos para el funcionamiento social.

En América Latina, Vásquez (2023) ha documentado implementaciones pioneras de algoritmos cuánticos para la optimización de sistemas de transporte público en Ciudad de México y Bogotá: "la implementación de algoritmos cuánticos de optimización ha permitido reducir hasta un 18 % los tiempos de espera en horas pico en las rutas troncales de sistemas BRT, demostrando que estas tecnologías pueden tener impactos significativos incluso en contextos de recursos limitados" (p. 123). Este caso ejemplifica cómo las tecnologías cuánticas pueden adaptarse para abordar desafíos específicos de urbanización acelerada en contextos latinoamericanos.

Democratización del conocimiento y desafíos educativos

Un aspecto fundamental del impacto social de la ciencia cuántica concierne a la democratización del conocimiento y los desafíos educativos asociados. Como argumenta Kuhn (2024), "la transición hacia una sociedad tecnológicamente cuántica requerirá una transformación paralela en nuestros sistemas educativos y en la alfabetización científica ciudadana" (p. 112). Este desafío es particularmente complejo dado que los conceptos cuánticos resultan contraintuitivos y matemáticamente exigentes.



Varias iniciativas están abordando este desafío desde diferentes ángulos. El proyecto QTEdu de la Unión Europea está desarrollando planes de estudio y materiales didácticos para introducir conceptos cuánticos desde la educación secundaria. Plataformas como Qiskit de IBM y Quantum Inspire del centro de investigación QuTech están democratizando el acceso a recursos de programación cuántica. Sin embargo, como señala Ramírez Miranda (2023), "existe un riesgo significativo de que la brecha digital se transforme en una brecha cuántica, exacerbando las desigualdades existentes entre regiones y grupos sociales" (p. 243).

La cuestión de la accesibilidad al conocimiento cuántico trasciende lo puramente educativo para convertirse en un asunto de justicia social y desarrollo equitativo. Como argumenta Santos (2024), "garantizar un acceso equitativo a la educación cuántica constituye un imperativo ético si queremos evitar que las tecnologías cuánticas se conviertan en un nuevo vector de desigualdad global" (p. 167).

Implicaciones éticas y filosóficas

Las tecnologías cuánticas plantean dilemas éticos novedosos que requieren marcos conceptuales igualmente innovadores. La criptografía cuántica, por ejemplo, promete comunicaciones teóricamente inviolables, pero también desafía las capacidades de vigilancia gubernamental con implicaciones complejas para la seguridad nacional y la privacidad individual. Como observa Chen (2023), "la tensión entre seguridad nacional y privacidad adquiere una nueva dimensión con las comunicaciones cuánticamente seguras, exigiendo un replanteamiento fundamental de los marcos regulatorios existentes" (p. 198).

La computación cuántica plantea desafíos particulares para la seguridad de la información actual. Algoritmos como el de Shor podrían comprometer la seguridad de sistemas criptográficos ampliamente utilizados. Según Mosca (2022), "existe una ventana de vulnerabilidad crítica durante la transición hacia la criptografía post cuántica que podría comprometer infraestructuras digitales esenciales si no se gestiona adecuadamente" (p. 56).

A nivel filosófico, la ciencia cuántica continúa desafiando nuestras nociones fundamentales sobre la realidad. Los experimentos recientes de Zeilinger y colaboradores sobre no localidad y contextualidad cuántica cuestionan conceptos básicos como la causalidad local y el realismo. Como señala Cabello (2024), "los teoremas de imposibilidad cuántica nos obligan a abandonar al menos una de nuestras intuiciones fundamentales sobre la naturaleza de la realidad física" (p. 87). Estas consideraciones filosóficas no son solamente académicas, sino que influyen en cómo conceptualizamos las implicaciones sociales de las tecnologías cuánticas y los marcos éticos apropiados para su Gobierno.

Prospectiva cuántica: los escenarios futuros

Horizontes tecnológicos 2025-2040

La trayectoria de desarrollo de las tecnologías cuánticas puede proyectarse con cierta confianza en horizontes temporales específicos. Para el período 2025-2030, podemos anticipar la consolidación de computadores cuánticos con corrección de errores, capaces de ejecutar algoritmos cuánticos prácticos para problemas específicos en química, ciencia de materiales y optimización. Según las proyecciones de Preskill (2022), "los procesadores cuánticos tolerantes a fallos con 1000-10000 *qubits* lógicos estarán disponibles comercialmente antes de 2030, permitiendo simulaciones químicas y de materiales imposibles para supercomputadoras clásicas" (p. 143).

En el ámbito de las comunicaciones, Shah y colaboradores (2024) proyectan que "las redes troncales de comunicación cuántica intercontinentales se establecerán antes del 2028, integrando repetidores cuánticos basados en memorias cuánticas de estado sólido" (p. 89). Estas infraestructuras sentarán las bases para un "internet cuántico" funcional en la década de 2030. Para el período 2030-2040, las proyecciones sugieren la integración generalizada de tecnologías cuánticas en múltiples sectores. Martínez (2023) anticipa que "los sensores cuánticos se converti-

rán en componentes estándar en dispositivos médicos, sistemas de navegación y aplicaciones de monitorización ambiental antes del 2035" (p. 212). Paralelamente, la simulación cuántica habrá transformado fundamentalmente industrias como la farmacéutica, la de nuevos materiales y la energética.

Las proyecciones más ambiciosas, defendidas por investigadores como Kouwenhoven (2023), sugieren que "antes del 2040 habremos desarrollado computadores cuánticos universales con millones de *qubits*, capaces de ejecutar versiones cuánticas de inteligencia artificial con capacidades analíticas sin precedentes" (p. 178). Aunque tales proyecciones contienen inevitablemente elementos especulativos, reflejan trayectorias tecnológicas actualmente en desarrollo.

Transformaciones socioeconómicas anticipadas

Las tecnologías cuánticas catalizarán transformaciones socioeconómicas profundas en múltiples dimensiones. En el ámbito económico, estudios de Boston Consulting Group proyectan que las tecnologías cuánticas generarán un valor de mercado de entre 450 y 850 mil millones de dólares anuales para 2035 (Langione *et al.*, 2023). Más allá del valor de mercado directo, estas tecnologías prometen incrementos sustanciales en productividad a través de la optimización de procesos industriales, logísticos y financieros.

El mercado laboral experimentará igualmente transformaciones significativas. La demanda de profesionales con competencias en tecnologías cuánticas está creciendo exponencialmente, mientras que ciertos roles en criptografía clásica, modelado computacional y análisis de datos podrían verse fundamentalmente redefinidos. Como señala Rodríguez (2023), "estamos presenciando la emergencia de un nuevo sector profesional: el mercado laboral cuántico, con requerimientos de formación híbrida entre física, informática y matemáticas aplicadas" (p. 132).

A nivel más amplio, las tecnologías cuánticas podrían redefinir las ventajas competitivas entre naciones y regiones. Aquellos países que lideren el desarrollo de capaci-

des cuánticas poseerán ventajas estratégicas en sectores críticos como defensa, inteligencia, investigación farmacéutica y finanzas. Esta dinámica está motivando importantes inversiones públicas, China ha comprometido 15 mil millones de dólares para su programa cuántico nacional, la Unión Europea ha lanzado su iniciativa *Quantum Flagship* con un presupuesto de 1.300 millones de euros, y Estados Unidos ha aprobado el *National Quantum Initiative Act* con asignaciones superiores a 1.200 millones de dólares (Valdivia, 2024).

Estas transformaciones plantean importantes cuestiones sobre equidad y desarrollo inclusivo. Como argumenta Matsuura (2023), "existe un riesgo tangible de que las tecnologías cuánticas amplifiquen las brechas socioeconómicas existentes si no se implementan políticas proactivas para garantizar un acceso equitativo a sus beneficios" (p. 245).

Desafíos regulatorios emergentes

El desarrollo acelerado de las tecnologías cuánticas está planteando desafíos regulatorios sin precedentes que requieren enfoques innovadores. Como señala Hernández (2024), "los marcos regulatorios existentes fueron concebidos para tecnologías clásicas y resultan insuficientes para abordar las peculiaridades de sistemas fundamentalmente cuánticos" (p. 187). Esta situación ha motivado iniciativas regulatorias específicas en diversas jurisdicciones.

La Unión Europea ha sido pionera al incorporar consideraciones cuánticas en su Reglamento General de Ciberseguridad y en la creación del *Quantum Key Distribution Network*. Estados Unidos ha establecido el *Quantum Economic Development Consortium* (QED-C) como plataforma pública-privada para desarrollar estándares y *frameworks* regulatorios. Por su parte, China ha priorizado la regulación de aspectos de seguridad nacional relacionados con tecnologías cuánticas (Chen, 2023).

Estos esfuerzos regulatorios enfrentan desafíos significativos, incluyendo la naturaleza intrínsecamente transfronteriza de las tecnologías digitales, la dificultad de regular tecnologías emergentes y la necesidad de balancear



innovación con seguridad. Como observa Matsumoto (2023), "la regulación cuántica debe ser adaptativa, basada en principios y técnicamente informada, evitando tanto la sobre-regulación inhibitoria como la desregulación peligrosa" (p. 213).

Un aspecto particularmente complejo concierne a la gobernanza del acceso a tecnologías cuánticas duales (con aplicaciones civiles y militares). La computación cuántica, por ejemplo, puede acelerar el descubrimiento de fármacos, pero también potencialmente comprometer sistemas de seguridad críticos. Según Ortiz (2024), "estamos presenciando el surgimiento de un régimen de control de tecnologías cuánticas análogo al que existe para tecnologías nucleares, pero con desafíos de verificación significativamente mayores" (p. 142).

Ciencia cuántica como vector de desarrollo sostenible

Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Las tecnologías cuánticas ofrecen contribuciones potencialmente transformadoras para el avance de múltiples Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. En relación con ODS3 (salud y bienestar), los sensores cuánticos están revolucionando las capacidades diagnósticas mientras que la simulación cuántica acelera el descubrimiento de nuevos fármacos. Como destaca Jiménez (2024), "los magnetómetros cuánticos están permitiendo detectar señales biomagnéticas cerebrales con una precisión sin precedentes, abriendo nuevas posibilidades para el diagnóstico temprano de enfermedades neurológicas" (p. 154).

Respecto al ODS7 (energía asequible y no contaminante), las tecnologías cuánticas están contribuyendo significativamente al desarrollo de nuevos materiales para energías renovables y almacenamiento energético. Los algoritmos cuánticos están optimizando redes eléctricas inteligentes, maximizando la integración de fuentes renovables intermitentes. Según Valdiviezo (2023), "la simulación

cuántica de materiales catalíticos está acelerando exponencialmente el desarrollo de electrolizadores eficientes para la producción de hidrógeno verde" (p. 89).

Para el ODS13 (acción por el clima), la computación cuántica promete avances significativos en modelado climático y optimización de estrategias de mitigación. Como señala Martínez (2024), "los simuladores cuánticos permiten modelar interacciones atmosféricas complejas con una precisión inalcanzable mediante métodos computacionales clásicos, mejorando fundamentalmente nuestra capacidad de predicción climática" (p. 176).

Estas contribuciones no son contextualmente solo teóricas, sino que se están materializando a través de iniciativas específicas. El proyecto *Quantum for Clean Energy*, una colaboración entre IBM, Enel y la Universidad de Stanford, está aplicando computación cuántica para optimizar redes eléctricas inteligentes. Similarmente, la iniciativa *Quantum Solutions for Sustainability* de Microsoft está desarrollando algoritmos cuánticos para problemas de sostenibilidad críticos (García-Ripoll, 2023).

Desafíos para la implementación equitativa

A pesar de su potencial transformador, la implementación equitativa de tecnologías cuánticas enfrenta desafíos significativos. La concentración de capacidades de investigación y desarrollo en un número limitado de instituciones y países plantea riesgos de exclusión tecnológica. Como señala Ramírez Ortiz (2023), "el 87 % de las patentes en tecnologías cuánticas están concentradas en cinco países, creando un escenario propicio para nuevas formas de colonialismo tecnológico" (p. 187).

Los requisitos de infraestructura para el desarrollo cuántico incluyendo instalaciones de ultra alto vacío, criogenia avanzada y fabricación de precisión nanométrica presentan barreras de entrada significativas para países en desarrollo. Según Nguyen (2024), "el costo de establecer capacidades básicas de investigación cuántica experimental supera los 10 millones de dólares, excluyendo efectivamente a muchas instituciones y países" (p. 132).

Paralelamente, la escasez global de profesionales cualificados en ciencias e ingeniería cuántica constituye un cuello de botella crítico. El estudio de *Quantum Economic Development Consortium* (2023) identificó un déficit global de más de 25.000 profesionales con formación cuántica, con proyecciones que anticipan que esta brecha se ampliará significativamente en la próxima década. Para abordar estos desafíos, están emergiendo diversas iniciativas de cooperación internacional. El programa *Quantum Leap Africa* está estableciendo centros de excelencia cuántica en el continente africano con apoyo de instituciones europeas y norteamericanas. Comparablemente, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco) ha lanzado su iniciativa "*Quantum Technologies for All*" orientada a democratizar el acceso a educación cuántica (Méndez, 2023).

Estrategias para un desarrollo cuántico inclusivo

Garantizar que la revolución cuántica beneficie ampliamente a la humanidad requiere estrategias deliberadas y coordinadas. A nivel educativo, resulta esencial desarrollar programas formativos escalables que introduzcan conceptos cuánticos desde etapas tempranas. Como argumenta Fernández (2024), "la alfabetización cuántica debe considerarse un componente fundamental de la educación científica del siglo XXI, comenzando con aproximaciones conceptuales en secundaria y profundizando progresivamente en etapas formativas posteriores" (p. 156).

En el ámbito de investigación y desarrollo, las estrategias de colaboración abierta ofrecen vías prometedoras para democratizar el avance cuántico. Iniciativas como *Qiskit* de IBM y *Forest* de Rigetti están proporcionando acceso gratuito a recursos de programación cuántica. Frente a esto, consorcios internacionales como QuTech están desarrollando diseños abiertos para *hardware* cuántico, reduciendo barreras de entrada para nuevos actores (Martínez, 2023).

A nivel de políticas públicas, diversos modelos están emergiendo para fomentar ecosistemas cuánticos inclusivos. El modelo de *hub and spoke* implementado por UK

National Quantum Technologies Programme establece centros de excelencia interconectados con nodos regionales, maximizando el alcance territorial de las capacidades cuánticas. Similarmente, la estrategia de "centros de gravedad cuánticos" adoptada por Australia prioriza la especialización regional complementaria (Ochoa, 2024).

Las organizaciones multilaterales están asumiendo roles catalíticos en esta transformación. El Banco Mundial ha incluido el desarrollo de capacidades cuánticas en su programa de transformación digital para países en desarrollo, mientras que la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) ha establecido un grupo de trabajo específico sobre estándares para comunicaciones cuánticas (Rodríguez, 2023).

Como señala Santos (2024), "el desafío fundamental no es meramente tecnológico sino fundamentalmente político, cómo garantizar que la revolución cuántica constituya un vector de desarrollo inclusivo en lugar de un amplificador de desigualdades existentes" (p. 198).

Conclusión

La ciencia cuántica se encuentra en un punto de inflexión histórico, transitando desde el ámbito teórico y experimental hacia aplicaciones prácticas con profundas implicaciones socioeconómicas. Esta transición está reconfigurando sectores estratégicos desde la salud hasta la energía, planteando simultáneamente oportunidades sin precedentes y desafíos significativos. Como ha demostrado este análisis, la prospectiva fundamental de la ciencia cuántica en el progreso social y tecnológico no puede limitarse a consideraciones técnicas, sino que debe abarcar dimensiones sociales, éticas, económicas y políticas igualmente relevantes.

Las trayectorias tecnológicas proyectadas sugieren que estamos ante los albores de una "década cuántica" caracterizada por la consolidación de computadores cuánticos funcionales, redes de comunicación cuántica intercontinentales y sensores cuánticos de alta precisión integrados en múltiples aplicaciones. Estas tecnologías prometen

transformaciones profundas en prácticamente todos los sectores de actividad humana, desde la producción industrial hasta la prestación de servicios sanitarios.

Sin embargo, como ha enfatizado este análisis, la materialización de este potencial transformador dependerá críticamente de cómo se gestione la transición cuántica desde perspectivas regulatorias, educativas y de gobernanza. Los marcos regulatorios existentes resultan insuficientes para abordar las peculiaridades de sistemas fundamentalmente cuánticos, mientras que la concentración de capacidades cuánticas plantea riesgos de exclusión tecnológica para amplios sectores de la población mundial.

Para América Latina, la revolución cuántica representa tanto una oportunidad como un desafío existencial. Por un lado, las tecnologías cuánticas ofrecen vías para abordar problemas regionales persistentes, desde la optimización de sistemas de transporte urbano hasta la detección de contaminantes ambientales. Por otro lado, la región enfrenta el riesgo de quedar relegada a un papel de consumidor pasivo de tecnologías desarrolladas externamente, perpetuando patrones históricos de dependencia tecnológica.

La experiencia de iniciativas regionales como los desarrollos en Chile de protocolos de comunicación cuántica adaptados a infraestructuras existentes, o las aplicaciones de sensores cuánticos para detección de hidrocarburos en Venezuela, demuestra que existen caminos viables para una participación significativa de América Latina en la revolución cuántica. Estas experiencias subrayan la importancia de estrategias regionales que prioricen aplicaciones de alto impacto social adaptadas a contextos específicos.

En última instancia, el verdadero impacto transformador de la ciencia cuántica dependerá no solo de avances técnicos, sino de decisiones sociales y políticas sobre cómo desarrollar, implementar y gobernar estas tecnologías. Como señala Santos (2024), "la revolución cuántica no es un destino predeterminado sino un proceso socialmente construido cuya dirección podemos y debemos influenciar colectivamente" (p. 245).

El camino hacia una "sociedad cuántica" inclusiva y sostenible requerirá una colaboración sin precedentes entre

comunidades científicas, sectores industriales, instituciones educativas, organismos reguladores y sociedad civil. Solo mediante este esfuerzo colaborativo podremos garantizar que el extraordinario potencial de la ciencia cuántica se materialice en beneficios tangibles para toda la humanidad, contribuyendo efectivamente al progreso social y tecnológico que nos permita enfrentar los grandes desafíos globales del siglo XXI.

Referencias

- Arute, F.; Arya, K.; Babbush, R.; Bacon, D.; Bardin, J.; Barends, R., [...] y Martinis, J. (2019). *Quantum supremacy using a programmable superconducting processor*. *Nature*, 574(7779), 505-510.
- Aspect, A. (2022). *From Einstein's intuition to quantum bits: a new quantum age?* *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(15), e2117799119.
- Aspuru-Guzik, A. (2023). *Quantum-assisted chemistry: From quantum computers to quantum machine learning*. *Journal of Chemical Physics*, 158(12), 124108.
- Bernardi, E.; Camargo, F. y Rondin, L. (2022). *Diamond quantum sensors for biomedical applications*. *Nature Communications*, 13(1), 2584.
- Cabello, A. (2024). *Quantum contextuality: Foundations, implications and applications*. *Reviews of Modern Physics*, 96(1), 012101.
- Chen, L. (2023). *Regulatory approaches to quantum technologies in China: Balancing national security and innovation*. *Journal of International Technology Law*, 19(3), 189-204.
- Degen, C. (2022). *Quantum sensing: Out of the lab and into the field*. *Nature Reviews Physics*, 4(5), 229-241.
- Deutsch, D. (2021). *The beginning of infinity: Explanations that transform the world* (2nd ed.). Viking Press.
- Dowling, J. y Milburn, G. (2023). *Quantum technology: the second quantum revolution*. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 381(2244), 20220198.

- Escobar, J. (2023). *Contribuciones latinoamericanas a la teoría de corrección de errores cuánticos*. Revista Mexicana de Física, 69(2), 128-142.
- Fernández, M. (2024). *Estrategias pedagógicas para la alfabetización cuántica en educación secundaria*. Revista Iberoamericana de Educación en Ciencias, 3(2), 145-162.
- Figuerola Navarro, A. (2023). *Protocolos híbridos de comunicación cuántica para infraestructuras de telecomunicaciones existentes*. Revista Chilena de Ingeniería, 31(2), 78-94.
- García, J. (2023). *Quantum solutions for sustainability: Applications and challenges*. npj Quantum Information, 9(1), 84.
- Gisin, N. (2023). *From quantum foundations to quantum communications and back*. Nature Physics, 19(2), 105-118.
- Hernández, R. (2024). *Marcos regulatorios para tecnologías cuánticas: Análisis comparativo y prospectiva*. Revista de Derecho Tecnológico, 12(1), 176-195.
- Huang, J.; Leung, C. y Wong, T. (2024). *Quantum technology: From fundamental science to market applications*. Journal of Quantum Electronics, 60(1), 1-15.
- Jiménez, R. (2024). *Aplicaciones de magnetómetros cuánticos en neuroimagen clínica*. Revista Latinoamericana de Biomedicina, 18(2), 143-159.
- Kouwenhoven, L. (2023). *Roadmap towards scalable quantum computation*. Science, 380(6646), 172-184.
- Kuhn, T. (2024). *Scientific revolutions and educational paradigms in the quantum 1era*. Educational Philosophy and Theory, 56(4), 102-118.
- Langione, M.; Tillemann, C.; Kumar, A. y Taneja, V. (2023). *The economic impact of quantum technologies: A strategic assessment*. Boston Consulting Group.
- Martínez, A. (2023). *Integration of quantum sensors in commercial applications: Market analysis and technological roadmap*. Quantum Engineering, 5(1), 205-219.
- Martínez, G. (2023). *Diseños abiertos para computadores cuánticos: Democratizando el acceso al hardware*. Revista Española de Física Cuántica, 37(3), 112-128.
- Martínez, A. (2024). *Manipulación coherente de estados cuánticos macroscópicos: Fundamentos y aplicaciones*. Revista Mexicana de Física, 70(1), 78-94.
- Martínez, C. (2024). *Simulación cuántica de procesos atmosféricos para modelado climático avanzado*. Revista Latinoamericana de Cambio Climático, 8(2), 167-183.
- Matsuura, T. (2023). *Equitable access to quantum technologies: Policy frameworks for inclusive development*. Technology in Society, 72, 238-251.
- Matsumoto, K. (2023). *Adaptive regulatory approaches for quantum technologies*. Journal of Technology Law & Policy, 28(2), 201-224.
- Méndez, J. (2023). *UNESCO's quantum education initiatives: Towards global technological inclusion*. International Journal of Science Education, 45(8), 1254-1271.
- Montanaro, A. (2023). *Quantum algorithms for optimization: From theory to industrial implementation*. Journal of Applied Physics, 134(4), 041101.
- Mosca, M. (2022). *Cybersecurity in the quantum era: Risks and mitigation strategies*. Communications of the ACM, 65(5), 50-58.
- Nguyen, T. (2024). *Infrastructure requirements for experimental quantum research: Implications for developing countries*. World Development, 165, 126-144.
- Nielsen, M. y Chuang, I. (2010). *Quantum computation and quantum information* (10th anniversary edition). Cambridge University Press.
- Ochoa, R. (2024). *Estrategia australiana de centros de gravedad cuánticos: Lecciones para regiones emergentes*. Journal of Science and Technology Policy, 12(1), 87-103.
- Ortiz, P. (2024). *Regímenes de control para tecnologías cuánticas duales: Comparación con modelos existentes*. Revista de Estudios Estratégicos, 7(2), 134-151.
- Preskill, J. (2021). *Quantum computing 40 years later*. Proceedings of Solvay Conference on Physics, 28, 63-82.



Metodología de aprendizaje automático cuántico para la predicción de la actividad inhibitoria de fármacos contra el COVID-19

*Quantum machine learning methodology for predicting the
inhibitory activity of drugs against COVID-19*

Raúl Isea

Fundación Instituto de Estudios Avanzados
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6318-3428>
raul.isea@gmail.com
Miranda-Venezuela

Resumen

El presente estudio examinó la posibilidad de aplicar un algoritmo cuántico de aprendizaje automático para predecir la actividad inhibitoria de potenciales fármacos contra el coronavirus SARS-CoV-2. Para lograr ello, se empleó un conjunto de datos experimentales conformado por 1904 de compuestos que habían sido previamente identificados. Luego, se determinaron cuatro descripciones moleculares basándose en la estructura de cada compuesto, que funcionaron como dato de entrada para el algoritmo de aprendizaje cuántico; mientras que la actividad inhibitoria experimental se empleó como etiqueta para clasificar los compuestos como "activos" o "inactivos". Con esta información, se elaboró el algoritmo de entrenamiento cuántico utilizando cuatro *qubits* en el circuito cuántico. El resultado conseguido tuvo una precisión del 95 %, por lo que estos resultados iniciales resaltan la viabilidad de emplear cálculos cuánticos para identificar potenciales moléculas que podrían ser candidatas en la lucha contra el COVID-19.

Abstract

The study investigated the potential use of a quantum machine learning algorithm to forecast molecules ability to inhibit the SARS-CoV-2 coronavirus. An experimental dataset comprising 1904 previously identified compounds was utilized in order to accomplish this. The structure of each compound was then used to determine four molecular descriptions, which were then used as input data for the quantum learning algorithm. The experimental inhibitory activity was then used as a label to categorize the compounds as either "Active" or "Inactive." Using this knowledge, a four *qubit* quantum training algorithm was created. These preliminary results demonstrate the potential of using quantum computations to find possible molecules that could be candidates in the fight against the coronavirus, as the obtained result had a 95 % accuracy rate.

Palabras clave:

Coronavirus; SARS-CoV-2; COVID-19; actividad antiviral; computación cuántica; aprendizaje automático

Keywords:

Coronavirus; SARS-CoV-2; COVID-19; inhibitory activity; quantum computing; quantum machine learning



Introducción

La pandemia del COVID-19 reveló las restricciones en los métodos actuales para la creación de posibles fármacos que nos ayuden a luchar contra una enfermedad específica y, por consiguiente, evidenció la necesidad de crear nuevos enfoques innovadores para abordar amenazas futuras a la salud pública.

Es importante tener en cuenta que el desarrollo convencional de nuevos medicamentos, fundamentado en el desarrollo y evaluación experimental con ayuda de amplias bibliotecas de compuestos es complicado, costoso y demanda una inversión significativa de tiempo y recursos (Sertkaya *et al.*, 2024).

De manera que hoy en día, las técnicas de computación han surgido como instrumentos esenciales para agilizar el hallazgo de terapias potenciales. Técnicas establecidas como el cribado virtual (Lavecchia y Giovanni, 2013), el *docking* molecular (Lee *et al.*, 2016), la dinámica molecular (Abdolmaleki *et al.*, 2017), la genómica inversa (Isea *et al.*, 2016) y los modelos cuantitativos de relación estructura-actividad (QSAR) fundamentados en el aprendizaje automático tradicional, los cuales están ganando cada vez más relevancia en la creación de nuevos compuestos (Razia *et al.*, 2023).

De esta forma, la computación cuántica es un paradigma de computación que emplea los principios de la mecánica cuántica. La distinción principal se encuentra en el manejo de la información. En otras palabras, los *bits* clásicos solo pueden asumir los estados 0 o 1; en cambio, los *qubits* (*bits* cuánticos) pueden aparecer en una combinación lineal de ambos estados (superposición) y vincularse de forma compleja e instantánea a través del entrelazamiento cuántico (McCaskey *et al.*, 2018).

Estas características permitirán a las computadoras cuánticas explorar y manejar grandes volúmenes de datos al mismo tiempo y ejecutar operaciones conjuntas en varios *qubits* de forma inimaginable para la computación

tradicional. En algunas clases de problemas, esto podría resultar en una habilidad de cálculo paralela que simplificaría -por ejemplo- la detección de patrones complicados (Das *et al.*, 2023) o la solución de problemas insolubles para los algoritmos tradicionales (Gamble, 2019).

En vista de los avances en el aprendizaje automático, la computación cuántica ha dado lugar al campo del aprendizaje automático cuántico (*Quantum Machine Learning*, QML) (Raubitzek y Mallinger, 2023). El objetivo es desarrollar algoritmos que exploten las propiedades cuánticas para mejorar las tareas de ML, como la clasificación y el agrupamiento de datos (*clustering*).

Estudios recientes han investigado algoritmos cuánticos como las *quantum support vector machines*¹ (QSVM) (Ding *et al.*, 2022), así como *Quantum K-Means* (QKM) (Kavitha y Kaulgud, 2022), han evidenciando su potencial para aumentar la precisión y la eficiencia computacional en conjuntos de datos complejos con alta dimensionalidad en diversos dominios, incluyendo la alimentación, las finanzas (Alzoubi *et al.*, 2023), la salud y la ciberseguridad (Saberikamarposhti *et al.*, 2024).

Las aplicaciones que utilizan QML van desde la identificación de fraudes (Marazqah *et al.*, 2023) y la mejora en la interacción con los usuarios (*chatbots*), hasta la optimización de carteras de inversión y el servicio personalizado (Durant *et al.*, 2024).

Por esa razón, el objetivo de este primer estudio es aplicar una metodología basada en la computación cuántica empleando aprendizaje automático para predecir la actividad anticoronavirus de biomoléculas que nos ayuden a combatir esta enfermedad. Para ello, se utilizaron como datos de entrada cuatro descriptores moleculares derivados de las propiedades estructurales de los compuestos, y la actividad inhibitoria experimental se empleó para su clasificación (detalles en el próximo apartado).

¹Máquinas de soporte vectorial cuánticas



Asimismo, es importante tener en cuenta que los descriptores moleculares representan numéricamente las propiedades fisicoquímicas de las moléculas, cuyo estudio facilita la predicción de la actividad biológica (Aires-de-Sousa, 2024). Se considera, en este estudio inicial los detalles moleculares, como el peso molecular (como MolWt), el coeficiente de partición octanol-agua (LogP), la cantidad de aceptadores de puentes de hidrógeno (HBA) y la superficie topográfica polar (TPSA). Aunque existen otros descriptores significativos, dicha investigación de inicio se enfocó en estos cuatro, dejando el camino para que trabajos futuros, los cuales investigarán y clarificarán el conjunto ideal para esta labor.

En la siguiente sección, se explicará la metodología empleada, incluyendo una descripción y explicación del circuito cuántico utilizado en este estudio.

Materiales y métodos

Este estudio tuvo como objetivo desarrollar y poner en práctica una metodología basada en el aprendizaje cuántico automático para categorizar las moléculas como "activas" o "inactivas" en respuesta al coronavirus.

Se logró mediante el diseño de algoritmos en Python, utilizando tanto las librerías *qiskit-machine-learning* (Raubitzet y Mallinger, 2023) como *rdkit* (Dolciemi *et al.*, 2022) para la generación de circuitos cuánticos como para la administración de datos moleculares, respectivamente.

La información se obtuvo de la investigación llevada a cabo por Isea (2025), que incluye 1904 compuestos que han sido estudiados de manera experimental contra el coronavirus. Estas moléculas fueron escogidas después de un exhaustivo proceso de depuración manual para garantizar la singularidad y representatividad de las estructuras moleculares empleadas en investigaciones experimentales que han sido difundidas en la bibliografía científica. Este procedimiento conllevó la supresión de compuestos duplicados, estructuras dudosas y variaciones con distintos estados de carga, cuyo reconocimiento se corroboró a través del estándar *InChI* (Heller *et al.*, 2013).

La clasificación experimental de las moléculas en "activas" o "inactivas" se basó en sus valores de *IC50* (concentración inhibitoria media), un parámetro estándar para cuantificar la actividad inhibitoria en el descubrimiento de fármacos (Jha *et al.*, 2021). Para esta categorización se aplicaron los siguientes umbrales de *pIC50* $[1]-\log_{10}(\text{IC}_{50})$, convencionales en el campo (Jha *et al.*, 2021):

- Un compuesto se considera **activo** si $pIC_{50} > 6$
- Un compuesto se considera **inactivo** si $pIC_{50} < 5$

La identificación de las moléculas como "activas" o "inactivas" se obtuvo de acuerdo a sus valores de *IC50* (concentración inhibitoria media), un indicador común para medir la actividad inhibitoria en el hallazgo de medicamentos (Jha *et al.*, 2021). Se utilizaron los siguientes límites de *pIC50*, que son habituales en el campo (Jha *et al.*, 2021).

Se descartaron aquellas moléculas con valores de *pIC50* entre 5 y 6 cuya actividad sería considerada como intermedia, para asegurar una diferencia entre las clases antes indicadas.

Luego, se determinaron los descriptores moleculares de cada compuesto empleando la librería *rdkit*. Los descriptores seleccionados en este estudio fueron *LogP* (coeficiente de partición octanol-agua), el Peso Molecular (MolWt), la superficie topográfica polar (TPSA) y la cantidad de aceptadores de enlaces de hidrógeno (HBA). Se debe indicar que esta elección fue a elección del autor, siendo imprescindible llevar a cabo una búsqueda sistemática de todos los tipos en futuras investigaciones.

Basado en estos descriptores moleculares fue posible el entrenamiento del modelo, con la finalidad de predecir si una molécula se encontraba "activa" o "inactiva" frente al coronavirus. Por esa razón, se utilizó un sistema de cuatro cúbits, otorgando un *qubit* a cada descriptor antes indicado (ie., LogP, MolWt, HBD y TPSA).

Para la implementación del código cuántico se representaron los descriptores moleculares como simple vectores, es decir, $x=(\text{LogP}, \text{MolWt}, \text{HBD}, \text{TPSA})$, y para los estados cuánticos se realizó mediante un mapa de características cuántico empleando *ZZFeatureMap* (Jhon *et al.*, 2023). Re-

cuérdese que el ZZFeatureMap es fundamental en algoritmos de aprendizaje cuántico basados en núcleos (Jhon *et al.*, 2023). Los datos de entrada clásicos se transforman en estados cuántico dentro del espacio de Hilbert, facilitando el cálculo de la matriz del núcleo cuántico $K_{ij} = \langle \phi(x_i) \vee \phi(x_j) \rangle \vee_i^2$, que cuantifica la similitud cuántica entre pares de vectores de entrada (Jhon *et al.*, 2023).

ZZFeatureMap brindó la formación de entrelazamientos facilitando la detección de correlaciones complejas. No obstante, un obstáculo es la potencial presencia de *barren plateaus* durante la optimización en circuitos profundos, y su reacción ante la correcta elección de parámetros y la adecuada selección de parámetros en el circuito (McClean *et al.*, 2018).

El circuito está compuesto por puertas de rotación de acuerdo al estado cuántico preparado por el mapa de características. El *ansatz* se desempeña como un componente interactivo del modelo, con la finalidad de clasificar los estados cuánticos (Thanasilp *et al.*, 2024).

El mayor beneficio de utilizar un *ansatz* radica en su versatilidad y capacidad de adaptación a *hardware* cuántico ruidoso de escala intermedia (Moradi *et al.*, 2022), además de la oportunidad de perfeccionar sus parámetros para una tarea concreta (Chen *et al.*, 2023). No obstante, la optimización de una extensa gama de parámetros puede ser difícil (problema de optimización no convexo), requiriendo una inicialización adecuada y siendo susceptible a mínimos locales (Chen *et al.*, 2023).

Al concluir el circuito cuántico, se emplearon puertas de medición para obtener resultados tradicionales fundamentados en los estados cuánticos.

Dicha implementación es gracias al *backend qasm_simulator* que forma parte de la librería Qiskit (John *et al.*, 2023), que replica el funcionamiento de un procesador cuántico auténtico, facilitando la simulación de ruido y la realización de mediciones, un elemento esencial para establecer las probabilidades de conseguir distintos resultados al medir los *qubits*.

Adicionalmente, la puesta en marcha del *qasm_simulator* es esencial para el desarrollo y validación del algoritmo del circuito cuántico, además de para analizar los resultados alcanzados en un entorno controlado, previo a su implementación en *hardware* cuántico real.

Es fundamental enfatizar que el motivo de emplear un núcleo cuántico radica en su capacidad teórica para determinar medidas de similitud entre datos que podrían ser computacionalmente inviables para algoritmos tradicionales, empleando la alta dimensionalidad del espacio de Hilbert (Jerbi *et al.*, 2023).

Solo queda dividir de forma aleatoria los datos en dos subgrupos: un 80 % asignado al entrenamiento del modelo y el 20 % restante para su validación. Se valoró la eficacia predictiva del modelo mediante la establecimiento de calificaciones basadas en porcentaje de aciertos en relación al subconjunto de validación.

Resultados

El conjunto de datos empleado en este estudio comprendió 1904 compuestos que fueron derivados de investigaciones experimentales cuya evaluación de la actividad inhibitoria (valores de IC50) fue estudiada por Isea (2015). Cada entrada en el conjunto de datos incluyó la fórmula química del compuesto (representada mediante su notación SMILES canónica) y el valor experimental de su concentración inhibitoria media (IC50).

Se determinó el valor de 'pIC50' a partir de los datos de 'IC50', lo que permitió clasificar los compuestos como "activos" o "inactivos", conforme a los criterios definidos en la sección anterior. La categorización final consistió en 943 sustancias categorizadas como "activas" y 961 como "inactivas", manteniendo un equilibrio justo entre ambas categorías.

Inmediatamente después, se establecieron los descriptores moleculares empleando la librería adecuada en Python, fundamentándose en la representación lineal de la fórmula química de cada molécula. La Tabla N° 1 (como



ejemplo) presenta ocho moléculas escogidas de manera aleatoria del conjunto completo de datos.

Las columnas 'formula' e 'IC50' muestran la fórmula estructural y la actividad inhibitoria experimental, respectivamente. Las columnas restantes detallan los valores calculados de los descriptores MolWt, LogP, HBD y TPSA, junto con la clasificación final de la molécula como "activa" o "inactiva" (en el apartado anterior están los detalles de los mismos).

Además, con el fin de apreciar la variedad estructural del conjunto de datos utilizado en el modelo de aprendizaje cuántico, la Figura N° 1 muestra un esquema tridimensional que muestra la disposición de los descriptores molecu-

lares MolWt, LogP y TPSA, distinguiendo entre compuestos "activos" (color azul) e "inactivos" (color naranja).

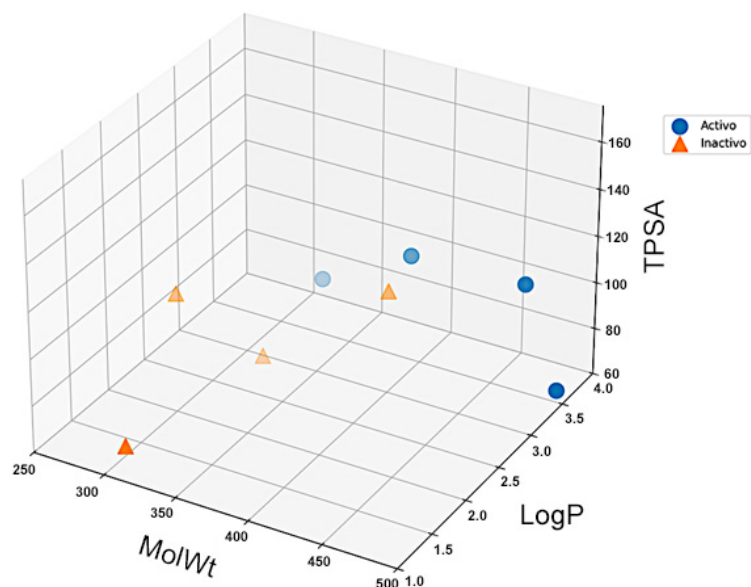
Para el modelo de aprendizaje cuántico fue necesario dividir al azar el conjunto de datos en dos subconjuntos diferentes: un 80 % (es decir, 1523 compuestos) fue asignado al conjunto de entrenamiento, mientras que el 20 % restante (es decir, 381 compuestos) formó parte del conjunto de datos para la validación (se debe tener en cuenta que el conjunto de datos para el entrenamiento se empleó para determinar la matriz del núcleo cuántico, mientras que los de validación se utilizó para valorar el desempeño predictivo del modelo).

Tabla N° 1. Una muestra aleatoria formada por 8 compuestos del conjunto de datos empleados en el trabajo

ID	Fórmula	IC50	pIC50	MolWt	LogP	TPSA	HBD	Actividad
1240	<chem>CC(C)(C)NC(=O)C(=O)[C@H](C[C@@H]1CCNC1=...</chem>	104.0	6.98	599.65	0.96	153.78	4	activo
957	<chem>CC(C)C[C@H](NC(=O)OCc1cccc(C(F)(F)F)c1)...</chem>	16.0	7.80	553.56	1.56	171.13	4	activo
1150	<chem>O=c1c2c(O)c(O)c(O)cc2nc(-c2cccc2)n1c1cccc...</chem>	83.0	7.08	346.34	3.17	95.58	3	activo
1291	<chem>CC(C)[C@@H](Nc1ncnc2[nH]c(3cnn(CC(N)=O...</chem>	242.0	6.62	448.49	2.28	145.86	3	activo
1824	<chem>CC(C)[C@@H](NC(=O)c1cccn1)c1ccc2c(c1)OC...</chem>	99500.0	4.00	312.37	2.98	60.45	1	inactivo
213	<chem>O=c1cc(c2ccc(O)cc2)oc2cc(O)cc(O)c12...</chem>	280800.0	3.55	270.24	2.56	90.9	3	inactivo
1714	<chem>O=C(O)C[C@H](NC(=O)c1cncc2[nH]ccc12)...</chem>	35815.0	4.45	388.22	3.27	95.08	3	inactivo
774	<chem>CC1(C)[C@H](C(=O)OCc2cccc2)N2C(=O)C[...</chem>	50000.0	4.30	323.37	0.86	80.75	0	inactivo

Fuente: Elaboración propia (2025).

Figura N° 1. Distribución tridimensional de los descriptores moleculares de los compuestos seleccionados al azar indicados en la Tabla N° 1, tal que los compuestos “activos” están representados en color azul, y los “inactivos” en naranja

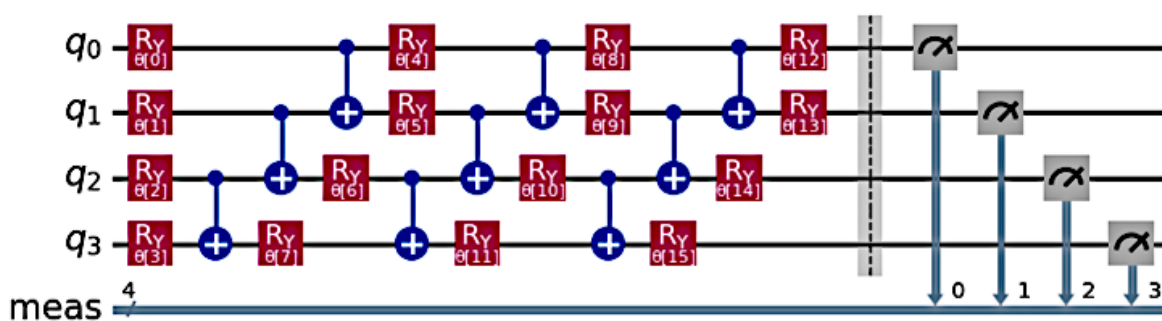


Fuente: Elaboración propia (2025).

El circuito cuántico utilizado en este estudio se muestra en la Figura N° 2. En este circuito, los *qubits* q_0 , q_1 , q_2 y q_3 representan los datos derivados de las variables clásicas, es decir, el coeficiente de partición octanol-agua (LogP), peso molecular (MolWt), área de superficie polar topológica (TPSA) y número de aceptores de puentes de hidrógeno (HBA), respectivamente. La actividad inhibitoria se introduce como un dato experimental.

Figura N° 2. Circuito cuántico empleado para el cálculo de la actividad inhibitoria (ver texto para detalles)

(Gráfico generado con la librería Matplotlib en Python, Hunter 2017)



Fuente: Elaboración propia (2025).



Los rectángulos mostrados en la Figura N° 2 representan puertas lógicas cuánticas, que son operaciones unitarias que modifican el estado de uno o más qubits. Las puertas utilizadas en este circuito se describen brevemente a continuación:

- **Puertas Ry ($R_y(\theta)$)[2]:** rotaciones del *qubit* alrededor del eje Y de la esfera de Bloch, con un ángulo θ (rectángulo de color rojo en la Figura N° 2). El circuito incluye varias de estas puertas aplicadas a *qubits* individuales. Son puertas de un solo *qubit*.

- **Puertas CNOT (Controlled-NOT):** operan sobre dos *qubits*: un *qubit* de control (representado por un punto relleno) y un *qubit* objetivo (representado por un círculo con una cruz). La puerta CNOT invierte el estado del *qubit* objetivo solo si el *qubit* de control está en el estado $|1\rangle$. Si el *qubit* de control está en el estado $|0\rangle$, el estado del *cúbit* objetivo no se modifica. Son puertas de dos *qubits* y son esenciales para generar entrelazamiento cuántico. El circuito incluye varias puertas CNOT que conectan pares de qubits (en color azul).

- **Medición:** los símbolos con forma de medidor al final de cada línea representan el proceso de medición (en color gris claro). Al medir un *qubit*, su estado cuántico colapsa a uno de los estados base (0 o 1), y el resultado de la medición es un bit clásico. En este circuito, los cuatro *qubits* se miden, y los resultados se almacenan en registros clásicos (indicados como 0, 1, 2 y 3).

Finalmente, se logró un porcentaje de predicción del 95 % tras la implementación (0.95). Además, no se consideró el tiempo de cálculo debido a que se está simulando un circuito cuántico y, en consecuencia, los tiempos necesarios para tal computación son considerablemente más largos que los que emplea una computadora cuántica.

Conclusión

El trabajo nos muestra que es factible utilizar un algoritmo cuántico supervisado para predecir la actividad inhibitoria frente al coronavirus. De hecho, de los resultados obtenidos tras entrenar el circuito cuántico con cuatro *qubits* (obtenidos a partir de los descriptores moleculares),

revelan una capacidad predictiva positiva, alcanzando una precisión del 95 % en la clasificación de las moléculas como "activas" o "inactivas". Este análisis inicial señala la habilidad de la computación cuántica para el estudio virtual de fármacos y la identificación de posibles alternativas de tratamiento.

Por último, es crucial destacar que en esta primera aproximación es necesario profundizar en la identificación de los descriptores moleculares más pertinentes para la predicción de la actividad inhibitoria frente al coronavirus. La selección óptima de estas variables de entrada podría mejorar aún más la robustez y la generalización del modelo.

Referencias

Abdolmaleki, A.; Ghasemi JB. y Ghasemi, F. (2017) *Computer Aided Drug Design for Multi-Target Drug Design: SAR /QSAR, Molecular Docking and Pharmacophore Methods*. Curr Drug Targets. 18(5). pp. 556-575. DOI: 10.2174/1389450117666160101120822.

Aires-de-Sousa, J. (2024). GUIDEMOL: A Python graphical user interface for molecular descriptors based on RDKit. Mol Inform. 43(1):e202300190. DOI: 10.1002/minf.202300190.

Alzoubi, YI.; Gill, A. y Mishra, A. (2022). A systematic review of the purposes of Blockchain and fog computing integration: classification and open issues. J Cloud Comput (Heidelberg).11(1). p. 80. DOI: 10.1186/s13677-022-00353-y.

Chen, S.; Cotler, J.; Huang, HY. y Li, J. (2023). The complexity of NISQ. Nat Commun. 14(1):6001. DOI: 10.1038/s41467-023-41217-6.

Das, S.; Zhang, J.; Martina, S. et al., (2023). Quantum pattern recognition on real quantum processing units. Quantum Mach. Intell. 5, 16 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42484-022-00093-x>.

Ding, C.; Bao, TY. y Huang, HL. (2022). Quantum-Inspired Support Vector Machine. IEEE Trans Neural Netw Learn Syst. 33(12). pp. 7210-7222. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3084467.

Dolciemi, D.,; Villasclaras-Fernandez E.,; Kannas, C.; Meniconi, M., Al-Lazikani, B. y Antolin, AA. (2022). canSAR chem-

- istry registration and standardization pipeline. *J Cheminform* 14(1). p. 28. DOI: 10.1186/s13321-022-00606-7.
- Durant, T.; Knight, E.; Nelson, B.; Dudgeon, S.; Lee, S.; Walliman, D.; Young, H.; Ohno-Machado, L. y Schulz, W. (2024). *A primer for quantum computing and its applications to healthcare and biomedical research*. *J Am Med Inform Assoc* 31(8). pp. 1774-1784. DOI: 10.1093/jamia/ocae149.
- Gamble, S. (2019). *Quantum Computing: What It Is, Why We Want It, and How We're Trying to Get It*. In: National Academy of Engineering. *Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering from the 2018 Symposium*. Washington (DC): National Academies Press (US). Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538701/>.
- Heller, S.; McNaught, A.; Stein, S.; Tchekhovskoi, D. y Pletnev, I. (2013). *InChI - the worldwide chemical structure identifier standard*. *J Cheminform.* 24;5(1). p. 7. DOI: 10.1186/1758-2946-5-7.
- Hunter, J. (2007). *Matplotlib: A 2D Graphics Environment*. *Computing in Science & Engineering*. 9(3). pp. 90-95.
- Isea, R.; Mayo, R. y Restrepo, S. (2016) *Reverse Vaccinology in Plasmodium falciparum 3D7*. *J Immunol Tech Infect Dis* 5:3. DOI:10.4172/2329-9541.1000145.
- Isea, R. (2025). *Algoritmo K-NN para la identificación de posibles fármacos contra la COVID-19*.
- Jerbi, S.; Fiderer, L.; Poulsen, H.; Kübler, J.; Briegel, H. y Dunjko, V. (2023). *Quantum machine learning beyond kernel methods*. *Nat Commun.* 14(1). pp. 517. DOI: 10.1038/s41467-023-36159-y.
- John, M.; Schuhmacher, J.; Barkoutsos, P.; Tavernelli, I. y Tacchino, F. (2023) *Optimizing Quantum Classification Algorithms on Classical Benchmark Datasets*. *Entropy (Basel)*. 25(6). p. 860. DOI: 10.3390/e25060860.
- Kavitha, S. y Kaulgud, N. (2022). *Quantum K-means clustering method for detecting heart disease using quantum circuit approach*. *Soft comput.* No. 31. pp. 1-14. DOI: 10.1007/s00500-022-07200-x.
- Lau, B.; Emani, P.; Chapman, J.; Yao, L.; Lam, T.; Merrill, P.; Warrell, J.; Gerstein, M. y Lam, H. (2023). *Insights from incorporating quantum computing into drug design workflows*. *Bioinformatics.* 39(1):btac789. DOI: 10.1093/bioinformatics/btac789.
- Lavecchia, A. y Di Giovanni, C. (2013). *Virtual screening strategies in drug discovery: a critical review*. *Curr Med Chem.* 20(23). pp. 2839-60. DOI:10.2174/09298673113209990001.
- Lee, A.; Lee, K. y Kim, D. (2016). *Using reverse docking for target identification and its applications for drug discovery*. *Expert Opin Drug Discov.* 11(7):707-15. doi: 10.1080/17460441.2016.1190706.
- McClean, J.; Boixo, S.; Smelyanskiy, V.; Babbush, R. y Neven, H. (2018). *Barren plateaus in quantum neural network training landscapes*. *Nat Commun.* 9(1):4812. DOI:10.1038/s41467-018-07090-4.
- Marazqah, E.; Zhou, X.; Gururajan, R.; Chan, K.; Genrich, R. y Sankaran, P. (2023). *A systematic review of literature on credit card cyber fraud detection using machine and deep learning*. *PeerJ Comput Sci.* 9:e1278. DOI: 10.7717/peerj-cs.1278.
- McCaskey, A.; Dumitrescu, E.; Chen, M.; Lyakh, D. y Humble, T. (2018). *Validating quantum-classical programming models with tensor network simulations*. *PLoS One.* Dec 10;13(12):e0206704. DOI: 10.1371/journal.pone.0206704.
- Moradi, S.; Brandner, C.; Spielvogel, C.; Krajnc, D.; Hillmich, S.; Wille, R.; Drexler, W. y Papp, L. (2022). *Clinical data classification with noisy intermediate scale quantum computers*. *Sci Rep.* 12(1):1851. DOI: 10.1038/s41598-022-05971-9.
- Raubitzek S, Mallinger K. (2023). *On the Applicability of Quantum Machine Learning*. *Entropy (Basel)*. 25(7):992. doi: 10.3390/e25070992.
- Razia, I.; Kanwal, A.; Riaz, H.; Malik, A.; Ahsan, M.; Khan, M.; Raza, A.; Sabir, S.; Sajid, Z.; Khan, M.; Tahir, R. y Sehgal, S. (2023). *Recent Trends in Computer-aided Drug Design for Anti-cancer Drug Discovery*. *Curr Top Med Chem.* 23(30). pp. 2844-2862. DOI: 10.2174/0115680266258467231107102643.



Saberikamarposhti, M.; Chua, F.; Abdullah, J.; Yadollahi, M.; Moradi, M.; Ahmadpour, S. (2024). *Post-quantum healthcare: A roadmap for cybersecurity resilience in medical data*. Heliyon. 10(10):e31406. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e31406.

Sertkaya, A.; Beleche, T.; Jessup, A. y Sommers, B. (2024). *Costs of Drug Development and Research and Development Intensity in the US, 2000-2018*. JAMA Netw Open. 7(6):e2415445. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2024.15445.

Singh, D.; Mahadik, A.; Surana, S. y Arora, P. (2022). *Proteo-chemometric Method for pIC50 Prediction of Flaviviridae*. Biomed Res Int. 2022:7901791. DOI:10.1155/2022/7901791.

Thanasilp, S.; Wang, S.; Cerezo, M. y Holmes, Z. (2024). *Exponential concentration in quantum kernel methods*. Nat Commun. 15(1). p. 5200. DOI: 10.1038/s41467-024-49287-w.

Woodman, R. y Mangoni, A. (2023). *A comprehensive review of machine learning algorithms and their application in geriatric medicine: present and future*. Aging Clin Exp Res. 35(11). pp. 2363-2397. DOI: 10.1007/s40520-023-02552-2.



Principios cuánticos para repensar el rol del emprendedor en la estrategia empresarial

Quantum principles for rethinking the entrepreneurial role in business strategy

Edmary Carrasco

Editorial Entrepreneur

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0512-9239>

sinaic@lnuevoentrepreneur.com

Trujillo-Venezuela

Resumen

El propósito de este artículo es presentar un contexto para analizar el rol fundamental del emprendedor en la formulación e implementación de la estrategia empresarial, buscando una nueva perspectiva a través de la aplicación analógica de los principios fundamentales de la física cuántica. Se argumenta que el paradigma newtoniano tradicional limita la comprensión de la complejidad y la dinámica inherente a la acción emprendedora. Así, se propone un marco teórico que establece analogías entre conceptos clave de la física cuántica y las características esenciales del liderazgo y la toma de decisiones estratégicas del emprendedor. El objetivo es ofrecer una nueva perspectiva conceptual que permita una comprensión más profunda del potencial dinámico y la influencia sutil del emprendedor en el éxito estratégico de la organización y su entorno. Para lograr este objetivo, se utilizó una metodología bibliográfica, empleando la hermenéutica para interpretar los textos. El estudio aborda un enfoque hermenéutico sobre las influencias del paradigma newtoniano y los primeros avances de la física cuántica en la estrategia empresarial, proporcionando un resumen de los fundamentos generales de la física cuántica y un análisis de la interpretación de Bohm en relación con el rol del emprendedor. Finalmente, se concluye con un cuadro comparativo entre las ideas fundamentales de la física cuántica y los principios clave del rol emprendedor dentro del paradigma cuántico, contribuyendo así a una nueva perspectiva teórica.

Abstract

The purpose of this article is to present a context for analyzing the fundamental role of the entrepreneur in the formulation and implementation of business strategy, seeking a new understanding through the analogical application of the fundamental principles of quantum physics. It is argued that the traditional Newtonian paradigm limits the understanding of the complexity and dynamics inherent in entrepreneurial action. Thus, a theoretical framework is proposed that establishes analogies between key concepts of quantum physics and the essential characteristics of leadership and strategic decision-making of the entrepreneur. The objective is to offer a new conceptual perspective that enables a deeper understanding of the dynamic potential and subtle influence of the entrepreneur in the strategic success of the organization and its environment. To achieve this objective, a bibliographic methodology was employed, using hermeneutics to interpret the texts. The study addresses a hermeneutic approach to the influences of the Newtonian paradigm and the early advances of quantum physics in business strategy, providing a summary of the general principles of quantum physics and an analysis of Bohm's interpretation in relation to the role of the entrepreneur. Finally, it concludes with a comparative table between the fundamental ideas of quantum physics and the key principles of the entrepreneurial role within the quantum paradigm, thereby contributing to a new theoretical perspective.

Palabras clave:

Emprendedor cuántico; analogía cuántica; nueva perspectiva; rol emprendedor; estrategia empresarial

Keywords:

Quantum entrepreneur; quantum analogy; new perspective; entrepreneurial role; business strategy



Introducción

El rol del emprendedor es esencial en la creación, desarrollo y dirección de la estrategia empresarial, influyendo en el éxito y la sostenibilidad de las organizaciones en un entorno dinámico. Sin embargo, la concepción tradicional de la gestión, profundamente influenciada por el paradigma newtoniano de la física clásica, ve a las organizaciones como sistemas mecanicistas y predecibles, limitando la comprensión de la complejidad de la acción emprendedora y sus diversos roles gerenciales (Pacheco, *et al.*, 2017). A pesar de los avances conceptuales y la introducción temprana de la física cuántica en el ámbito organizacional, el paradigma newtoniano sigue dominando muchas disciplinas que fundamentan las teorías empresariales, lo que restringe la implementación efectiva de innovaciones estratégicas.

La física cuántica ha transformado la comprensión del universo subatómico, ofreciendo principios que proporcionan una visión holística de la complejidad y el potencial de los sistemas organizacionales, especialmente dirigida al rol del emprendedor. Este artículo propone una nueva perspectiva para analizar el papel del emprendedor en la formulación e implementación de estrategias empresariales, utilizando principios cuánticos clave como analogías para comprender la dinámica estratégica, la toma de decisiones y el liderazgo emprendedor. Se argumenta que el paradigma newtoniano es insuficiente para capturar la naturaleza compleja y dinámica de la acción emprendedora, por lo que se presenta un marco teórico que relaciona conceptos cuánticos con las características del emprendedor.

La pregunta central es ¿cómo pueden los principios de la física cuántica, como la superposición, la observación y el entrelazamiento, ofrecer una nueva comprensión del rol del emprendedor en la estrategia empresarial, superando las limitaciones del paradigma newtoniano? El artículo se estructura en varias secciones: primero, se analiza la influencia del paradigma newtoniano en la gestión y la estrategia, seguido de los avances cuánticos aplicados.

Luego, se introducirá un marco teórico que establece analogías entre los principios cuánticos y el rol emprendedor, concluyendo con un cuadro comparativo que sintetiza las ideas fundamentales del paradigma cuántico emergente.

Fundamentación teórica

Influencias del paradigma newtoniano en la estrategia empresarial y los primeros avances de la física cuántica

El siglo XVII fue testigo de los descubrimientos de Isaac Newton, donde el principal fue el fundamentar la física clásica con sus leyes del movimiento y la gravitación universal, plasmadas en su obra *Principia Mathematica* (Sánchez, 2001). Resulta ineludible reconocer la profunda y duradera impronta del paradigma newtoniano en la arquitectura del pensamiento administrativo -particularmente- en el desarrollo temprano de la estrategia empresarial en su enfoque prescriptivo. La revolución científica del siglo XVII liderada por Isaac Newton, no solo transformó la comprensión del universo físico, sino que también proveyó un potente marco metafórico y metodológico que se extendió, con notable influencia, a las nascentes disciplinas de la gestión y la estrategia empresarial. Los principios clave de la física newtoniana como el mecanicismo, el reduccionismo, el determinismo, la causalidad lineal, la objetividad y la separación del observador permearon estas áreas, moldeando la visión de cómo debía formularse la estrategia.

El enfoque mecanicista de Newton, que concebía el universo como una vasta máquina compuesta por partes discretas que interactúan según leyes predecibles y deterministas, influyó en la gestión a finales del siglo XIX y principios del XX con el movimiento de la administración científica liderado por Frederick Winslow Taylor. Su obra principal, *Principios de la Administración Científica* (1911), proponía métodos científicos para optimizar la eficiencia en el trabajo industrial, traducándose en la visión de las empresas como sistemas mecánicos susceptibles de diseño, control y optimización a través de la ingeniería de procesos



y la división del trabajo (Chiavenato y Fuente, 2019). En la estrategia prescriptiva empresarial, este principio se manifestó en la búsqueda de modelos racionales y procesos estructurados para la formulación.

El reduccionismo, otro principio clave heredado de Newton –la creencia de que los sistemas complejos pueden entenderse plenamente analizando sus componentes individuales– fomentó en la gestión la especialización funcional, la fragmentación de tareas y la visión del empleado como una pieza aislada en la maquinaria productiva (Inga, 2014). Figuras como Henri Fayol en Francia y Max Weber en Alemania contribuyeron al desarrollo de la teoría clásica de la administración bajo esta influencia. En el campo de la estrategia, que surgió posteriormente, este principio enfatizó el análisis de las partes de la organización y del entorno de manera separada para luego integrarlas en un plan estratégico, como se observa en los trabajos tempranos. La influencia se extendió al pensamiento de Chandler (1962 citado en Ramón, *et al.*, 2024), quien, al estudiar grandes empresas industriales, contribuyó a la escuela de estrategia de diseño, priorizando un diseño organizacional flexible sobre la planificación rígida, aunque aún dentro de un marco racionalista.

El determinismo newtoniano sembró la idea de que todo evento tiene una causa precedente identificable y que, con suficiente información, el futuro puede ser predicho con exactitud. En la estrategia prescriptiva, esto impulsó la búsqueda de modelos predictivos, la planificación exhaustiva y la creencia en la posibilidad de controlar el entorno a través de análisis racionales. Un hito importante fue la publicación de *Corporate Strategy* en 1965 de H. Igor Ansoff, considerado fundacional en el campo de la estrategia empresarial e impulsor de la escuela de planificación según Pérez y Rojas (2022), donde el rol del emprendedor/directivo se concebía como el de un planificador racional que podía anticipar y moldear el futuro.

La causalidad lineal de la física tradicional –la asunción de relaciones causa-efecto directas y proporcionales– también se observó en las organizaciones, simplificando la comprensión de las interacciones y la respuesta a los

estímulos del mercado, a menudo ignorando la complejidad de las retroalimentaciones y las dinámicas no lineales como apunta (Inga, 2014). En la estrategia prescriptiva, esto llevó a modelos que buscaban relaciones directas entre acciones estratégicas y resultados, con un emprendedor que actuaba como un agente causal directo (Ramón, *et al.*, 2024). Este enfoque alimentó la creencia en una realidad objetiva, independiente del observador. En la gestión, promovió la búsqueda de métricas objetivas y la separación entre el estratega (el observador) y el sistema gestionado. En la década de los 70 y 80, el surgimiento de marcos analíticos como las *Cinco Fuerzas de Porter* (Michael Porter, *Competitive Strategy*, 1980) y la escuela estratégica de posicionamiento reforzaron esta visión, con un emprendedor/analista que evaluaba objetivamente el entorno para posicionar a la empresa de manera óptima.

Todo lo anterior conllevó a la cristalización de las corrientes prescriptivas en el ámbito estratégico: planificación, diseño y posicionamiento. Todas ellas caracterizadas por su objetivo de establecer directrices sobre cómo se debe elaborar una buena estrategia, con un fuerte énfasis en la formulación mediante metodologías formales, analíticas y racionales, donde la mente y la racionalidad del emprendedor como estrategia jugaban roles centrales en la toma de decisiones (Ramón, *et al.*, 2024). En este contexto, la ciencia, la racionalidad y el análisis lógico eran elementos esenciales en la concepción del rol emprendedor estratégico caracterizado por la estrategia intencionada (Mintzberg, 1994).

Sin embargo, aunque la aplicación de los principios newtonianos brindó orden y eficiencia en ciertos contextos, evidenció limitaciones significativas para comprender la naturaleza intrínsecamente compleja y dinámica del emprendimiento. Esta realidad impulsó la evolución de la estrategia empresarial hacia las escuelas descriptivas como apunta Mintzberg, *et al.*, (1999), reconociendo la emergencia y la auto-organización inherentes al emprendimiento, desde las cuales comienzan a vislumbrarse las primeras analogías con la física cuántica.



La influencia emergente de la física cuántica en la estrategia descriptiva: diversas perspectivas

Tras examinar la profunda influencia del paradigma newtoniano en la concepción tradicional de la estrategia, especialmente en sus enfoques prescriptivos, es pertinente investigar cómo las ideas vinculadas a un nuevo paradigma, que guarda ciertos paralelismos con los principios fundamentales de la física cuántica, han comenzado a reflejarse de manera implícita en las diferentes perspectivas de las escuelas descriptivas de la estrategia (Osorio, *et al.*, 2010). Estas son:

- a. Escuelas descriptivas de la estrategia: las escuelas descriptivas, a diferencia de las prescriptivas, buscan dictar cómo se debe formular la estrategia, se centran en comprender cómo la estrategia realmente emerge en la práctica, a menudo en entornos complejos e impredecibles. Sus principales exponentes se agrupan en las escuelas de estrategia: empresarial, cognoscitiva, de aprendizaje, de poder, cultural y ambiental (Mintzberg *et al.*, 1999).
- b. Escuela empresarial o del emprendimiento: esta escuela se centra en la formación de la estrategia en la figura del líder, destacando su intuición, visión y capacidad de innovación (Pérez y Rojas, 2022), se vislumbra una conexión incipiente con la noción cuántica de la influencia del observador, específicamente en su nivel de consciencia intuitiva y creativa.
- c. Escuela cognoscitiva: esta escuela vincula la estrategia a los procesos cognitivos de los estrategas (Aceves, 2004), presentando elementos que resuenan con un paradigma más allá del determinismo lineal. La valoración de la intuición y la influencia de sesgos cognitivos y procesos inconscientes (Kahneman, 2002 citado por Chahin, 2016) introducen complejidad en la toma de decisiones estratégicas, superando la objetividad newtoniana. Además, investigaciones sobre la dimensión individual, tribal y social del emprendedor, como los perfiles hologenéticos (Rudd, 2013), teorías psicológicas (Sabán, 2018) y el Modelo de Desarrollo

Humano Integral (Carrasco, 2014), sugieren una visión más holística del estratega y su impacto en la organización.

- d. Escuela de aprendizaje: dicha escuela comprende la estrategia como un proceso continuo de adaptación y evolución en respuesta a los cambios del entorno, presenta una clara ruptura con la visión lineal tradicional (Corona, 2012, citando a Prahalad y Hamel, 1990 y Teece, *et al.*, 1997). Esta perspectiva dinámica enfatiza y trata de comprender la dificultad de gestionar la incertidumbre y la complejidad de entornos cambiantes, se podría decir que es un reconocimiento implícito de la 'no linealidad' inherente a la dinámica estratégica.
- e. Escuela de poder: esta concibe la estrategia como un proceso de negociación y lucha política entre actores con intereses contrapuestos (Pérez y Rojas, 2022, citando a Pfeffer, 1987; Montoya, 2009; citando a Mintzberg, *et al.*, 1999). Las decisiones tomadas a diferentes niveles del sistema influyen en el comportamiento y la dinámica de todo el conjunto como ocurre en los sistemas anidados.
- f. Escuela cultural: esta escuela describe la estrategia como un proceso social y colectivo moldeado por la interacción de los miembros y la influencia de la cultura organizacional (Carrasco, 2017), presenta una visión de la estrategia como un fenómeno emergente de la compleja red de relaciones, valores y creencias compartidas dentro de la organización. La comunicación y la colaboración se convierten en elementos clave para la 'coherencia' del sistema estratégico.
- g. Escuela ambiental: esta escuela está influenciada por la teoría de la contingencia, entiende la estrategia como un proceso reactivo de adaptación al entorno (Mintzberg, *et al.*, 1999). Aunque, ha sido objeto de críticas por su enfoque dogmático, se reconoce su contribución al destacar el impacto de las acciones a distancia, mostrando que pequeñas acciones pueden ser suficientes para causar grandes daños al planeta.



Las escuelas descriptivas adoptan una perspectiva empírica de la estrategia, denominada por Mintzberg como “estrategia realizada” (Mintzberg, *et al.*, 1999). Consideran al emprendedor un agente activo en la formación estratégica, entendiendo la estrategia como un proceso adaptativo que surge e influye en los modelos mentales, marcos de referencia y conocimientos rutinizados de los estrategias (Montoya, 2009). Aunque no usan explícitamente el lenguaje de la física cuántica, estas escuelas abordan conceptos como la complejidad, la interconexión, la influencia del observador y la ‘no linealidad’, anticipando un paradigma holístico para comprender el papel del emprendedor en la dinámica estratégica.

La influencia emergente de la física cuántica en la estrategia integrativa

La escuela integrativa surge buscando armonizar las contribuciones de las escuelas prescriptivas y descriptivas, proponiendo un modelo dinámico de formación estratégica. Su única escuela hasta el momento, ha sido la de configuración, con Mintzberg como su principal exponente (referenciado en Montoya, 2009).

La escuela de la configuración introduce la idea de la estrategia como un proceso continuo que oscila entre el caos y la estructura, donde el rol del estratega es restablecer la estabilidad organizacional seleccionando la configuración estratégica más adecuada (plan, patrón, posición, perspectiva y pauta). Influenciada por la ciencia de la complejidad se busca entender mejor a la organización como un sistema biológico, vivo y consciente (Zohar, 2022), llamados en la literatura como “sistemas adaptativos complejos” (CADs) y caracterizados como holísticos. En esta perspectiva, el rol del emprendedor es visto como multifacético, ya que, debe desempeñar diferentes roles a lo largo del ciclo de vida de la estrategia general de la empresa, análogo al ciclo de vida evolutivo humano (Montoya, 2009; Leiva, 2013).

Fundamentos generales de la física cuántica

Para explorar la analogía entre la física cuántica y la estrategia empresarial, es fundamental entender los principios básicos de esta disciplina a partir sus conceptos básicos como la reinterpretación de materia y vacío, la superposición cuántica, el entrelazamiento entre otros conceptos.

La reinterpretación de materia y vacío

Max Planck fue fundador de la teoría cuántica en 1900 e impulsó un cambio de paradigma, al demostrar que la energía se emite en paquetes discretos o ‘cuantos’, desafiando la continuidad de la física clásica y explicando fenómenos como el efecto fotoeléctrico y la radiación térmica (Sánchez, 2001). A partir de sus descubrimientos, la mecánica cuántica reveló que el vacío no está desprovisto de actividad, sino lleno de fluctuaciones donde surgen y desaparecen partículas virtuales, mostrando que la materia interactúa permanentemente con los campos cuánticos (Sánchez, 2001).

El hallazgo de que los átomos están compuestos principalmente de espacio vacío evidenció una fisura en la física newtoniana. Este ‘vacío cuántico’ no es un vacío absoluto, sino un campo de energía latente (Arntz, *et al.*, 2006). Según Zohar (2022), todo en el universo, incluidos los seres humanos y sus relaciones, puede entenderse como ondas de energía contenidas en un campo fundamental.

Así, se ha reemplazado la visión materialista del universo por una comprensión basada en cuantos, de energía, unidad irreducible de la existencia hasta el momento. Esta perspectiva ha transformado la comprensión filosófica del ser humano como entidad energética, impactando la forma en que se vive, se trabaja y gestionan las organizaciones (Zohar, 2022). Desde el paradigma cuántico, las personas en las organizaciones son vistas como ondas dinámicas de energía vinculadas al vacío cuántico, lo que invita a replantear el propósito empresarial.



La superposición cuántica: la dualidad onda/partícula

La superposición cuántica, principio fundamental de la mecánica cuántica, sostiene que un sistema físico puede existir simultáneamente en todos sus posibles estados, colapsando en uno de ellos al ser medido. Este fenómeno se manifiesta en propiedades como la posición, el *spin* o la energía, siendo uno de los fenómenos más conocidos la dualidad onda/partícula (Arntz, *et al.*, 2006).

Al estudiar partículas elementales, los científicos descubrieron su naturaleza dual: pueden comportarse como ondas o partículas según el tipo de observación. Para la interpretación clásica de la física cuántica, mientras las ondas no tienen ubicación precisa, las partículas colapsan en un punto definido solo al ser medidas (Sánchez, 2001). La observación, por tanto, determina el estado final del sistema. Este comportamiento, ajeno a la experiencia macroscópica, desafía la física newtoniana, donde se asume que las propiedades existen independientemente del observador. Para ilustrarlo, Schrödinger propuso en 1935 el famoso experimento mental del "gato de Schrödinger", mientras que experimentos como el de doble rendija han permitido evidenciar la superposición de manera visible gracias a los avances tecnológicos.

La interpretación de la superposición ha sido fuente de debates, especialmente en torno al llamado "colapso por el proceso de la medida" dentro de la interpretación de Copenhague. Esta controversia impulsó el desarrollo de diversas interpretaciones de la mecánica cuántica. En este contexto, Albert Einstein, aunque crítico de la naturaleza probabilística de la teoría, realizó importantes aportes. Su explicación del efecto fotoeléctrico, que le valió el Premio Nobel de Física en 1921, junto a sus trabajos sobre la dualidad onda/partícula y el movimiento browniano, sentaron bases esenciales para la física cuántica moderna.

Entrelazamiento, saltos cuánticos y la no localidad

Al estudiar el átomo, los científicos descubrieron que los electrones no se desplazan de manera continua entre órbitas, sino que realizan "saltos cuánticos", desapareciendo

de un lugar y apareciendo en otro, fenómeno que Einstein denominó "acción fantasmal a distancia". Además, no es posible predecir exactamente dónde o cuándo ocurrirá un salto. Este comportamiento, fundamental para fenómenos como la teletransportación cuántica, ha sido explorado experimentalmente por Anton Zeilinger, Premio Nobel de Física 2022 según Castañeda (2022), quien demostró el entrelazamiento cuántico a grandes distancias. Desde los años noventa, Zeilinger (2010) ha investigado la transmisión de información mediante partículas luminosas entrelazadas, destacando el teletransporte de dos fotones a través del Danubio utilizando los dispositivos 'Alice' y 'Bob'.

La reinterpretación de los conceptos materia y vacío, la superposición y el entrelazamiento cuántico son pilares de tecnologías emergentes como la computación, comunicación y criptografía cuánticas. Sin embargo, su naturaleza contraintuitiva y probabilística ha dado lugar a diversas interpretaciones y corrientes de pensamiento dominante, como: la interpretación de Copenhague, el principio del realismo local de Einstein, el principio del realismo no local de Bohm (Sánchez, 2001) y otras menos dominantes como interpretación de muchos mundos (o Universos Múltiples) propuesta por Hugh Everett III.

Interpretaciones y pensamientos dominantes de la física cuántica

La interpretación de Copenhague: énfasis en la probabilidad

Una de las interpretaciones cuánticas más antiguas e influyentes es la interpretación de Copenhague (formulada en 1927 por Bohr, junto a Born y Heisenberg), la cual enfatiza el papel del observador en el colapso de la función de onda. Sostiene que la física cuántica describe probabilidades de ubicación de un electrón, conocida como la ecuación de onda de Schrödinger (Arntz, *et al.*, 2006), no realidades definitivas y establece que la realidad cuántica solo se define al realizar una medición (Sánchez, 2001).



Esta interpretación se fundamenta en el principio de la incertidumbre formulado por Werner Heisenberg en 1927, la cual establece que es imposible determinar, simultáneamente y con precisión arbitraria, ciertos pares combinados de variables físicas. Si se mide, o se enfoca en la posición, el momento se vuelve borroso e indeterminado; si en cambio se mide el momento, entonces la posición elude al observador. Lo mismo ocurre con todos los demás pares complementarios de propiedades que las partículas pueden poseer: ondas y partículas, energía y tiempo, o continuidad y discontinuidad. Fijar la atención en cualquier propiedad de cualquier par siempre hace que la otra propiedad se vuelva borrosa e indeterminada (Zohar, 2022). En la física clásica, todos los atributos de un objeto, incluida su posición y velocidad, pueden medirse con precisión, solo limitada por la tecnología.

La interpretación de las variables ocultas de Einstein: el principio del realismo local

Por su parte, Einstein se inclinaba hacia la idea de las variables ocultas locales, arraigada en su profunda convicción del “realismo local”, un principio que sostiene dos ideas fundamentales. Por un lado, el realismo, el cual es la creencia de que el universo existe objetivamente, con propiedades definidas independientemente de la observación. Y, por otro lado, la localidad, la idea de que las influencias no pueden viajar más rápido que la velocidad de la luz, lo que significa que los objetos distantes no pueden influirse instantáneamente entre sí (Sánchez, 2001).

En 1935, Einstein, junto con Boris Podolsky y Nathan Rosen, publicó un artículo que presentaba la paradoja EPR (Castañeda, 2022). Este experimento mental buscaba resaltar lo que Einstein consideraba una contradicción inherente a la mecánica cuántica, específicamente en el fenómeno del entrelazamiento cuántico, desafiando así la validez de la interpretación probabilística de la ecuación de Schrödinger y reforzando su argumento a favor de las variables ocultas locales. Sin embargo, experimentos posteriores demostraron la no localidad.

La interpretación de Bohm: el principio del realismo no local

En 1950, David Bohm propuso una interpretación alternativa de la mecánica cuántica basada en el realismo no local (Bohm, 1952), en contraste con el realismo local de Einstein, Podolsky y Rosen y la interpretación clásica de Copenhague. Bohm sostuvo la existencia de una realidad objetiva independiente del observador, pero aceptó la presencia de correlaciones instantáneas entre partículas, sin importar la distancia. Influenciado por Einstein y De Broglie, reinterpretó el principio de incertidumbre postulando “variables ocultas” y definió el “potencial cuántico” como guía de las trayectorias de las partículas, manteniendo una visión determinista y objetiva.

Posteriormente, introdujo los conceptos de “orden implícito” y “orden explícito” para describir una realidad profundamente interconectada (Sánchez, 2001). Esta perspectiva desafió la visión clásica de un universo de objetos separados, proponiendo un todo indivisible. En 1980, Alain Aspect, Premio Nobel 2022 según Castañeda (2022) proporcionó evidencias experimentales que confirmaron la no localidad propuesta por Bohm, tras la violación de las desigualdades de Bell. Hoy, las correlaciones no locales cuánticas explican fenómenos como la comunicación colectiva, la sincronización animal e, incluso, reportes anecdóticos de telepatía y precognición. Además, sustentan tecnologías emergentes como la computación, la criptografía y la teletransportación cuántica.

Actualmente, la interpretación de Bohm emerge como una de las principales teorías en la literatura científica de física cuántica (Castañeda, 2022) junto con la de Copenhague. Aunque ambas coinciden en sus predicciones experimentales, difieren profundamente en sus implicaciones filosóficas respecto al realismo, el determinismo y el papel del observador y la consciencia, manteniendo vivo el debate en torno a la naturaleza última de la realidad.

Metodología

Este estudio se fundamentó en una revisión bibliográfica con enfoque cualitativo, empleando métodos como el



hermenéutico, el análisis de contenido y el analítico-sintético. Estos métodos permitieron examinar, interpretar y comparar diversas fuentes bibliográficas, incluyendo artículos científicos, libros y otras fuentes consultadas en bases de datos digitales, con el objetivo de explorar la aplicación analógica de los fundamentos de la física cuántica (específicamente la interpretación de David Bohm) para una nueva comprensión del rol del emprendedor en la estrategia empresarial.

El método hermenéutico se aplicó para la interpretación reflexiva y contextualizada de los conceptos clave de la física cuántica, las teorías de la gestión y la estrategia, y los estudios sobre el emprendimiento, buscando identificar puntos de conexión conceptual y construir analogías significativas entre estos dominios. El análisis de contenido se utilizó para la extracción y sistematización de los conceptos fundamentales de la física cuántica (según la interpretación de Bohm) y las características esenciales del rol del emprendedor en la estrategia. Este proceso facilitó la identificación de posibles analogías entre ambos campos.

Finalmente, el método analítico-sintético se empleó para el estudio del pensamiento estratégico y sus escuelas, incluyendo sus orígenes, características y críticas, permitiendo profundizar en diversos temas y generar una nueva perspectiva teórica basada en la aplicación analógica de la física cuántica al rol del emprendedor. Los hallazgos de este análisis se aplicaron en la base teórica para la discusión y contrastación de distintos puntos de vista, considerando el contexto interno y externo de la estrategia empresarial y su relación con el potencial dinámico del emprendedor. La síntesis de las analogías y la nueva comprensión se presentará en un cuadro comparativo.

Análisis y discusión

Esta sección se adentra en el núcleo del presente estudio, presentando una exploración detallada de la interpretación de la física cuántica propuesta por David Bohm y su potencial para ofrecer una nueva comprensión del rol del emprendedor en la estrategia empresarial. Se expon-

drán los principios fundamentales de la interpretación de Bohm, contrastándolos brevemente con la perspectiva de Copenhague, para luego establecer analogías significativas con aspectos clave de la acción emprendedora en el contexto estratégico. El análisis se centrará en cómo estas analogías permiten la emergencia de una nueva perspectiva que trasciende las limitaciones del paradigma newtoniano.

Presentación detallada de la interpretación de David Bohm

La interpretación de David Bohm, también conocida como la teoría de la onda piloto o la mecánica bohmiana (Castañeda, 2022), constituye una interpretación ontológica de la mecánica cuántica que busca superar las paradojas y la aparente indeterminación inherente a la interpretación de Copenhague, la visión más ortodoxa de la mecánica cuántica y también propone un tipo diferente de determinismo, un determinismo no local guiado por la onda cuántica, en contraste con el determinismo local basado en fuerzas de la mecánica clásica (Bohm, 1952). Sus principios clave son:

Ontología de partículas y ondas: a diferencia de la interpretación de Copenhague, que a menudo describe a las partículas como entidades que pueden manifestarse como ondas o partículas dependiendo del acto de medición, la interpretación de Bohm postula la existencia simultánea y objetiva de partículas con trayectorias bien definidas, guiadas por una onda cuántica real llamada “onda piloto”, descrita por la función de onda ψ que evoluciona según la ecuación de Schrödinger. Para Bohm, las partículas tienen posiciones definidas en todo momento, y su movimiento está determinado por la onda piloto, que guía el movimiento de las partículas. Esta onda piloto existe incluso cuando no se está realizando una medición.

Estado de superposición: de esta manera, Bohm explica que cuando un sistema se encuentra en un estado de superposición (por ejemplo, un electrón pasando simultáneamente por ambas rendijas en el experimento de la do-



ble rendija), lo que se experimenta es la existencia real de una onda piloto compleja que interactúa con la partícula y atraviesa ambas rendijas simultáneamente. La partícula en sí sigue una trayectoria definida, influenciada por esta onda piloto.

Potencial cuántico: un concepto central para entender la teoría de Bohm es el potencial cuántico (Q), llamado también potencial de información, derivado de la función de onda como una entidad física real (Bohm, 1952). Se podría decir que, es una consecuencia de la forma de la onda piloto (específicamente de la curvatura de su amplitud) y es lo que causa las desviaciones del movimiento clásico, introduciendo los efectos cuánticos como la interferencia y el entrelazamiento. Este potencial actúa sobre la trayectoria de las partículas, una vez procesada la información, influyendo en su movimiento guiada por la onda piloto.

La no localidad: una característica crucial del potencial cuántico es su naturaleza no local (Bohm, 1952). La función de onda es una entidad que existe en el espacio de configuración (un espacio de $3N$ dimensiones para N partículas), y su influencia sobre una partícula puede depender instantáneamente de la posición de otras partículas de ese mismo espacio de configuración (sistema al que pertenece), incluso si están muy alejadas. Esto introduce una conexión no local entre las partículas. Se resalta que su influencia no disminuye con la distancia, lo que permite la correlación instantánea entre partículas entrelazadas (aquellas del mismo sistema), sin violar la relatividad a nivel ontológico (aunque las señales no pueden transmitirse más rápido que la luz). Por eso, se afirma que el potencial cuántico depende de la forma de la onda (patrón), no de su magnitud, lo que implica que incluso ondas de baja intensidad pueden ejercer una influencia significativa.

Función de la medición: la medición en la interpretación bohmiana se ve como una revelación, no como una creación. En otras palabras, para Bohm, la medición no 'colapsa' la función de onda en el sentido de la interpretación de Copenhague. En cambio, el proceso de medición simplemente revela cuál de las trayectorias posibles estaba siguiendo la partícula, influenciada por la onda piloto

(Bohm, 1952). El aparato de medición interactúa con la onda piloto del sistema, haciendo que una de las posibilidades se manifieste en el resultado observado.

Orden implicado/explicado: Bohm, como físico teórico busca restaurar el determinismo y proporcionar una descripción más completa de la realidad cuántica proponiendo la idea del "orden implicado y el orden explicado" (Castañeda, 2022). Bohm explica que el orden implicado es un nivel de realidad profundo, fundamental e invisible, donde está el vacío mismo. Bohm observa el vacío como un océano infinito de energía del que se puede extraer todo su potencial cuántico, cuya manifestación se cristaliza en la forma, es decir, en la materia a lo que llama el orden explicado. En otras palabras, la realidad que se percibe, caracterizada por la separación e individualidad de los objetos (orden explicado), es una manifestación o 'proyección' de este orden implicado (Bohm, 1980).

Para Bohm, el universo en su nivel más profundo (el orden implicado) no está compuesto de entidades separadas, sino que es una totalidad indivisible e interconectada. Todo lo que existe, desde las partículas subatómicas hasta las galaxias, está intrínsecamente relacionado por la energía sutil que existe en ella. El orden implicado no es un mero almacén pasivo de potencialidad, sino una fuente de información activa que guía la manifestación de la realidad en el orden explicado. La onda piloto guía y transporta esta información activa, informando a las partículas de su sistema sobre su entorno y las condiciones que influyen en su comportamiento; y el mundo revelado (el orden explicado) resulta del condicionamiento de los instrumentos de medición, los niveles de conciencia del observador, entre otros condicionamientos.

Holomovimiento: a la dinámica de campos cuánticos, la información que oscila entre el orden implicado y explicado y viceversa, lo llamó holomovimiento, es decir, un flujo constante de información entre el orden implicado y explicado, lo invisible y lo visible, un proceso constante de plegarse y desplegarse.

Pensamiento holístico en la Física de Bohm: este reconoció las limitaciones inherentes a las fórmulas mate-

máticas, considerándolas aproximaciones de la física a un nivel particular de la realidad del todo. Sugirió la necesidad de desarrollar una visión holística del universo para una comprensión más profunda de su naturaleza dinámica y en constante evolución (Zohar, 2022). De allí que, algunos físicos como Zeilinger (2007) consideren que, si la física está considerando sacar una teoría del todo, ha llegado el momento de explorar las conexiones entre la física cuántica y la mística.

En 2007, Zeilinger propone un encuentro con el Dalai Lama para abordar temas acerca de la naturaleza de la realidad, la conciencia, la interdependencia y la complementariedad (QuantemPhysik, 2007). Estos temas reflejan el interés común en explorar las conexiones entre la física cuántica y la filosofía budista, buscando una comprensión más profunda de la realidad y nuestro lugar en ella.

A partir de esta visión holística que propone la física cuántica, se han desarrollado teorías en el último siglo dentro de diferentes disciplinas que la avalan como: la psicología de Jung y su noción del inconsciente colectivo, la consciencia social dentro de la sociología de Hagelin, la hipótesis de la causalidad formativa y los campos mórficos de Sheldrake en biología, la teoría ecológica de Gaia propuesta por Lovelock, la aparición de nuevas disciplinas integradoras como la economía conductual impulsada por Simon, la dinámica espiral de Graves, la perspectiva integrativa de la estrategia de Mintzberg (Arntz, *et al.*, 2007; Mintzberg, *et al.*, 1999; Zohar, 2022).

Por lo tanto, el holismo cuántico sostiene que el todo es más primario que cualquiera de las partes que lo constituyen. Un holista siempre mira las cosas o sistemas en conjunto, y sabe que cualquier verdadera comprensión de ellos se basa en la comprensión de las relaciones entre ellos. Esto tiene implicaciones de gran alcance para cómo se entiende, en primer lugar, a los emprendedores como sistema individual, luego a la organización y su equipo como sistema tribal y, finalmente, a las organizaciones y su entorno como sistema social.

Analogía del barco/avión de Bohm: para entender los elementos clave de la interpretación bohmiana, y cómo

la onda piloto guía a las partículas sin necesariamente "empujarlas" con fuerza, Bohm utiliza la analogía del barco/avión con piloto automático (Bohm, 1980). Señala que un barco o avión (el cuerpo de la partícula) con piloto automático (brújula o GPS) tiene su propia fuente de energía (su motor, su combustible). No necesita una fuerza externa constante para moverse. Puede mantenerse en movimiento por sí mismo. El piloto automático (brújula o GPS) recibe información sobre el entorno a través de ondas de radar (onda piloto). Estas ondas de radar no empujan el barco o el avión directamente. Su función principal es transmitir información sobre la ubicación de otros objetos, la dirección del viento, la altitud, etc. La forma en que el barco o el avión actúa luego de decodificar la información (su dirección, su velocidad, si debe girar o ascender) está determinada por el contenido de la información que recibe de las ondas de radar. El piloto automático procesa esta información y luego utiliza la propia energía del barco o avión para ajustar su movimiento de acuerdo con esa información, ese es su potencial cuántico. La intensidad de las ondas de radar no es lo que importa para la dirección del barco o avión. Incluso ondas de radar débiles pueden transmitir información precisa sobre el entorno. Lo importante es el patrón de configuración de las ondas (su forma), la información codificada en ellas, no su fuerza bruta.

Diferencias de la interpretación de Bohm con la interpretación de Copenhague

Una de las diferencias más significativas entre la interpretación de Bohm y la de Copenhague radica en sus fundamentos ontológicos (Bohm, 1980). Mientras que Bohm propone una realidad cuántica objetiva y determinista, donde las partículas siguen trayectorias definidas guiadas por una onda piloto física, la interpretación de Copenhague adopta una postura más instrumentalista, enfocándose en las probabilidades de los resultados de las mediciones y siendo menos explícita sobre la naturaleza de la realidad cuántica cuando no se observa. Esta distinción ontológica es crucial para la presente investigación, ya que la visión de una realidad subyacente definida, como la que propone Bohm, permite establecer analogías más directas



con la intencionalidad y el “ser” del emprendedor como fundamentos de la realidad organizacional que emerge.

La interpretación de Bohm se diferencia fundamentalmente de la interpretación de Copenhague en varios aspectos clave:

Determinismo vs. indeterminismo: mientras que la interpretación de Copenhague abraza un cierto grado de indeterminismo fundamental en la naturaleza, la interpretación de Bohm es inherentemente determinista a nivel ontológico. Dada la posición inicial de las partículas y la función de onda, su evolución futura está completamente determinada por las ecuaciones de movimiento de Bohm. La apariencia de probabilidad surge de la falta de conocimiento preciso de las condiciones iniciales que pueda tener el observador.

Realismo vs. instrumentalismo: la interpretación de Bohm es realista, postulando la existencia objetiva de partículas y ondas, independientemente del acto de medición. En contraste, la interpretación de Copenhague a menudo se considera instrumentalista, donde la función de onda se ve más como una herramienta para calcular probabilidades de resultados de mediciones.

Realidad objetiva subyacente vs. rol de la medición: Bohm creía que existe una realidad objetiva y definida en el nivel cuántico, incluso antes de la medición. Para él, las partículas (como electrones) son entidades reales con posiciones definidas en todo momento. En la interpretación de Bohm, la medición es simplemente una interacción física más entre el sistema cuántico y el aparato de medición, donde la función de onda del sistema compuesto evoluciona de acuerdo con la ecuación de Schrödinger, y las partículas siguen trayectorias definidas. A diferencia de la visión de Copenhague donde las propiedades no están bien definidas hasta que se miden. En la interpretación de Copenhague, el acto de medición juega un papel crucial en el “colapso” de la función de onda, llevando al sistema a un estado definido.

La consciencia como epifenómeno de la actividad cerebral vs. fenómeno central: en la interpretación de Bohm,

el nivel de consciencia del observador es crucial para transitar del “orden implicado al orden explicado”, actuando la consciencia como un “piloto automático” que interpreta la realidad según su nivel de percepción. En contraste, la interpretación de Copenhague también reconoce la importancia del observador, especialmente en el colapso de la función de onda, donde la medición y observación determinan el estado final del sistema cuántico. Sin embargo, a diferencia de Bohm, la consciencia en esta interpretación no es vista como un agente causal directo en la creación de la realidad física, sino más bien como un epifenómeno, un subproducto de la actividad cerebral, sin un papel fundamental en la estructura subyacente del universo.

Fundamentos cuánticos de la interpretación de Bohm para una nueva comprensión del rol emprendedor en la estrategia empresarial

A continuación, se exploran analogías entre los principios clave de la interpretación cuántica de Bohm y aspectos fundamentales del rol del emprendedor en la estrategia empresarial, buscando la emergencia de una nueva comprensión.

La ontología de partículas/ondas con trayectorias definidas y autoorganizadas análoga a la trayectoria emprendedora

Principio de Bohm: las partículas tienen trayectorias definidas, aunque influenciadas por la onda piloto.

Analogía con el rol emprendedor: el emprendedor, al igual que una partícula, tiene una trayectoria definida (estrategias de preferencia a su personalidad), influenciada por el condicionamiento personal, social y ambiental (onda piloto). Si bien el entorno (análogo a la función de onda) presenta múltiples caminos potenciales, la acción emprendedora (análoga a la trayectoria de la partícula) sigue un curso auto-organizado en cada momento, influenciada o condicionada por la información enviada por la ‘onda piloto’. La onda piloto está cargada de una información que servirá para guiar el movimiento de la partícula.



Nueva comprensión: la estrategia emprendedora (su trayectoria) no es puramente aleatoria, sino que emerge de una intención y un ser emprendedor definidos, aunque influenciada por la información y la dinámica del entorno. Existe una trayectoria de acción definida por el emprendedor, intrínsecamente ligada al contexto de posibilidades que se le presenta, una cantidad de información a la espera de ser decodificada.

Estado de superposición análogo a la personalidad e identidad flexible para la adaptabilidad emprendedora

Principio de Bohm: en un estado de superposición la onda puede atravesar múltiples caminos simultáneamente, mientras que la partícula en sí siempre sigue una trayectoria definida, influenciada en su movimiento por una onda piloto.

Analogía con el rol emprendedor: análogamente, podríamos considerar la personalidad o el ser del emprendedor como una entidad central, el ser, con una trayectoria individual, única y auténtica, definida por sus valores fundamentales, sus talentos inherentes y su esencia individual, parecido a la partícula. Esta "partícula" emprendedora se mueve a través del "espacio de configuración" del mundo laboral/empresarial de acuerdo a su identidad. La identidad del emprendedor filtra el código de información del entorno enviado por la onda piloto y decide su dirección. Por lo que la identidad puede entenderse como una entidad más compleja y multifacética al estilo de la onda, influenciada por diversos factores que lo condicionan a actuar (muchas veces alejado de su ser), como su cultura, sus creencias, sus experiencias y la percepción que tiene él de sí mismo y de los demás.

Nueva comprensión: la trayectoria del emprendedor se nutre tanto de una rica gama de habilidades innatas, como por su identidad multifacética y adaptativa donde se interpreta a sí mismo y al entorno. En esta oscilación constante entre su personalidad más auténtica y la identidad que guía al emprendedor para adaptarse, puede observarse su dinámica interior. Comprender la interacción positiva

entre el ser fundamental y la identidad adaptativa puede ofrecer una visión más rica de cómo los emprendedores navegan la incertidumbre y aprovechan las oportunidades, reconociendo la influencia sutil pero poderosa de su identidad en la manifestación de su potencial emprendedor más auténtico.

La información activa revelada de acuerdo a los niveles de consciencia de la identidad del emprendedor

Principio de Bohm: este introdujo la idea de la "información activa" como un principio fundamental de su teoría. Explica que la onda piloto (función de onda) no solo guía la partícula de manera mecánica, sino que también transporta "información activa" desde el orden implicado hacia la partícula. Esta información es decodificada por el piloto automático quien decidirá el nuevo rumbo que tendrá la partícula.

Analogía con el rol emprendedor: podemos establecer una analogía de la "información activa" como aquella información (datos externos, evaluación interna, intereses personales, motivación) que el emprendedor procesa desde su identidad, antes de tomar una decisión. Esa información pasará por los filtros de consciencia del emprendedor, es allí donde será procesada y desde donde se tendrá una manifestación (orden explicado). De acuerdo a Zohar (2022) los descubrimientos de la física cuántica han colocado la conciencia y la intención humana directamente en el centro, no solo de cómo funciona el universo, sino incluso de lo que llega a existir o explicarse de él.

Nueva comprensión: las decisiones del emprendedor son informadas y transformadas a través de sus procesos cognitivos, intuitivos y emocionales, que dan forma a la acción estratégica. El emprendedor toma decisiones en función de la información que recibe y procesa. Para procesar la información activa que le llega utiliza los filtros de consciencia que forman parte de su identidad (la mente, su intuición y las emociones). Estos filtros de consciencia influyen en la claridad (o no) que el emprendedor tenga al momento de tomar decisiones. La integración de la con-





ciencia en la toma de decisiones, ofrece una perspectiva que va más allá de los modelos puramente racionales y mecanicistas al reconocer la influencia sutil pero poderosa de la intuición y los niveles más profundos de conciencia. Al igual que el observador cuántico participa en la creación de la realidad subatómica, el emprendedor consciente participa activamente en la co-creación de la realidad organizacional.

La autonomía energética de la partícula análoga a la automotivación del emprendedor

Principio de Bohm: en la interpretación de Bohm, la onda piloto guía a la partícula, pero no la impulsa con una fuerza externa constante. La partícula posee su propia fuente intrínseca de energía, análoga al motor o al combustible inherente a un barco. Su movimiento no depende de un empuje externo continuo, sino que puede sostenerse por sí mismo.

Analogía con el rol del emprendedor: de manera análoga, el emprendedor posee una fuente interna de motivación, intrínsecamente ligada a su cuerpo, muchas veces inconsciente, es allí donde están sus pasiones, valores y propósito. Esta automotivación actúa como el motor que lo impulsa a concebir y desarrollar empresas en áreas que resuenan con sus intereses más profundos. A diferencia de la necesidad de una fuerza externa constante, esta energía interna sostiene su impulso creativo y su perseverancia frente a los desafíos.

Nueva comprensión: el emprendedor posee su fuente intrínseca de energía, análoga al combustible inherente a un barco. Su movimiento no depende de un empuje externo continuo. Muchas veces se cree que el emprendedor debe motivarse desde afuera, las políticas que incentivan los financiamientos a un tipo de proyectos y a otros no, el sistema educativo que prioriza un tipo de carrera sobre otro, el salario que beneficia un tipo de trabajo y otro no demuestra que el sistema se organiza con este pensamiento. Sin embargo, si el emprendedor no está automotivado, su motivación externa dura lo que dura el incentivo.

El potencial cuántico análogo a la visión y el campo intencional proyectado del emprendedor

Principio de Bohm: el potencial cuántico (Q) es un campo de información que influencia y guía el movimiento de las partículas, una vez procesada la información enviada por la onda radar. Depende de la forma de la onda y actúa de manera no local.

Analogía con el rol emprendedor: el potencial cuántico puede ser análogo a la visión estratégica y el campo intencional proyectado por el emprendedor, una vez analizado su entorno y pasado por sus filtros de consciencia. La visión del emprendedor, aunque intangible, guía la trayectoria de la organización, las decisiones estratégicas y los valores de las personas sobre las que impacta. Su influencia puede ser no local, afectando diferentes partes del sistema y su entorno de manera aparentemente instantánea a través de la comunicación y la cultura.

Nueva comprensión: esta analogía sugiere que la visión del emprendedor crea un campo de intencionalidad que guía la organización. Es la consecuencia tangible de su interpretación del entorno, de sí mismo y de sus posibilidades. La visión del emprendedor puede verse como potencialidades que surgen de la intuición, la racionalidad y el sentir del emprendedor hacia lo que está creando.

La no localidad análoga a la interconexión y la influencia sistémica sutil

Principio de Bohm: el potencial cuántico permite la conexión instantánea entre partículas entrelazadas, independientemente de la distancia.

Analogía con el rol emprendedor: en los ecosistemas emprendedores, existe una compleja red de interconexiones entre la organización, sus socios, competidores, clientes, inversores, sociedad y naturaleza. La no-localidad puede ser análoga a la influencia sutil e instantánea que puede ejercer el emprendedor sobre estas redes, donde las acciones pueden tener repercusiones inesperadas y rápidas en otros agentes del sistema, incluso sin una conexión causal directa aparente.



Nueva comprensión: las acciones del emprendedor tienen repercusiones rápidas e inesperadas en el ecosistema, a menudo de manera no lineal o inmediatamente evidentes. La creación de una organización no debe verse como un acto aislado, sino como la manifestación de una intención dentro de un campo más amplio de interconexiones (sociales, económicas, ambientales, incluso 'energéticas' en un sentido metafórico). El emprendedor y su organización están intrínsecamente ligados a su entorno y a las consecuencias de sus acciones en múltiples niveles.

Entrelazamiento de sistemas anidados análogo a las redes organizacionales

Principio de Bohm: para Bohm, todo lo que existe, desde las partículas subatómicas hasta las galaxias, están organizados en sistemas anidados e interconectados.

Analogía con el rol emprendedor: la visión holística de Bohm encuentra un paralelismo en la comprensión de las organizaciones como sistemas dentro de sistemas. El emprendedor ya representa un sistema complejo, luego, cada empresa creada por un individuo tiene su propio sistema complejo, la cual pertenece a un sistema organizacional mayor, que a su vez están anidados en sistemas sociales y ambientales aún más amplios. El emprendedor está en una mejor posición gerencial si se hace consciente de este sistema autoorganizado y su posición en él.

Nueva comprensión: las redes organizacionales y sus actores comparten intereses comunes, así como condicionamientos similares, una conexión que no está limitada por la distancia o las fronteras. El emprendedor actúa como un punto de influencia dentro del sistema sin importar el tamaño de su organización o su jerarquía.

Orden implicado/explicado análogo a la manifestación del ser diferenciador en las estrategias realizadas

Principio de Bohm: la realidad que se percibe, caracterizada por la materialidad, separación e individualidad de

los objetos (orden explicado), es una manifestación, proyección o intención del orden implicado.

Analogía con el rol emprendedor: la distinción ontológica fundamental en la interpretación de Bohm entre el orden implicado y el orden explicado ofrece una perspectiva valiosa para comprender la dinámica entre la estrategia intencionada y la estrategia realizada. El orden implicado puede ser análogo al vasto potencial no manifestado del emprendedor, pero determinado por sus condiciones genéticas, su personalidad y su inconsciente, a las ideas latentes, a las capacidades y a la visión profunda del emprendedor, existiendo en un nivel subyacente de interconexión con su propio ser y con el entorno. El orden explicado, por otro lado, representa la empresa concreta que emerge, la estrategia formulada y realizada, los productos y servicios ofrecidos, siendo la manifestación tangible y observable de ese potencial subyacente. La trayectoria de la empresa, desde su concepción hasta su evolución, puede entenderse como un despliegue continuo del orden implicado del emprendedor en el orden explicado del mundo empresarial, un proceso dinámico donde la identidad y las aspiraciones del emprendedor se proyectan.

Nueva comprensión: la estrategia surge como Emanación Diferenciadora del Ser Emprendedor. Al comprender que sus empresas, productos y servicios son manifestaciones concretas de un "orden implicado" único – tejido con sus convicciones más profundas, su visión idiosincrásica y su particular forma de interactuar con el mundo – la estrategia empresarial emerge no solo como un ejercicio racional, sino como una proyección creativa y diferenciadora del propio emprendedor. La autoconciencia de este potencial subyacente actúa como una brújula interna, guiando la formulación de una estrategia de valor que no solo es auténtica y duradera, sino inherentemente distintiva y difícilmente replicable, al estar profundamente arraigada en la individualidad del fundador. Esta conexión intrínseca entre el ser del emprendedor y la estrategia empresarial se convierte así en la fuente primaria de su ventaja competitiva y su diferenciación en el mercado.





El holomovimiento análogo a la dinámica estratégica de oscilación entre el caos y la estructura

Principio de Bohm: este propuso el 'holomovimiento' como la dinámica constante de flujo e interconexión entre el orden implicado y explicado, donde la información y la energía se transforman continuamente.

Analogía con el rol emprendedor: la formación/implementación de la estrategia puede verse como un 'holomovimiento' organizacional, un flujo constante entre las intenciones y la visión profunda del emprendedor (análogo al orden implicado) y su manifestación en planes y acciones concretas (análogo al orden explicado). En este proceso, la información y la energía del emprendedor (su conocimiento, pasión, etc.) se transforman continuamente en la realidad de la empresa. La organización, como un holograma, contiene en cada parte información sobre la visión y los valores del emprendedor.

Nueva comprensión: esta analogía ofrece una visión dinámica de la estrategia, no como un plan estático, sino como un proceso continuo de despliegue y repliegue entre la visión del emprendedor y la realidad organizacional. Reconoce la potencialidad inherente al emprendedor ("océano de energía" del orden implicado) de la que se extrae la estrategia (las decisiones y acciones del emprendedor) dando lugar a manifestaciones específicas. Se podría decir que el emprendedor vive en una constante dinámica entre la intención y la adaptación, entre el caos y la estructura a medida que idea, desarrolla y crece empresas.

El pensamiento holístico cuántico análogo con el sentido de propósito del emprendedor

Principio de Bohm: para Bohm, el universo en su nivel más profundo (el orden implicado) no está compuesto de entidades separadas, sino que es una totalidad indivisible e interconectada.

Analogía con el rol emprendedor: en la visión holística de Bohm se encuentra un paralelismo en la comprensión de las organizaciones como sistemas complejos, anidados

y entrelazados. Para sintonizar con el 'todo' organizacional y su entorno más amplio, el emprendedor debe primero cultivar una profunda alineación interna, discerniendo el sentido trascendente que impulsa la creación de su empresa, más allá de la mera acumulación de valor económico. El acto de descubrir y potenciar las auténticas necesidades de servicio que el emprendedor identifica y busca satisfacer dentro de su comunidad actúa como un catalizador, liberando la sabiduría auto-organizativa inherente al sistema. Este sistema, impulsado por un propósito genuino y una comprensión sistémica, se torna naturalmente más resiliente, adaptable y orientado hacia la sostenibilidad y un crecimiento inteligente.

Nueva comprensión: la nueva comprensión radica en ver la creación de organizaciones virtuosas no solo como la implementación de estrategias, sino como un proceso de profunda alineación entre el emprendedor y la estructura organizacional. Esto sugiere que las decisiones del emprendedor, influenciadas por su sentido de propósito, generan un impacto que trasciende lo económico, transformando su entorno personal, familiar, social, e incluso planetario, resaltando la importancia de la reflexión trascendental en la gestión estratégica.

A través de estas analogías, la interpretación de David Bohm ofrece una nueva perspectiva conceptual para comprender el rol del emprendedor en la estrategia empresarial.

Conclusión

En el desarrollo del paradigma estratégico se distinguen tres momentos clave. El primero corresponde a las propuestas prescriptivas de la estrategia, profundamente influenciadas por el pensamiento mecanicista de la física newtoniana. El segundo momento refleja el surgimiento de enfoques descriptivos, que incorporan los primeros antecedentes de la física cuántica en el pensamiento administrativo. Finalmente, el tercer momento emerge a partir de la crítica de Mintzberg, quien cuestiona las formas convencionales de formulación estratégica y propone una visión más dinámica, holística y adaptativa de la estrategia.

Las diferencias entre las interpretaciones de Bohm y de Copenhague en la física cuántica revelan distinciones ontológicas y epistemológicas fundamentales. Mientras Bohm propone una visión determinista y realista donde la consciencia y la observación tienen un papel estructurante en la configuración de la realidad -con claras aplicaciones en el campo de la estrategia organizacional y el rol activo del emprendedor-, la interpretación de Copenhague ofrece un enfoque probabilístico, relegando la consciencia a un fenómeno secundario. Estas diferencias filosóficas abren nuevas posibilidades para el análisis estratégico.

El análisis de la interpretación de Bohm revela paralelismos conceptuales valiosos con el comportamiento emprendedor dentro del paradigma cuántico. Su visión de una realidad subyacente y estructurada, determinada por trayectorias guiadas, ofrece una analogía poderosa: así como las partículas siguen un potencial cuántico, los emprendedores, a través de su intención y visión, modelan la emergencia de nuevas realidades organizacionales. A través del cuadro comparativo propuesto, se busca ofrecer una perspectiva holística que ilumine las dinámicas de toma de decisiones y creación de valor en contextos de alta incertidumbre.

Tabla N° 1. Fundamentos cuánticos para comprender el rol emprendedor en la estrategia empresarial

Principio de la física cuántica (Interpretación de Bohm)	Principio básico del rol emprendedor (Paradigma cuántico analógico)	Nueva comprensión para el emprendedor
1. Ontología de partículas/ondas con trayectorias definidas	Trayectoria emprendedora predeterminista y autoorganizada a la vez	La estrategia emprendedora no es puramente aleatoria, sino que emerge de una intención y un ser emprendedor definidos, aunque influenciada por la información y la dinámica del entorno.
2. Estado de superposición	Personalidad e identidad flexible emprendedora	La trayectoria del emprendedor se nutre tanto de una rica gama de habilidades innatas, como por su identidad multifacética y adaptativa.
3. Información activa revelada	Las decisiones pasan por el filtro de consciencia del emprendedor	Las decisiones del emprendedor son informadas y transformadas a través de sus procesos cognitivos, intuitivos y emocionales, que dan forma a la acción estratégica.
4. Autonomía energética de las partículas	Automotivación intrínseca al emprendedor	El emprendedor posee su fuente intrínseca de energía, análoga al combustible inherente a un barco. Su movimiento no depende de un empuje externo continuo.
5. Potencial cuántico	La visión proyecta el campo de posibilidades e intención del emprendedor	La visión del emprendedor crea un campo de intencionalidad que guía la organización. Es la consecuencia tangible de su interpretación del entorno, de sí mismo y de sus posibilidades.
6. No localidad	Interconexión e influencia sistémica sutil	Las acciones del emprendedor tienen repercusiones rápidas e inesperadas en el ecosistema, a menudo de manera no lineal o inmediatamente evidentes.
7. Entrelazamiento de sistemas anidados	El emprendedor como Nodo de Coinfluencia en las redes organizacionales	Las redes organizacionales y sus actores comparten intereses comunes, así como condicionamientos similares, una conexión que no está limitada por la distancia o las fronteras. El emprendedor actúa como un punto de influencia dentro del sistema sin importar el tamaño de su organización o su jerarquía.



8. Orden implicado/ explicado	La Estrategia como manifestación	Las estrategias implementadas y la estructura organizacional son expresiones tangibles de la mentalidad, los valores y el potencial subyacente del emprendedor, quien está intrínsecamente ligado a su empresa.
9. El holomovimiento	Dinámica estratégica de oscilación entre el caos y la estructura	La formulación e implementación de la estrategia es un proceso dinámico y continuo, un flujo entre la visión abstracta del emprendedor y su manifestación concreta en la organización, navegando entre el caos y la estructura.
10. El pensamiento holístico cuántico	El propósito trascendente del emprendedor crea valor integral en las organizaciones	La creación de organizaciones virtuosas requiere un proceso de profunda alineación entre el propósito del emprendedor y las acciones de la empresa, con un impacto energético que trasciende lo económico, afectando múltiples niveles y requiriendo reflexión trascendental.

Fuente: Elaboración propia (2025).

Este trabajo ofrece una nueva perspectiva dentro de la teoría del emprendimiento y la gestión estratégica al integrar principios fundamentales de la Física cuántica, especialmente las interpretaciones de Bohm, con los procesos emprendedores. Al explorar, cómo los principios cuánticos de indeterminación, observación y consciencia pueden reflejarse en la toma de decisiones empresariales, este estudio enriquece la comprensión de la dinámica organizacional, subrayando la importancia del rol del emprendedor en la creación y transformación de realidades organizacionales. Esta integración de teorías ofrece un marco conceptual innovador que puede impulsar la investigación en la intersección entre física cuántica, la psicología, la estrategia empresarial y el emprendimiento.

Una limitación significativa de este estudio radica en su naturaleza teórica y bibliográfica, pues las analogías entre la Física cuántica y los principios del emprendimiento, aunque sugerentes, no están basadas en investigaciones empíricas directas. La transposición de conceptos cuánticos a un contexto organizacional podría estar sujeta a interpretaciones diversas, lo que limita la generalización de las conclusiones.

Finalmente, las futuras investigaciones podrían expandir esta perspectiva cuántica del emprendimiento mediante estudios de caso que examinen cómo los emprendedores toman decisiones en contextos de alta incertidumbre y

complejidad, particularmente en mercados emergentes o industrias disruptivas como la computación cuántica. Además, sería valioso desarrollar modelos más detallados que integren los principios cuánticos con las teorías clásicas del emprendimiento y la gestión estratégica, para explorar la aplicabilidad práctica de estas ideas en la formulación de estrategias empresariales. Asimismo, se sugiere investigar cómo los conceptos cuánticos pueden influir en el comportamiento organizacional y en la creación de valor, abriendo nuevas rutas para el estudio de la innovación y la estrategia empresarial.

Referencias

- Aceves, V. (2004). *Dirección estratégica*. México: McGraw-Hill.
- Arntz, L. y Chasse, R. (2007). *¿Y tú qué sabes? Descubriendo las infinitas posibilidades para modificar nuestra realidad cotidiana*. Argentina: Editorial Kier.
- Bohm, D. (1952). *Una interpretación sugerida de la teoría cuántica en términos de variables "ocultas" I*. *Physical Review*, 85(2). pp. 166-179.
- Bohm, D. (1980). *Wholeness and the implicate order*. Routledge.
- Carrasco, E. (2014). *Desarrollo humano integral como*



marco ético de la innovación empresarial en Latinoamérica. *Revista Ágora*, 17(34). pp.37-58.

Carrasco, E. (2017). *De cultura innovadora a innovación: Una travesía que requiere del mejor esfuerzo físico y emocional del empresario para alcanzar la cima de la innovación*. España: Editorial Académica Española.

Castañeda, R. (2022). *A propósito del premio Nobel de Física 2022: ¿comprender la naturaleza es asunto de la razón, de la intuición o de la tecnología?* *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(181). pp. 899-901. Disponible en: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1788>.

Chahin, T. (2016). *El impacto de los trabajos de Daniel Kahneman en la Administración*. *Ciencias Administrativas*, 4(7). pp. 1-10. Disponible en: <https://revistas.unlp.edu.ar/CADM/article/view/2500>.

Chiavenato, I. y Fuente, C. (2019). *Introducción a la teoría general de la administración* (10.ª ed.). México: McGraw-Hill.

Corona, M. (2012). *Desarrollo de pensamiento estratégico en la escuela de negocios*. *Contaduría y Administración*, 57(1). pp. 103-122. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S018610422012000100006&script=sci_abstract

Inga, M. (2014). *De la física clásica a la mecánica cuántica: De la administración tradicional al management moderno*. Universidad Continental, 4(1).

Leiva, J. (2013). *PYMES: Ciclo de vida y etapas de su desarrollo*. *Tec Empresarial*, 1(1). pp. 38-42.

Mintzberg, H. (1994). *La caída y el auge de la planificación estratégica*. The Free Press.

Mintzberg, H.; Ahlstrand, B. y Lampel, J. (1999). *Safari a la estrategia*. Ediciones Granica S. A.

Montoya, I. (2009). *La formación de la estrategia en Mintzberg y las posibilidades de su aportación para el futuro*. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 17(2). pp. 23-44. Disponible en: <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfce/article/view/4438>.

Osorio, F.; Gálvez, E. y Murillo, G. (2010). *La estrategia y el emprendedor: Diversas perspectivas para el análisis*. *Cuadernos de Administración*, (43). Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-46452010000100006.

Pacheco, Y.; Molina, Y. y Arévalo, J. (2017). *Los roles gerenciales de Mintzberg: Una evidencia empírica en la universidad*. *I+D Revista de Investigaciones*, 10(2). pp. 102-111. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/331535783_Los_rols_gerenciales_de_Mintzberg_una_evidencia_empirica_en_la_universidad.

Pérez, B. y Rojas, C. (2022). *Aproximación a las escuelas de pensamiento estratégico y su evolución a la estrategia empresarial*. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, 28(4). pp. 157-179. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8703837>.

QuantemPhysik. (2007). *The Dalai Lama and quantum physics* (2007). Disponible en: [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=U43pXuGhEg8>.

Ramón, R.; Verdezoto, M. y Romero, D. (2024). *Estrategia empresarial: Una reflexión teórica*. *Revista de Ciencias Sociales*, 30(3). pp. 411-424.

Rudd, R. (2013). *Las claves genéticas: La nueva interpretación del I Ching y la decodificación de tu propósito de vida oculto en tu ADN*. Gaia Ediciones.

Sabán, M. (2018). *La cábala: La psicología del misticismo judío*. Editorial Kairós.

Sánchez, J. (2001). *Historia de la física cuántica*. Editorial Crítica.

Zeilinger, A. (2010). *The dance of the photons: From Einstein to quantum teleportation*. Farrar, Straus and Giroux.

Zohar, D. (2022). *Zero distance: Management in the quantum age*. Palgrave Macmillan.





Entrelazando conceptos en el aula: materia y propiedad una estrategia innovadora para la enseñanza

Interweaving concepts in the classroom: matter and property an innovative teaching strategy

Miguel Meza

Universidad de Carabobo

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7227-3692>

mmeza3@uc.edu.ve

Carabobo-Venezuela

Juan Rodríguez

Universidad de Carabobo

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5788-5075>

blackneal23@gmail.com

Carabobo-Venezuela

Resumen

Este enfoque pedagógico innovador propone fusionar la enseñanza tradicional de la materia y sus propiedades con los principios fundamentales de la ciencia cuántica. La estrategia busca trascender la visión clásica y presentar a los estudiantes una comprensión más profunda y rica de la realidad a nivel subatómico. Al explorar cómo las partículas cuánticas exhiben comportamientos como la superposición y el entrelazamiento, se pueden ofrecer analogías y modelos que iluminen las propiedades macroscópicas de la materia de una manera novedosa y estimulante. La integración de conceptos cuánticos no pretende una inmersión profunda en la matemática compleja de la Física cuántica, sino más bien utilizar sus ideas centrales como herramientas conceptuales para fomentar la curiosidad y el pensamiento crítico. Se busca que los estudiantes comprendan que las propiedades que observamos a nivel macro tienen su origen en el comportamiento peculiar de las partículas que componen la materia. Esta perspectiva puede revitalizar la enseñanza de temas como la estructura atómica, los enlaces químicos y las propiedades de los materiales, ofreciendo una visión más fundamental y conectada del mundo físico. Al entrelazar estos conceptos, se espera cultivar una apreciación más profunda por la naturaleza intrínsecamente cuántica de la realidad y despertar el interés por la ciencia en general. Bajo la línea de investigación; estado de la materia. Con una metodología eficaz de revisión documental.

Abstract

This innovative pedagogical approach proposes to merge the traditional teaching of the subject and its properties with the fundamental principles of quantum science. The strategy seeks to transcend the classical view and present students with a deeper and richer understanding of reality at the subatomic level. By exploring how quantum particles exhibit behaviors such as superposition and entanglement, analogies and models can be offered that illuminate the macroscopic properties of matter in a novel and stimulating way. The integration of quantum concepts is not intended for a deep dive into the complex mathematics of quantum physics, but rather to use its core ideas as conceptual tools to foster curiosity and critical thinking. The aim is for students to understand that the properties we observe at the macro level have their origin in the peculiar behavior of the particles that make up matter. This perspective can reinvigorate the teaching of topics such as atomic structure, chemical bonds, and the properties of materials, offering a more fundamental and connected view of the physical world. By "interweaving" these concepts, it is hoped to cultivate a deeper appreciation for the intrinsically quantum nature of reality and spark interest in science in general. Under the line of research; State of the matter. With an effective document review methodology.

Palabras clave:

Entrelazando; cuántica; propiedades; enseñanza; innovadora

Keywords:

Entanglement; quantum; properties; teaching; innovative



La materia y sus propiedades

Si observamos a nuestro alrededor vamos a notar que el mundo cambia continuamente, de manera que la materia que lo conforma también cambia. La materia no se crea ni se destruye solo se transforma. Esta conocida frase resume la naturaleza cambiante de la materia, por ejemplo el agua involucrada en el ciclo hidrológico cambia su estado conforme transcurre el ciclo, sin embargo sigue siendo agua. Otro ejemplo es la digestión, en este proceso el cuerpo humano transforma los alimentos en energía que necesitamos para vivir.

Es por ello, las diferentes transformaciones que puede sufrir la materia se clasifican en cambios físicos y cambios químicos. El ciclo hidrológico del agua como un ejemplo de cambio físico, en tanto, la digestión es un ejemplo de cambio químico. Los cambios físicos son aquellos donde la composición de la materia no cambia, de manera que afecta únicamente su forma, volumen, tamaño o posición. Los cambios físicos más conocidos como; dilatación, el aumento del volumen de una porción de materia por acción del incremento de la temperatura, la contracción, la disminución del volumen de un material como consecuencia de la disminución de la temperatura, los cambios de estado, son cambios que sufre la materia al pasar de un estado de agregación a otro.

Asimismo, la evaporización, cambio del estado líquido al estado gaseoso, condensación, paso del estado gaseoso al estado líquido, la fusión, cambio del estado sólido al estado líquido, solidificación, paso del estado líquido al estado sólido, sublimación, cambio del estado sólido al gaseoso sin pasar por el estado líquido, sublimación inversa o deposición: es el cambio del estado gaseoso al sólido sin pasar por el líquido.

Cabe destacar, que los estados de la materia, sólido, líquido y gaseoso, representan manifestaciones fascinantes de como se organiza y comporta la materia a nivel molecular. Cada estado posee características distintivas en cuanto a la disposición y movimiento de sus partículas, lo que determina sus propiedades macroscópicas como

la forma y el volumen. El estado sólido, con sus partículas rígidamente unidas, exhibe una forma y volumen definidos. En contraste, el estado líquido adopta la forma de su recipiente manteniendo un volumen constante, gracias a la mayor libertad de movimiento de sus moléculas. Finalmente, el estado gaseoso se expande para llenar cualquier recipiente, reflejando la casi total independencia de sus partículas. Esta diversidad de estados es fundamental para comprender el mundo que nos rodea, desde la estructura de los materiales hasta los fenómenos atmosféricos.

Asimismo, los cambios físicos y químicos representan las dos maneras principales en que la materia puede transformarse. Los cambios físicos alteran la apariencia de una sustancia, como su forma o estado, pero no modifican su composición química intrínseca. Un ejemplo claro es la fusión del hielo en agua líquida o la evaporación del agua en vapor; en ambos casos, la sustancia sigue siendo agua. Por otro lado, los cambios químicos implican la ruptura y formación de nuevos enlaces entre átomos, dando origen a sustancias con propiedades diferentes. La combustión de la madera, la oxidación de un metal o la cocción de un huevo son ejemplos de transformaciones químicas donde la composición de la materia se altera de manera fundamental.

Así pues, la distinción entre cambios físicos y químicos es crucial para la química y otras ciencias naturales. Comprender si una transformación altera la identidad de una sustancia o simplemente su forma física nos permite predecir y controlar una amplia gama de procesos. Desde la síntesis de nuevos materiales con propiedades específicas hasta la comprensión de las reacciones biológicas que sustentan la vida, el conocimiento de los estados de la materia y sus posibles cambios es una herramienta poderosa para la exploración y la innovación.





Cambios físicos, cambios marinos

El aumento del nivel del mar en la Antártida, producto del deshielo, refiere un ejemplo de cambio físico de la materia. La fotosíntesis es un ejemplo de cambio químico. Los jugos son un ejemplo de cambio físico. A diferencia de otras sustancias, el agua se dilata al convertirse en hielo. Los termómetros funcionan gracias a la dilatación y contracción del material que contienen en su interior, generalmente mercurio. Cuando el bulbo del termómetro entra en contacto con el agua caliente, el mercurio se dilata y asciende por el tubo indicándonos la temperatura.

En cambio, si colocamos el termómetro en el hielo observaremos como el líquido del termómetro se contrae y desciende por el tubo hasta marcar una temperatura menor a 0 °C. La evaporización, la fusión y la sublimación son cambios físicos que necesitan de energía, por ello se los denomina procesos endotérmicos. Por ejemplo, para evaporar el agua de una olla es necesario calentarla, el calor proveniente de la llama es la energía que provoca el cambio de estado.

En tanto, la condensación, la solidificación y la sublimación inversa son cambios donde se libera energía y se los conoce como procesos exotérmicos. Por ejemplo, al colocar agua en un refrigerador se forma el hielo debido a que el agua líquida pierde calor (se enfría) y se solidifica.

En otro orden de ideas, las mezclas como sistemas materiales homogéneos o heterogéneos formados por uno o más componentes que no reaccionan entre sí, por lo cual no hay una transformación en la composición química de los mismos. De ello que, la deformación es el cambio de forma que sufre la materia al ser sometida a una fuerza, un ejemplo de ello es la plastilina, la cual cambia de forma cuando le aplicamos fuerza con nuestras manos. Por su parte, la fragmentación es la división de un material en partes más pequeñas, por ejemplo, cuando se pica en trozos una fruta. Además, el movimiento es el cambio de posición de un cuerpo en un tiempo determinado, ejemplo de este tipo de cambio es el lanzamiento de una pelota.

Por lo tanto, los cambios físicos y marinos de la materia son procesos fascinantes que moldean constantemente nuestro planeta. Desde la evaporación del agua de mar que se eleva para formar nubes hasta la erosión de las costas rocosas por la implacable acción de las olas, son fenómenos que demuestran la naturaleza dinámica de los materiales que componen nuestro mundo. La comprensión de estos cambios para diversas disciplinas, desde la oceanografía y la meteorología hasta la ingeniería costera y la gestión de recursos naturales, es fundamental. Observar cómo la salinidad del océano afecta la densidad del agua o cómo las corrientes marinas transportan calor alrededor del globo revela la intrincada danza de la materia en sus diversas formas.

En otro orden, en el ámbito marino, los cambios físicos adquieren una relevancia particular debido a la vasta extensión de los océanos y su papel fundamental en la regulación del clima global. La fusión del hielo polar, por ejemplo, no solo altera el nivel del mar, sino que también influye en la circulación termohalina, un motor clave de las corrientes oceánicas. Asimismo, los cambios de temperatura del agua afectan la solubilidad de los gases, como el dióxido de carbono, con profundas implicaciones para la acidificación de los océanos y la vida marina. Estos procesos interconectados subrayan la sensibilidad de los ecosistemas marinos a las alteraciones físicas.

Es preciso señalar, que el estudio de los cambios físicos y marinos de la materia nos proporciona una visión más profunda de los procesos naturales que dan forma a nuestro planeta. Al comprender las leyes que rigen estos cambios, podemos anticipar mejor sus efectos y desarrollar estrategias para mitigar los impactos negativos de las actividades humanas. La investigación continua en esta área es esencial para abordar desafíos globales como el cambio climático y la conservación de los ecosistemas marinos, asegurando un futuro sostenible para las generaciones venideras.

Didácticas para la enseñanza y el aprendizaje de Física

Giacosa, Giorgi, Concarila (2015), implementaron experiencias con integración de estrategias didácticas clásicas y recursos tecnológicos con el fin de incentivar el interés de los estudiantes por conocer y hacer física. Se sostiene que el diseño y realización de actividades que favorezcan la observación, la elaboración de conjeturas, la especulación teórica, el registro organizado de información, la interpretación de distintos fenómenos y la aplicación de conocimientos a situaciones nuevas, permite desarrollar habilidades cognitivas y fomentar la capacidad de análisis crítico.

Asimismo, se sostiene que la resolución de problemas, mediante el modelo que reproduce procedimientos propios de la investigación científica, como uno de los medios más valiosos para propiciar aprendizajes significativos. La sociedad contemporánea plantea nuevas demandas y necesidades a las instituciones educativas. Desde la perspectiva del currículum de Física esto supone la incorporación de una dimensión tecnológica que atraviesa la disciplina y que se sustenta en la necesidad de desarrollar en los estudiantes las competencias necesarias que les permitan interactuar con las tecnologías de la información y la comunicación e integrarlas positivamente, como un recurso cultural más, para nuevos aprendizajes.

Es así como, se anhela que la sencillez y fácil reproducción de las actividades presentadas, así como también la posibilidad de utilizar recursos de acceso libre, promueva su implementación en las aulas universitarias. Si algunos de los ejemplos que aquí se mostraron pudieran hacer comprender a los docentes de Física que es posible involucrar a sus estudiantes en actividades que reflejen el carácter de aventura apasionante, de tarea abierta y creativa de la ciencia experimental, el propósito de este trabajo estaría cumplido.

A su vez, la enseñanza y el aprendizaje de la Física a nivel del sistema educativo demandan un enfoque didáctico que trascienda la mera transmisión de información. Las estrategias deben fomentar la comprensión profun-

da, el desarrollo del pensamiento crítico y la capacidad de aplicar los conceptos a situaciones novedosas. Un enfoque centrado en el estudiante, que promueva la participación activa y la construcción del conocimiento a través de la indagación y la experimentación, resulta fundamental. Esto implica alejarse de modelos puramente expositivos y adoptar metodologías que involucren al estudiante en el proceso de aprendizaje, convirtiéndolo en un protagonista activo en la adquisición de los principios físicos.

Así pues, la integración de diversas estrategias didácticas puede enriquecer significativamente la experiencia de aprendizaje en Física universitaria. Por ejemplo, el aprendizaje basado en problemas desafía a los estudiantes a aplicar sus conocimientos para resolver situaciones complejas y realistas, fortaleciendo su capacidad de análisis y síntesis. Las simulaciones interactivas permiten visualizar fenómenos abstractos y experimentar con diferentes variables de manera segura y controlada, facilitando la comprensión intuitiva de conceptos difíciles. Asimismo, el trabajo colaborativo en proyectos fomenta el desarrollo de habilidades de comunicación, argumentación y trabajo en equipo, esenciales en la práctica científica. La incorporación de herramientas tecnológicas, como plataformas virtuales y software especializado, puede ampliar el acceso a recursos, facilitar la retroalimentación y personalizar el aprendizaje.

En su lugar, la efectividad de la enseñanza de la Física radica en la combinación inteligente y flexible de diversas estrategias didácticas que atiendan a los diferentes estilos de aprendizaje y promuevan la construcción activa del conocimiento. La clave reside en crear un ambiente de aprendizaje estimulante, donde la curiosidad sea la fuerza motriz y los estudiantes se sientan empoderados para explorar, cuestionar y aplicar los principios fundamentales de la Física en la comprensión del mundo que les rodea. La evaluación, por su parte, debe ir más allá de la memorización y enfocarse en la comprensión conceptual y la capacidad de resolución de problemas.



Conclusión

El estudio de los estados de la materia, desde el sólido firme hasta el gas etéreo, nos revela la asombrosa versatilidad del universo que habitamos. Cada estado, con sus propiedades macroscópicas distintivas, es en realidad una manifestación de la intrincada danza de sus partículas constituyentes a nivel microscópico. Las fuerzas intermoleculares, la energía cinética y la disposición espacial de estas partículas son los directores de esta sinfonía de la materia, dictando si una sustancia se presenta como un cristal ordenado o un fluido caótico.

Por lo tanto, como la fusión del hielo o la evaporación del agua, nos demuestran la naturaleza dinámica de la materia. Aunque su apariencia cambie, la identidad química de la sustancia permanece intacta. Estos procesos son impulsados por la adición o sustracción de energía, que altera la intensidad de las vibraciones y los movimientos de las moléculas, superando o debilitando las fuerzas que las mantienen unidas en un estado particular.

Por otro lado, los cambios químicos nos introducen a un nivel de transformación más profundo. La formación de nuevas sustancias con propiedades radicalmente diferentes, como la combustión de la madera o la oxidación del hierro, implica la ruptura y la formación de enlaces químicos entre los átomos. Estos procesos alteran la composición misma de la materia, revelando la capacidad de los elementos para combinarse y recombinarse en una miríada de compuestos.

Por consiguiente, esta es la frontera de lo infinitamente pequeño donde la ciencia cuántica nos ofrece una perspectiva aún más reveladora sobre la naturaleza fundamental de la materia. A nivel atómico y subatómico, las partículas no se comportan como pequeñas esferas sólidas, sino más bien como ondas de probabilidad. Sus energías están cuantizadas, lo que significa que solo pueden existir en niveles discretos. Este entendimiento cuántico subyace a la comprensión de los enlaces químicos, las interacciones intermoleculares y, en última instancia, las propiedades macroscópicas de los estados de la materia.

En razón, a la dualidad onda-partícula, el principio de incertidumbre y el entrelazamiento cuántico son conceptos que desafían nuestra intuición clásica, pero que son esenciales para explicar el comportamiento de la materia en su nivel más fundamental. La forma en que los electrones se organizan alrededor de los núcleos atómicos, determinando la reactividad química de un elemento, es un fenómeno inherentemente cuántico. Incluso las fuerzas que mantienen unidos los átomos en las moléculas tienen su origen en las interacciones cuánticas.

Así mismo, la exploración de los estados de la materia y sus transformaciones, desde la perspectiva macroscópica hasta la cuántica, nos ofrece una visión profunda de la naturaleza interconectada y dinámica del universo. Comprender estos principios no solo es fundamental para la ciencia y la tecnología, sino que también alimenta nuestra curiosidad sobre los bloques de construcción fundamentales de la realidad que nos rodea, revelando la danza sutil y poderosa que da forma a todo lo que experimentamos.

Cabe destacar, el fascinante y a menudo contraintuitivo reino de la Física cuántica, donde las estrategias y didácticas tradicionales de enseñanza a menudo se quedan cortas. La naturaleza inherentemente abstracta y probabilística de los fenómenos cuánticos exige un replanteamiento fundamental de cómo introducimos y exploramos estos conceptos con los estudiantes. Ya no basta con la mera transmisión de fórmulas y la resolución de problemas clásicos; se requiere un enfoque que fomente la intuición conceptual y la comprensión profunda de las ideas subyacentes.

En este sentido, la reflexión se centra en la necesidad de incorporar visualizaciones y analogías cuidadosamente seleccionadas. Si bien el mundo cuántico opera bajo reglas distintas a las de nuestra experiencia cotidiana, el uso de modelos visuales, simulaciones interactivas y analogías con sistemas macroscópicos familiares (siempre con las debidas advertencias sobre sus limitaciones) puede servir como un puente inicial hacia la comprensión. Estas herra-



mientas permiten a los estudiantes construir representaciones mentales, aunque imperfectas, de conceptos como la superposición, el entrelazamiento y la cuantización.

Además, la enseñanza de la Física cuántica debe hacer hincapié en el desarrollo del pensamiento crítico y la interpretación de resultados probabilísticos. A diferencia de la Física clásica, donde las predicciones son deterministas, la mecánica cuántica nos habla de probabilidades y distribuciones. Esto requiere que los estudiantes desarrollen la capacidad de analizar datos experimentales, comprender la incertidumbre inherente a las mediciones y formular interpretaciones coherentes dentro del marco probabilístico de la teoría.

Por su parte, la integración de la historia y la filosofía de la ciencia cuántica también juega un papel fundamental. Explorar el desarrollo histórico de las ideas cuánticas, los debates y las controversias que las rodearon y las implicaciones filosóficas sobre la naturaleza de la realidad puede humanizar la ciencia y hacerla más accesible e interesante para los estudiantes. Comprender cómo los científicos llegaron a estas ideas revolucionarias puede inspirar la curiosidad y fomentar una apreciación más profunda de la naturaleza evolutiva del conocimiento científico.

En este contexto, las metodologías activas de aprendizaje, como el aprendizaje basado en problemas, el trabajo colaborativo y la indagación guiada, se vuelven especialmente relevantes. Estas estrategias permiten a los estudiantes participar activamente en la construcción de su propio conocimiento, explorar conceptos a través de la experimentación (ya sea real o simulada) y discutir sus ideas con sus compañeros. Este enfoque no solo mejora la comprensión conceptual, sino que también desarrolla habilidades esenciales como el trabajo en equipo, la comunicación y la resolución de problemas.

En última instancia, la enseñanza efectiva de la Física cuántica requiere un cambio de paradigma en la pedagogía. Debemos pasar de una transmisión pasiva de información a un enfoque centrado en el estudiante que fomente la curiosidad, la exploración activa y el desarrollo de una intuición cuántica en evolución. Al abrazar estrategias

didácticas innovadoras que incorporen visualizaciones, pensamiento crítico, historia de la ciencia y metodologías activas, podemos capacitar a las futuras generaciones de científicos e ingenieros para que exploren y aprovechen el vasto potencial del mundo cuántico.

Referencias

Macho, Ortiz. (2015). *Modelo Estándar de Física de Partículas*. Disponible en: [https://scholar.google.co.ve/scholar?q=Macho,+Ortiz.+\(2015\).&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar](https://scholar.google.co.ve/scholar?q=Macho,+Ortiz.+(2015).&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar).

UCV. *Departamento de Química Física, Conocimiento del Medio en Educación Infantil*. Tema 4: La Materia.

Elbibliote.com. (s.f.). Capítulo 1/Tema 3: *La materia y sus propiedades*. Libro-pedia. (s.f.). Cambios en la materia. Estrategias didácticas para la enseñanza y el aprendizaje de física universitaria.

Giacosa, N., Giorgi, S. y Concari, S. (2015). Estrategias didácticas para la enseñanza y el aprendizaje de física universitaria: algunos ejemplos de integración. Disponible en: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=bLpIRqUAAAAJ&cstart=20&pagesize=80&citation_for_view=bLpIRqUAAAAJ:738O_yMBCR-sC.



NOTAS EN I+D



Apartheid científico

Scientific apartheid

Roberto Betancourt A.

Observatorio Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6667-4214>

V7683160@gmail.com

Caracas-Venezuela

Consistentemente, la ciencia se ha presentado como un idioma universal que une a la humanidad, aunque, en la práctica, existe un sistema de exclusión deliberado que restringe el acceso a conocimientos, tecnologías, financiamientos y redes de cooperación a ciertos países por razones geopolíticas. Este fenómeno de «neosegregación del conocimiento» o «apartheid científico» se ha aplicado a Venezuela con intensidad creciente.

Este hecho, experimentado en países como Irán o Cuba, evidencia una forma de discriminación epistémica: un orden mundial en el que no todos los pueblos tienen derecho a investigar, innovar o acceder a tecnologías avanzadas en igualdad de condiciones. En el caso venezolano, las medidas coercitivas unilaterales han impedido —de forma sistemática— el acceso a *software* científico, servicios en la nube, revistas académicas, licencias tecnológicas, equipos de laboratorio y plataformas de pago para la publicación en revistas indexadas. Lo que para otros países es rutina, para Venezuela se convierte en un obstáculo o en una trinchera.

Estas limitaciones van más allá del ámbito comercial y afectan a la posibilidad de publicar investigaciones en medios internacionales, asistir a congresos, intercambiar ideas y cooperar con universidades y centros de investigación, así como de someterse a la revisión de pares fuera de nuestras fronteras. En resumen, se impide el avance de la ciencia como derecho humano y como motor de desarrollo.

La experiencia iraní es un ejemplo de ello: a pesar de las miles de sanciones, ha logrado situarse en campos como la nanotecnología, la medicina nuclear y la ingeniería avanzada. En 2001, Irán firmó nueve artículos sobre nanociencia; 20 años después, había publicado 12.500 investigaciones, situándose en el cuarto lugar del mundo gracias a la crea-

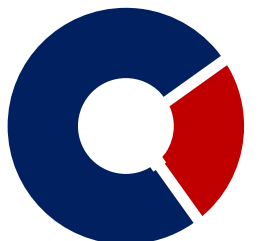
ción de repositorios propios, sistemas de indexación nacionales y redes alternativas de colaboración.

Venezuela está abriendo nuevas puertas. El Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología ha promovido una política de Ciencia Abierta que incluye el desarrollo de infraestructura digital propia, la reingeniería del tejido científico y tecnológico, el fortalecimiento de repositorios nacionales, el estímulo a revistas científicas propias y estrechar lazos con otros países del Sur Global. Con este fin, se han creado instituciones como la Universidad Nacional de las Ciencias Dr. Humberto Fernández-Morán y se ha transformado la Gran Misión Ciencia, Tecnología e Innovación como plataforma estratégica para la emancipación científica.

Lejos de romantizar la adversidad, afirmamos que el conocimiento también es un terreno en disputa. Si la ciencia puede usarse como arma de exclusión, también puede convertirse en herramienta de liberación.

En estos meses de fervor patrio, frente al bloqueo del acceso a los conocimientos universales en constante crecimiento, ratifico que construir ciencia desde el Sur deja de ser un mero acto de creación para convertirse en un acto de soberanía.

Normas de Publicación



Observador del Conocimiento

Depósito Legal: pp20142DC4456 ISSN: 2343-6212 [Electrónico]

Depósito Legal: pp201302DC4376 ISSN: 2343-5984 [Impreso]

I. Normas de Publicación

1. Las coberturas temáticas de la revista gravitan sobre la *Gestión Social del Conocimiento*, especialmente en: prospectiva tecnológica, Vigilancia tecnológica, cienciometría, observancia de la conducta científica-tecnológica, representación de la investigación interdisciplinaria, filosofía de la ciencia, bibliometría, análisis de patentes, estudio de indicadores en investigación, desarrollo e innovación, pronóstico, estudios *Delphi*, evaluación de tecnología *Benchmarking*, evaluación de investigación y desarrollo, *Roadmapping* tecnológico, entre otros.

2. El contenido de los manuscritos debe presentar una contribución significativa del conocimiento científico; así mismo, reunir los aspectos de área temática, pertinencia del tema para la revista, generación de conocimiento, existencia de propuestas, contribuciones a futuras investigaciones, originalidad, valor científico, coherencia del discurso, vigencia de la información y calidad de las referencias bibliográficas.

3. Enviar el manuscrito al correo electrónico revoc2012@gmail.com, anexando los siguientes recaudos obligatorios:

- a. Resumen curricular (máximo 1.500 palabras) acompañado de una foto digital a color.
- b. Constancia de originalidad, donde el autor o autora responsable declara que el manuscrito enviado no ha sido publicado previamente en otra revista.
- c. Constancia de consentimiento entre autorías, sobre la publicación del artículo. Es importante saber que, de existir desacuerdo entre las

personas que tienen la autoría del artículo sobre su divulgación, este no se publicará.

d. Permiso de divulgación y difusión del artículo para presentarlo en diferentes bases de datos, compendios y cualquier otra forma de difusión y divulgación que la revista pueda crear para ampliar la visibilidad de la producción científica escrita.

4. Se recibirán manuscritos durante todo el año, mediante convocatorias que pueden orientar algunas temáticas para cada edición. Se publicará la convocatoria por el portal institucional del Observatorio Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Oncti), www.oncti.gob.ve, y en la sección de convocatoria de la plataforma *Open Journal Systems*, con una duración mínima de 60 días calendario.

5. Las opiniones y afirmaciones emitidas en los manuscritos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y autoras.

6. Los manuscritos deben señalar la procedencia de los mismos cuando respondan a tesis de grado o proyectos.

7. Para información adicional puede contactarse a la coordinación editorial de la revista por el correo revoc2012@gmail.com.

8. El Consejo Editorial se encargará de la revisión previa de los trabajos, así como del seguimiento y evaluación de los mismos.

9. El formato digital del contenido del manuscrito debe estar elaborado en cualquier aplicación de



procesador de palabras, ya que debe ser compatible con los paquetes de programas informáticos libres y de estándares abiertos, en correspondencia con el artículo 34 de la Ley de Infogobierno (2013) que reza:

El desarrollo, adquisición, implementación y uso de las tecnologías de información por el Poder Público, tiene como base el conocimiento libre. En las actuaciones que se realicen con el uso de las tecnologías de información, solo empleará programas informáticos en *software* libre y estándares abiertos para garantizar al Poder Público el control sobre las tecnologías de información empleadas y el acceso de las personas a los servicios prestados.

Los programas informáticos que se empleen para la gestión de los servicios públicos prestados por el Poder Popular, a través de las tecnologías de información, deben ser en *software* libre y con estándares abiertos (p. 9).

10. La coordinación de la revista remitirá por correo electrónico el acuse de recibo al autor o autora que envíe manuscritos científicos.

11. Se realizará una revisión formal al manuscrito recibido sobre el seguimiento de las normas editoriales. En caso de observaciones, serán remitidos al autor o autora para su adecuación, todo previo al arbitraje.

12. Los manuscritos recibidos y sometidos a revisión de normas editoriales, pasan al Consejo Editorial para el proceso de evaluación (doble ciego). La evaluación tomará un lapso inferior a 15 días calendario.

13. Los manuscritos deben estar escritos en tamaño carta, con márgenes de 2,5 cm, con fuente Gotham, tamaño 12, espacio de línea única o simple, con numeración arábiga en la parte inferior y centrada.

14. La revista recibirá los siguientes tipos de investigaciones científicas, todos sometidos a evaluación:

a. Artículos de investigación: dedicados a la presentación de artículos en el área de

Gestión Social de Conocimiento, tales como: prospectiva tecnológica, vigilancia tecnológica, ingeniería del conocimiento, seguridad de la información y tecnologías de la información, que expliquen enfáticamente el aporte y muestren de manera detallada la interpretación de los resultados. La estructura consta de seis (6) partes: resumen, introducción, metodología, resultado, conclusión y referencias. Tiene una extensión máxima de 25 páginas, incluyendo las referencias consultadas.

b. Ensayos de investigación: destinados a la argumentación, sistematización y análisis de resultados de investigaciones publicadas o no, que den cuenta de los avances y tendencias en un determinado ámbito de la ciencia, tecnología, innovación y sus aplicaciones. La estructura debe cumplir con la siguiente estructura: resumen, introducción, desarrollo y conclusión. Tienen una extensión máxima de 15 páginas, incluyendo las referencias consultadas.

c. Recensiones: analizan publicaciones de reciente aparición en el campo del conocimiento de la revista. Estas deben comprender documentos publicados durante los últimos tres (3) años, o menos, anteriores a la entrega de las mismas, salvo que se trate de obras clásicas. El propósito principal de una reseña va más allá de simplemente ofrecer un resumen del libro, sino proveer un análisis crítico, propiedad y original del autor o autora. Para más detalle a este respecto, el autor o autora debe evaluar la contribución al conocimiento científico en un campo o un tema específico del ámbito de la ciencia, tecnología, innovación y sus aplicaciones. Comprende: descripción de la reseña, introducción, aporte del autor o autora acerca de la temática que presenta y conclusión. Es indispensable, incluir la imagen de la portada en formato JPG en buena resolución. La extensión máxima es de cinco (5) páginas.



15. El título del manuscrito se presenta en español e inglés, la primera letra en mayúscula y las siguientes en minúsculas, en negrillas y centrado (igualmente en inglés). El mismo debe ser conciso e ilustrativo, que resume la idea central del trabajo. Menos de 12 palabras, sin acrónimos. Por ejemplo:

Prospectiva tecnológica en tiempos de cambio
Technology foresight in times of change

16. El manuscrito debe incluir datos de la persona o personas que tienen la autoría, de acuerdo con el siguiente modelo: nombre del autor, institución, ciudad, país, número de Identificador Abierto de Investigador y Colaborador (Open Researcher and Contributor ID, ORCID) y correo electrónico. Colocar en la primera página un resumen curricular a pie de página.

17. El manuscrito debe presentar un resumen en español y en inglés, con una extensión máxima de 250 palabras, acompañada de cinco (5) categorías clave, separadas cada una por punto y coma (;). La primera letra de la primera palabra va en mayúscula. Ejemplo:

Palabras clave:

Prospectiva; difusión; diseño; cuantitativo; gobierno

18. La introducción debe establecer el propósito del manuscrito y resumir la justificación para el estudio u observación. Asimismo, proporciona solo las referencias pertinentes y no incluir datos o conclusiones del trabajo que se está informando.

19. El cuerpo del manuscrito debe enfatizar los aspectos nuevos e importantes del estudio y las conclusiones subsiguientes. Se debe evitar la repetición en detalle de los datos u otros materiales suministrados previamente en las secciones de introducción y resultados. Debe incluir las implicaciones de sus hallazgos y sus limitaciones, incluidas sus implicaciones para investigaciones futuras, relacionando las observaciones con otros estudios relevantes.

20. Las conclusiones en el manuscrito deben estar relacionadas con los objetivos del estudio. Evitar

frases no calificadas y conclusiones no apoyadas completamente por los datos presentados.

21. Las secciones y subsecciones de los manuscritos deben ajustarse a las siguientes características:

Nivel	Formato
1	Centrado en negrillas, con mayúsculas y minúsculas, fuente Arial, tamaño 12.
2	Alineado a la izquierda en negrillas con mayúsculas y minúsculas, fuente Arial, tamaño 12 y numeración correlativa.
3	Alineado a la izquierda en negrillas, con mayúsculas y minúsculas, sangría de cinco (5) espacios, fuente Arial, tamaño 12, y un punto al final.

22. Para señalar en el interior del texto una referencia bibliográfica estas deberán ajustarse a las normas del sistema de la Asociación Americana de Psicología (*American Psychological Association*¹ en su vernáculo anglosajón, o APA), de esta forma:

a. Al hacer un parafraseo de alguna postura de un autor o autora se colocará entre paréntesis, el apellido o apellidos del autor o autora, con la primera letra en mayúscula, una coma y el año de publicación. Si fuere necesario notificar la página donde está la idea, se colocan dos puntos, seguidos del número de la página o páginas. Por ejemplo:

El concepto de proyecto y del plan de acciones para lograrlo tampoco es nuevo. Lo encontramos en Séneca, según el cual “ningún viento es favorable para el que no sabe adónde va” (Godet, 2011).

Otro Ejemplo:

Los escenarios posibles pueden no ser una opción deseable y, consecuentemente, tomarse todas las medidas posibles para que no llegue a ser una realidad en el futuro (Martín, 1995: p. 7).



b. Las referencias bibliográficas serán presentadas al final del escrito de forma separada. No se pueden incluir en el listado referencias bibliográficas de libros que no hayan sido citados en el texto.

c. Las referencias se ordenarán consecutivamente siguiendo los siguientes criterios:

1) Por orden alfabético por apellido de autor o autora.

2) Por orden cronológico, cuando un autor o autora tenga más de un libro citado. Así mismo, el estilo a utilizar es fuente Arial 12, espaciado de 1,5 líneas.

d. La bibliografía deberá representarse de la siguiente forma: apellido del autor o autora con la primera letra en mayúscula y el resto en minúsculas, seguido de una coma, después la letra inicial del nombre del autor o autora en mayúscula seguido de punto; seguido el año, entre paréntesis, después un punto; luego el título del libro en letra cursiva con la primera letra en mayúscula y las demás palabras en minúscula; seguido de un punto, luego la ciudad, luego una coma; seguido el país de edición colocando luego de dos puntos el nombre de la editorial, y punto final. Por ejemplo:

Ancora, L. (1965). La motivación. Buenos Aires, Argentina: Editorial Proteo.

Pérez, L. y Ruiz, J. (2000). Revistas Científicas. Caracas, Venezuela: El Ateneo.

e. En caso de usarse notas, estas deben servir para introducir información complementaria y colocándose en el texto mediante numeración

consecutiva. Estas notas deberán ir a pie de cada página.

f. Las expresiones en otro idioma deben presentarse en letra cursiva y no deberán superar 25 palabras en todo el escrito.

g. Las citas cuya extensión sea de menos de 40 palabras se incluirán en el párrafo entre comillas, indicando entre paréntesis el autor o autora, año de publicación y número de páginas. Si la cita superare las 40 palabras, deberá colocarse en párrafo aparte, con una sangría de cinco espacios, en fuente Arial, tamaño 10, cuidando que no sean extensas. Se señala que se deben seguir los criterios de las normas APA para citas. Por ejemplo:

Expertos han señalado que la prospectiva se aprecia como:

La prospectiva tecnológica se aprecia como un mecanismo para fomentar un debate más estructurado con una amplia participación que conduzca a la comprensión compartida de los conceptos aceptados por la comunidad de profesionales, donde ella fomenta un debate más estructurado que conduce a la comprensión compartida de los conceptos a largo plazo (Georghiou *et al*, 2008, p. 65).

23. Las tablas, gráficos y figuras deben ser de 300 ppi y tamaño 16 x 10 cm; deben insertarse en el párrafo en formato JPG. Asimismo, deben consignarse carpetas digitales con las imágenes editables debidamente nombradas e identificadas con el nombre del archivo, con numeración según el elemento (Figura N° 1, Tabla N° 1, Gráfico N° 1). La denominación o títulos de los mismos deben escribirse por fuera y encima de la imagen con fuente

¹Las Normas APA pueden consultarse, en su totalidad, en <https://bit.ly/3jZg2d5>.

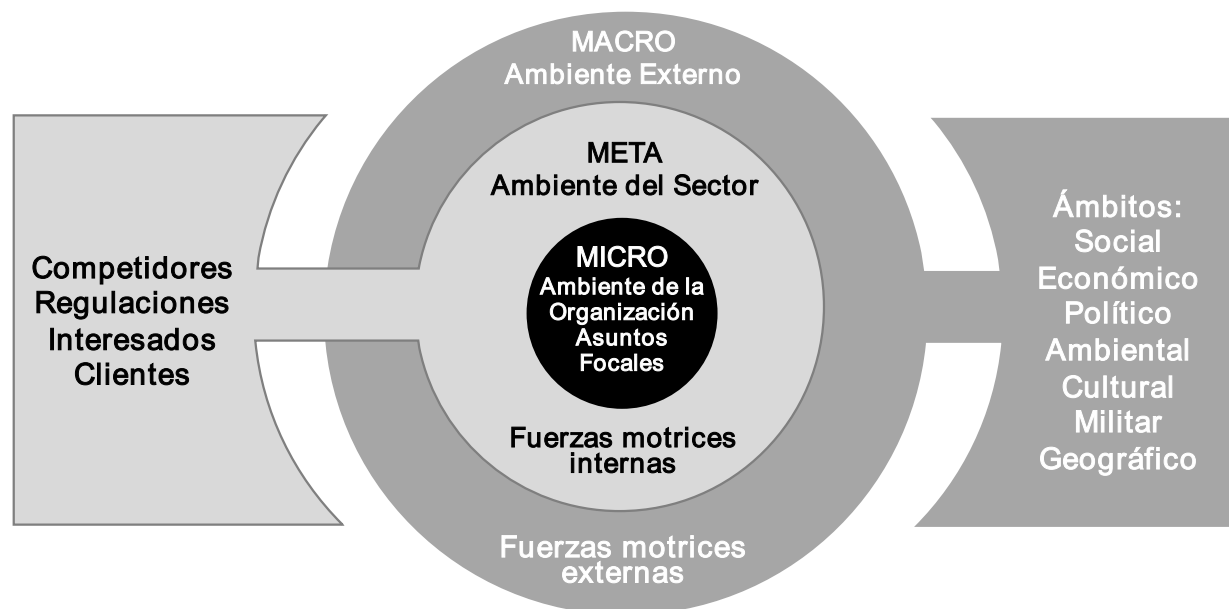


Arial, tamaño 10. Cada elemento visual debe tener fuente de procedencia y fecha de la información suministrada. La fuente debe colocarse por debajo de la imagen con tamaño 10, expresándose así: contenido de la fuente seguido del año entre paréntesis, como lo refleja el ejemplo abajo:

Si la fuente proviene de internet debe incluir la dirección electrónica de la página o enlace. La misma

será revisada en el momento de la evaluación. Es responsabilidad del autor o autora obtener los permisos y derechos para incluir materiales o ilustraciones provenientes de otras fuentes. Todas las imágenes, figuras, tablas y cuadros deben elaborarse en blanco y negro o escala de grises, y sus detalles perfectamente legibles. A continuación, se ilustra un ejemplo:

Figura 1. Escaneo ambiental como método de prospectiva tecnológica



Según el caso:

a) Fuente: Miles (2008).

b) Fuente: Elaboración propia del autor (2022).



II. Normas de Evaluación

1. Una vez que se reciben los manuscritos, el Consejo Editorial verifica si cumplen con las normas de publicación y con el objeto de la revista; determina si hay mérito científico y relevancia para los lectores de la revista; después, se someten a una revisión a través de un proceso formal de revisión por pares y con la metodología “doble ciego”.

2. Los manuscritos que ingresan al proceso de arbitraje por aprobación del Consejo Editorial tendrán un lapso de 10 días hábiles para ser evaluados.

3. Al finalizar el proceso de arbitraje, se enviará una comunicación al autor o autora, vía correo electrónico, informando el estatus de la evaluación de su manuscrito, donde se informará una de estas tres apreciaciones:

a. El manuscrito fue evaluado y se encontró sin observaciones, pasando a la publicación del mismo.

b. El manuscrito fue evaluado y presentó algunas observaciones. En este caso, el autor o autora tienen tres (3) días calendario para corregirlo, y pasar una segunda revisión donde se confirmará que han sido consideradas las observaciones y podrá pasar a la publicación del mismo.

c. El manuscrito fue evaluado y presentó significativas observaciones de contenido quedando fuera de la presente edición recomendando mejorarlo. Se anexará el formato de evaluación con las categorías de evaluación que validan lo informado (ver el proceso de arbitraje más adelante).

4. Los manuscritos aprobados para la publicación pasan a corrección de estilo, edición y diagramación.

5. Cada edición es aprobada al final en su conjunto por la autoridad de edición de la revista.

III. Proceso de Arbitraje

1. El sistema de arbitraje es por pares bajo la metodología “doble ciego”, lo que asegura la confiabilidad del proceso, manteniendo en reserva las identidades de los árbitros, autores o autoras, evitando el conocimiento recíproco de ambas partes.

2. Podrán exceptuarse del arbitraje aquellas colaboraciones solicitadas especialmente por la autoridad editora de la revista, a investigadores o investigadoras reconocidas nacional e internacionalmente, sobre tópicos y materias especializadas de gran interés por su aporte al avance del conocimiento científico, tecnológico, innovación y sus aplicaciones.

3. El sistema de arbitraje garantiza la objetividad, transparencia e imparcialidad de los veredictos emitidos sobre la calidad de los trabajos presentados; a este fin, se tiene especial cuidado en la adecuada selección de los árbitros conforme al perfil establecido por el Consejo Editorial.

4. El veredicto de los árbitros concluye con una recomendación sobre la publicación del manuscrito, la cual es enviada al autor o autora en el formato especialmente elaborado para este efecto.

5. Las categorías de evaluación que determinarán el estatus del manuscrito arbitrado son las siguientes:

a. Publicar: cuando, según el criterio de los árbitros, el contenido, estilo, redacción, citas y referencias, evidencian relevancia del trabajo y un adecuado manejo por parte del autor(a), como corresponde a los criterios de excelencia editorial establecidos.

b. Publicable corrigiendo las observaciones: cuando, a pesar de abordar un tema de actualidad e interés para la revista y evidenciar adecuado manejo de contenidos por parte del autor(a), se encuentran en el texto deficiencias superables en la redacción y estilo, las cuales deben ser





corregidas e incorporadas en un máximo de tres días calendario.

c. No publicar: cuando, según el juicio de los árbitros, el texto:

1) No se refiera a un tema de interés de la revista o del tema seleccionado para la publicación.

2) Evidencia carencias en el manejo de contenidos por parte del autor o autora; así como también en la redacción y estilo establecidos para optar a la publicación. Es decir, incumple con las normas exigidas en el criterio de evaluación.

6. El arbitraje se basa tanto en la forma como en el contenido de los trabajos. Los criterios de evaluación considerados son:

a. Pertinencia o aportes del manuscrito.

b. Nivel de elaboración teórica y metodológica.

c. Claridad, cohesión, sintaxis, gramática, ortografía y estilo.

d. Adecuación del resumen.

e. Actualidad y pertinencia de las referencias bibliográficas, así como su apropiada presentación de las citas.

f. Apropiada adecuación del título con el contenido.

g. Organización del documento, esto es: resumen, introducción, metodología, resultado, conclusiones o recomendaciones y referencias.

h. Presentación correcta de figuras, gráficos y tablas.

**Consejo Editorial de la revista
Observador del Conocimiento**





Apéndice de las normas de publicación de la Revista Observador del Conocimiento

Normas sobre el uso responsable de herramientas de inteligencia artificial (IA) generativa por parte de las y los autores, las y los evaluadores y las y los editores

Uso de la inteligencia artificial (IA) en el proceso de escritura:

La IA generativa y las tecnologías asistidas por la IA deben usarse para mejorar la legibilidad y el lenguaje del trabajo.

- La supervisión y el control humano debe guiar la aplicación de esta tecnología.

- Los autores deben editar y revisar cuidadosamente los resultados debido a posibles inexactitudes, incompletitudes, o sesgos generados por la IA.

- Los autores son responsables del contenido de su trabajo.

Declaración en el manuscrito:

- Los autores deben revelar el uso de la IA en su manuscrito.

- En el trabajo publicado debe aparecer la declaración del uso de esta tecnología

- Esto promueve la transparencia y la confianza y facilita los términos de uso.

- Uso no generativa de herramientas de aprendizaje automático debe ser revelado en leyenda de manuscrito para revisión.

Restricciones de autoría y uso de la IA:

- La atribución de autoría conlleva responsabilidad por el trabajo, la cual no es aplicable de manera efectiva a los LLM (Large Language Model).

- El uso de un LLM debe documentarse adecuadamente en la sección de métodos del manuscrito o en una sección alternativa adecuada.

- La IA y las tecnologías asistidas por la IA no deben figurar como autores o coautores ni citarse como autores. La autoría es responsabilidad humana y conlleva tareas que solo pueden ser realizadas por humanos.

- Los autores deben ser transparentes sobre su uso de la IA generativa, y los editores deben tener acceso a herramientas y estrategias para garantizar la transparencia de los autores.

Restricciones de autoría y uso de la IA:

- La atribución de autoría conlleva responsabilidad por el trabajo, la cual no es aplicable de manera efectiva a los LLM (Large Language Model).

- El uso de un LLM debe documentarse adecuadamente en la sección de métodos del manuscrito o en una sección alternativa adecuada.

- La IA y las tecnologías asistidas por la IA no deben figurar como autores o coautores ni citarse como autores. La autoría es responsabilidad humana y conlleva tareas que solo pueden ser realizadas por humanos.

- Los autores deben ser transparentes sobre su uso de la IA generativa, y los editores deben tener acceso a herramientas y estrategias para garantizar la transparencia de los autores.



Excepciones en el uso de la IA en figuras e imágenes:

- No se permite el uso de la IA generativa o herramientas asistidas por IA para crear o alterar imágenes en los manuscritos enviados.

- Se pueden realizar ajustes de brillo, contraste o balance de color si no afectan la información original.

- Se pueden aplicar herramientas forenses de imágenes para detectar irregularidades.

- La única excepción es si el uso de la IA o herramientas asistidas por la IA es parte del método o diseño de investigación.

- Debe describirse en la sección de métodos los detalles del proceso y el *software* utilizado.

- La revista no permitirá la inclusión de imágenes generadas por la IA en el manuscrito debido a problemas legales y éticos.

- Existen excepciones para imágenes obtenidas de agencias con las que existen acuerdos contractuales y que han creado imágenes de manera legalmente aceptable.

- Además, las imágenes y videos relacionados directamente con artículos específicos sobre IA serán revisados caso por caso. La política será revisada periódicamente y se adaptará si es necesario, dado el rápido desarrollo en este campo.

Normas para la gestión de citas y referencias obtenido por IA

El uso de IA, mediante herramientas basadas en grandes modelos lingüísticos (LLM, por sus siglas en inglés) para escribir un artículo puede contribuir a mejorar errores gramaticales o de estilo, e incluso facilitar una redacción más clara de un escrito, si bien es obligado especificarlo a modo de citas o agradecimientos, como cualquier otro trabajo o bibliografía que hayamos consultado.

Para tales fines este es modelo a seguir según normas APA para citar y referenciar un texto obtenido por Inteligencia Artificial:

Cita:

Colocar la fecha de cuándo se realizó la pregunta a la IA, después de los dos puntos, se escribe la pregunta entre comillas, luego de punto y seguido se nombra la IA como el generador de la respuesta. La respuesta colocarla entre comillas y en cursiva, por ejemplo:

2/11/2023

Pregunta

Fecha de la pregunta: "¿La división del cerebro izquierdo del cerebro derecho es real o una metáfora?" El texto generado por ChatGPT indicó que *"aunque los dos hemisferios cerebrales están algo especializados, a notación de que las personas pueden caracterizarse como 'de cerebro izquierdo' o 'de cerebro derecho' se considera una simplificación excesiva y un mito popular"* (OpenAI, 2023).

Respuesta
generada
por la IA

Plataforma



Referencia:

OpenAI (2023). ChatGPT (GPT-4, Versión 12 de mayo) [Large Language Model]. Respuesta a la consulta realizada por Nelson Vargas. Mes/Día/Año. <https://chat.openai.com/chat>

Recomendaciones para gestión de la edición ante la IA para árbitros y editores:

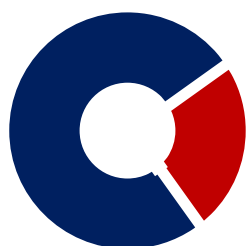
- Los autores deben ser transparentes sobre su uso de la IA generativa, y los editores deben tener acceso a herramientas y estrategias para garantizar la transparencia de los autores.

- Los editores y árbitros no deben depender únicamente de la IA generativa para revisar los artículos enviados.

Los editores tienen la responsabilidad final de seleccionar a sus árbitros y deben ejercer una supervisión activa de esa tarea.

- La responsabilidad final de la edición de un artículo recae en los autores y editores humanos.





Observador del Conocimiento

Depósito Legal: pp20142DC4456 ISSN: 2343-6212 [Electrónico]

Depósito Legal: pp201302DC4376 ISSN: 2343-5984 [Impreso]

I. Publication Standards

1. The content of the articles must present a significant contribution to scientific knowledge; likewise, they must meet the aspects of subject area, relevance of the subject for the journal, generation of knowledge, existence of proposals, contributions to future research, originality, scientific value, coherence of the discourse, validity of the information and quality of the bibliographical references.

2. Send the article to the e-mail revoc2012@gmail.com, attaching the following mandatory information:

a. Resume (maximum 1,500 words) accompanied by a digital color photo.

b. Proof of originality, where the responsible author declares that the article submitted has not been previously published in another journal.

c. Letter of agreement between the author and co-authors on the publication of the article. It is important to know that, if there is disagreement between the persons who have the authorship of the article about its disclosure, it will not be published.

d. Permission for dissemination and diffusion of the article to present it in different databases, compendiums and any other form of dissemination and diffusion that the journal may create to increase the visibility of the written scientific production

3. Articles will be received throughout the year through calls for papers that can guide some topics for each edition. The call for papers will be published on the ins-

titutional portal of the National Observatory of Science, Technology and Innovation (Oncti), www.oncti.gob.ve, and in the call for papers section of the Open Journal Systems platform, with a minimum duration of sixty calendar days.

4. The opinions and statements expressed in the articles are the sole responsibility of the authors.

5. The articles must indicate the origin of the same when they respond to degree thesis or projects.

6. For additional information, please contact the editorial coordination of the journal at revoc2012@gmail.com.

7. The Editorial Board will be responsible for the prior review of the papers, as well as their follow-up and evaluation.

8. The article document prepared in any word processor application must be compatible with free and open standard software packages, in correspondence with Article 34 of the InfoGovernment Law (2013) which reads:

The development, acquisition, implementation and use of information technologies by the Public Power is based on free knowledge. In actions carried out with the use of information technologies, only free software and open standards computer programs will be used to guarantee the Public Power control over the information technologies used and people's access to the ser



vices provided. The computer programs used to manage public services provided by the People's Power, through information technologies, must be free software and with open standards (p. 9).

9. The coordination of the journal will send the acknowledgement of receipt by e-mail to the author submitting articles.

10. A formal review of the article received will be carried out to ensure compliance with editorial standards. In case of observations, they will be sent to the author for adaptation, prior to refereeing.

11. The articles received and submitted for review of editorial standards, go to the Editorial Committee for the evaluation process (double blind). The evaluation will take less than fifteen calendar days.

12. Articles should be written in letter size, with 2.5 cm margins, Arial font, size 12, single or single line spacing, with Arabic numbering at the bottom and centered.

13. The journal will receive the following types of scientific research, all submitted for evaluation:

a. Research articles: dedicated to the presentation of articles in the area of Social Management of Knowledge, such as: technology foresight, technology watch, knowledge engineering, information security and information technologies, which emphatically explain the contribution and show in detail the interpretation of the results. The structure consists of six parts: summary, introduction, methodology, results, conclusions and references. It has a maximum length of 25 pages, including the references consulted.

b. Research essays: aimed at the argumentation, systematization and analysis of published or unpublished research results, which account for the progress and trends in a given field of science, technology, innovation and their applications.

The structure must comply with the following structure: summary, introduction, development, concluding ideas. They have a maximum length of 15 pages, including references consulted.

c. Reviews: analyze recent publications in the field of knowledge of the journal. These should include documents published during the last three years or less prior to their submission, except in the case of classic works. The main purpose of a review goes beyond simply offering a summary of the book, but to provide a critical, proprietary and original analysis of the author. For more detail in this regard, the author should evaluate the contribution to scientific knowledge in a specific field or topic in the field of science, technology, innovation and its applications. It includes: description of the review, introduction, author's contribution to the topic presented, concluding ideas. It is essential to include the cover image in JPG format in good resolution. The maximum length is five pages.

14. The title of the article should be presented in Spanish and English, the first letter in capital letters and the following letters in lower case, in bold and centered (also in English). The title should be concise and illustrative, summarizing the main idea of the paper. Less than 12 words, no acronyms. For example:

15. The article should include data of the person or persons who have the authorship, according to the following model: author's name, institution, city, country, Open Researcher and Contributor ID (ORCID) number and e-mail. Place on the first page a curricular summary at the bottom of the page.

Technology foresight in times of change

16. The article must present an abstract in Spanish and English, with a maximum length of 250 words, accompanied by five keywords, each separated by a semicolon (;). The first letter of the first word should be capitalized. Example:



Keywords: Technology foresight; diffusion; design; quantitative; government; technology foresight; design; quantitative

17. The introduction should state the purpose of the article and summarize the justification for the study or observation. Also, provide only pertinent references and do not include data or conclusions of the work being reported.

18. The body of the article should emphasize new and important aspects of the study and subsequent conclusions. Repetition in detail of data or other material previously provided in the introduction and results sections should be avoided. It should include the implications of the findings and their limitations, including implications for future research, relating the observations to other relevant studies.

19. Conclusions in the article should be related to the objectives of the study. Avoid unqualified phrases and conclusions not fully supported by the data presented.

20. Sections and subsections of articles must conform to the following characteristics:

Level	Format
1	Centered in bold, upper and lower case, Arial font, size 12.
2	Aligned to the left in bold type with upper and lower case, Arial font, size 12 and correlative numbering.
3	Left aligned in bold, upper and lower case, indented five spaces, Arial font, size 12, and a period at the end.

21. To indicate a bibliographic reference within the text, these should conform to the standards of the American Psychological Association (APA) system, as follows:

a. When paraphrasing an author's position, the author's surname or surnames should be placed

in parentheses, with the first letter in capital letters, a comma, and the year of publication. If it is necessary to notify the page where the idea is, a colon is placed followed by the number of the page or pages. For example:

El concepto de proyecto y del plan de acciones para lograrlo tampoco es nuevo. Lo encontramos en Séneca, según el cual "ningún viento es favorable para el que no sabe adónde va" (Godet, 2011).

Another example:

Los escenarios posibles pueden no ser una opción deseable y, consecuentemente, tomarse todas las medidas posibles para que no llegue a ser una realidad en el futuro (Martín, 1995: 7).

b. Bibliographical references should be presented separately at the end of the paper. Bibliographical references of books that have not been cited in the text cannot be included in the list.

c. References will be ordered consecutively according to the following criteria:

1) In alphabetical order by author's last name.

2) In chronological order, when an author has more than one book cited. Likewise, the style to be used is Arial 12 font, 1.5 line spacing, with French indentation.

d. The bibliography should be represented as follows: author's last name with the first letter in upper case and the rest in lower case, followed by a comma, then the initial letter of the author's name in upper case followed by a period; followed by the year, in parentheses, then a period; then the title of the book in italics with the first letter in upper case and the other words in lower case; followed by a period, then the city, then a comma; followed by the country of publication with the name of the publisher after a colon, and a period at the end. For example:



Ancora, L. (1965). La motivación. Buenos Aires, Argentina: Editorial Proteo.

Pérez, L. y Ruiz, J. (2000). Revistas Científicas. Caracas, Venezuela: El Ateneo.

e. If notes are used, they should serve to introduce complementary information and should be placed in the text by consecutive numbering. These notes should be placed at the bottom of each page.

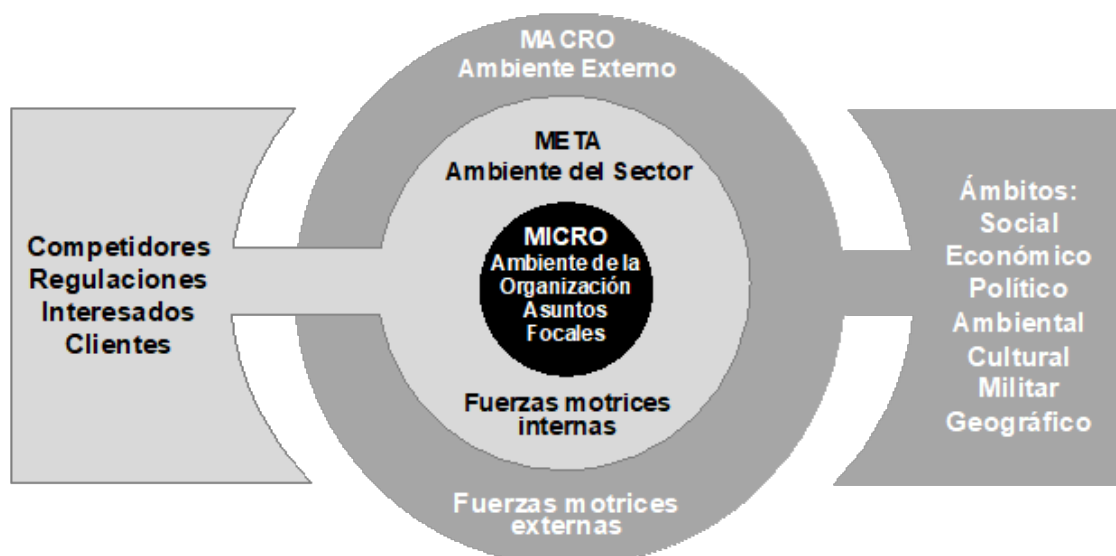
f. Expressions in a language other than Spanish should be presented in italics and should not exceed twenty-five words in the entire text.

g. Quotations of less than 40 words should be included in the paragraph between quotation marks, indicating in parentheses the author, year of publication and number of pages. If the quotation exceeds forty words, it should be placed in a separate paragraph, with an indentation of five spaces, in Arial font, size 10, taking care that they are not extensive. It is noted that the criteria of the APA norms for citations should be followed. For example:

Experts have pointed out that foresight is appreciated as:

Technological foresight is seen as a mechanism to foster a more structured debate with broad participation that leads to shared understanding of the concepts accepted by the community of professionals, where it fosters a more structured debate that leads to shared understanding of the concepts. in the long term (Georghiou *et al*, 2008, p. 65).

22. Tables, graphs and figures should be 300 ppi and 16 x 10 cm in size; they should be inserted in the paragraph in JPG format. Likewise, digital folders with editable images should be included, duly named and identified with the name of the file, with numbering according to the element (Figure 1, Table 1, Table 1). The name or titles should be written on the outside and above the image in Arial font, size 10. Each visual element should have the source and date of the information provided. The font must be placed below the image in size 10. If the source comes from the Internet, the electronic address of the page or link must be included. This will be reviewed at the time of evaluation. It is the author's responsibility to obtain permissions and rights to include materials or illustrations from other sources. All images, figures, tables and charts must be in black and white or grayscale, and their details must be perfectly legible. An example is illustrated below:



II. Assessment Standards

1. Once the articles are received, the Editorial Board verifies if they comply with: publication standards, and with the journal's purpose; determines if there is scientific merit and relevance for the journal's readers; then, they are submitted for review through a formal peer review or double-blind process.

2. The articles that enter the arbitration process by approval of the Editorial Board will have a period of 10 working days to be evaluated.

3. At the end of the refereeing process, a communication will be sent to the author, via e-mail, informing the status of the evaluation of the article, where one of these three evaluations will be informed:

a. The article was evaluated and found to have no observations, and was passed on for publication.

b. The article was evaluated and presented some observations. In this case, the person or persons who have the authorship have three calendar days to correct it for the second review, where it will be confirmed that the observations have been considered and the article can be published.

c. The article was evaluated and presented significant content observations and was left out of the present edition, recommending its improvement. The evaluation form will be attached with the evaluation categories that validate what was reported (see the arbitration process below).

4. Articles approved for publication undergo proofreading, editing and layout.

5. Each issue is finally approved as a whole by the editing authority of the journal.

III. Arbitration Process

1. The arbitration system is double-blind, which ensures the reliability of the process, keeping the identities of the arbitrators, authors and authors in reserve, avoiding the reciprocal knowledge of both parties.

2. Those collaborations specially requested by the journal's editorial authority from nationally and internationally recognized researchers on specialized topics and subjects of great interest for their contribution to the advancement of scientific and technological knowledge, innovation and its applications may be exempted from arbitration.

3. The arbitration system guarantees the objectivity, transparency and impartiality of the verdicts issued on the quality of the papers submitted; to this end, special care is taken in the selection of referees according to the profile established by the Editorial Board.

4. The referees' verdict concludes with a recommendation on the publication of the article, which is sent to the author in the format specially prepared for this purpose.

5. The evaluation categories that will determine the status of the refereed article are as follows:

a. To publish: when, according to the criteria of the referees, the content, style, writing, citations and references, show the relevance of the work and an adequate management by the author, as it corresponds to the established criteria of editorial excellence.

b. Correction of observations: when, in spite of addressing a current topic of interest to the journal and evidencing adequate handling of contents by the author, there are deficiencies in the text that can be overcome in the writing and style, which must be corrected and incorporated within a maximum of three calendar days.

c. Do not publish: when, in the opinion of the referees, the text:



1) Does not refer to a subject of interest of the journal or the topic selected for publication.

2) It shows shortcomings in the handling of contents by the author, as well as in the writing and style established to qualify for publication. In other words, it does not comply with the standards required in the evaluation criteria.

6. Judging is based on both the form and content of the papers. The evaluation criteria that are considered are as follows:

a. Relevance or contribution of the article.

b. Level of theoretical and methodological elaboration.

c. Clarity, cohesion, syntax, grammar, spelling and style.

d. Adequacy of the summary.

e. Up-to-date and pertinent bibliographic references, as well as their appropriate presentation in citations.

f. Appropriate match between the title and the content.

g. Organization of the document, i.e.: summary, introduction, methodology, results, conclusions and references.

h. Correct presentation of figures, graphs and tables.

Editorial Board of the journal

Observador del Conocimiento



Publication standards appendix of Observador del Conocimiento

Rules on the responsible use of generative artificial intelligence (AI) tools by authors, reviewers and editors

Use of artificial intelligence (AI) in the writing process:

- Generative AI and AI-assisted technologies should be used to improve the readability and language of the work.

- Human supervision and control should guide the application of this technology.

- Authors must carefully edit and review the results due to possible inaccuracies, incompleteness, or biases generated by the AI.

- The authors are responsible for the content of their work

Declaration in the manuscript:

- Authors must disclose the use of AI in their manuscript.

- A declaration of the use of this information must appear in the published work.

- This promotes transparency and trust and facilitates the terms of use.

- Non-generative use of machine learning tools must be disclosed in manuscript legend for review.

AI authorship and use restrictions:

- The attribution of authorship entails responsibility for the work, which is not effectively applicable to LLMs (Large Language Model).

- The use of an LLM should be adequately documented in the methods section of the manuscript or in an appropriate alternative section.

- AI and AI-assisted technologies should not be listed as authors

or co-authors or cited as authors. Authorship is a human responsibility

and entails tasks that can only be performed by humans.

- Authors must be transparent about their use of generative AI, and editors

must have access to tools and strategies to ensure author transparency.

Exceptions to the use of AI in figures and images:

- The use of generative AI or AI-assisted tools to create or alter images in submitted manuscripts is not permitted.

- Brightness, contrast or color balance adjustments can be made if not affect the original information.

- Image forensic tools can be applied to detect irregularities.

- The only exception is if the use of AI or AI-assisted tools is part of the research method or design.

- The details of the process and the software used must be described in the methods section.

- The journal will not allow the inclusion of AI generated images in the manuscript due to legal and ethical issues.

- There are exceptions for images obtained from agencies with whom there

are contractual agreements and who have created images in a legally

acceptable manner.



- Additionally, images and videos directly related to specific AI articles will be

reviewed on a case by case basis. The policy will be reviewed periodically and adapted if necessary, given the rapid development in this field.

Standards for citation and reference management obtained by AI:

The use of AI, through tools based on large linguistic models (LLM), to write an article can help improve grammatical or style errors, and even facilitate clearer writing of a piece of writing, although it is mandatory

specify it as citations or acknowledgments, like any other work or bibliography that we have consulted.

For these purposes, we present the model to follow according to APA standards to cite and reference a text obtained by AI:

To cite texts:

Enter the date of when the question was asked to the AI, after the colon, write the question in quotation marks, after the period and then the AI is named as the generator of the answer. Put the answer in quotes and italics.

2/11/2023

ask

When asked, "Is the left brain split from the right brain real or a metaphor?" The text generated by ChatGPT indicated that "although the two cerebral hemispheres are somewhat specialized, the notation that people can be characterized as 'left-brained' or 'right-brained' is considered an oversimplification and a popular myth" (OpenAI, 2023)

AI generated
response

Platform

Reference:

OpenAI (2023). ChatGPT (GPT-4, Version May 12) [LargeLanguage Model]. Response to the query made by Nelson Vargas. Month day Year. <https://chat.openai.com/chat>

- Editors have the final responsibility for selecting their referees and must actively supervise that task.

- The final responsibility for editing an article lies with the human authors and editors.

Recommendations for editing management before AI for referees and editors:

- Authors must be transparent about their use of generative AI, and editors must have access to tools and strategies to ensure author transparency.

- Editors and referees should not rely solely on generative AI to review submitted articles.





Observador del Conocimiento

Depósito Legal: pp20142DC4456 ISSN: 2343-6212 [Electrónica]
Depósito Legal: pp201302DC4376 ISSN: 2343-5984 [Impreso]

FORMATO DE EVALUACIÓN PARA EL PROCESO DE ARBITRAJE

I Título del trabajo:

II Evaluación

Marque con una X las características que a su juicio son relevantes en el manuscrito asignado:
Excelente () – Bueno () – Regular () – Deficiente ()

ASPECTOS	E	B	R	D	OBSERVACIONES
Correspondencia del título con el contenido					
Título máximo 12 elementos					
Resumen español					
Abstract					
Introducción					
Organización de las secciones					
Metodología					
Desarrollo coherente del contenido					
Nivel de argumentación					
Objetividad del planteamiento					
Aporte al conocimiento					
Uso adecuado de las fuentes					
Conclusiones					
Uso de las fuentes bibliográficas					
Correspondencia de los autores citados en el contenido con los indicados en las referencias					
Enlaces web, coherentes con los presentados en las referencias .					
Uso adecuado de tablas, gráficos y figuras					

Publicar _____ **Publicar corrigiendo observaciones** _____ **No publicar** _____

Observaciones:

Fecha de recepción _____

Fecha de evaluación: _____

Nombre y apellido:

C.I.

FIRMA:

Nota importante: Las revisiones de los manuscritos deben responder según lo indicado en las normas de evaluación.

