

Mecanismos de Exclusión de las Mujeres en la Educación Científica Cuántica: Un Análisis Crítico de las Barreras Estructurales y Socioculturales

Elena Patricia Rodríguez

elena.rodriguez@amlentia.org

Resumen

Las tecnologías cuánticas representan una de las revoluciones científicas más prometedoras del siglo XXI, con potencial transformador en múltiples sectores económicos y sociales. Sin embargo, la persistencia de mecanismos de exclusión sistemáticos limita la participación de las mujeres en la educación científica cuántica, perpetuando brechas históricas observadas en disciplinas STEM. Este artículo analiza críticamente los mecanismos estructurales, institucionales y socioculturales que obstaculizan el acceso equitativo de las mujeres a la formación en ciencias cuánticas. A través de un marco conceptual interdisciplinario que integra sociología de la ciencia, estudios de género y análisis de políticas educativas, se identifican barreras específicas en múltiples niveles: desde sesgos curriculares y pedagógicos hasta limitaciones en infraestructura educativa y falta de modelos de referencia femeninos. El análisis revela que la exclusión no es accidental sino producto de dinámicas históricamente arraigadas en la construcción social de la ciencia. Se proponen estrategias multinivel para democratizar el acceso a la educación cuántica, incluyendo reformas curriculares, iniciativas de mentoría, modificaciones institucionales y políticas públicas orientadas a la equidad de género. El estudio concluye que sin intervenciones deliberadas y sistemáticas, las tecnologías cuánticas reproducirán y potencialmente amplificarán las desigualdades de género existentes en el ecosistema científico-tecnológico, limitando tanto el desarrollo del talento como el potencial transformador de estas tecnologías para la sociedad.

Palabras clave: Educación cuántica, género y tecnología, exclusión científica, brecha digital de género, democratización tecnológica

Clasificación JEL: I23, I24, J16, O33, O38

1. Introducción

La emergencia de las tecnologías cuánticas marca un punto de inflexión en el desarrollo científico y tecnológico contemporáneo. Como señalan Troyer et al. (2024), estas tecnologías prometen revolucionar sectores cruciales desde la computación hasta la medicina, pasando por la seguridad cibernética y la modelización climática. Sin embargo, esta revolución cuántica se desarrolla en un contexto caracterizado por profundas desigualdades de género en la educación científica y tecnológica, amenazando con reproducir y amplificar exclusiones históricas.

La investigación sobre democratización de tecnologías cuánticas ha identificado múltiples dimensiones de exclusión. Seskir et al. (2023) argumentan que los esfuerzos actuales de democratización son necesarios pero insuficientes, concentrándose principalmente en aspectos de acceso técnico mientras descuidan dimensiones estructurales de equidad. Complementariamente, el análisis exhaustivo de Wolbring (2022) revela una ausencia casi total de consideraciones sobre equidad, diversidad e inclusión en la literatura técnica sobre tecnologías cuánticas: de 362,728 resúmenes analizados, solo 0.24% mencionaban aspectos sociales, y los marcos EDI estaban completamente ausentes.

Esta invisibilización de las cuestiones de género en el desarrollo cuántico contrasta dramáticamente con el creciente reconocimiento de su importancia en otros campos tecnológicos. Como documenta Vermaas (2017), existe una urgencia renovada por hacer comprensible la teoría cuántica para facilitar el debate societal informado, pero este esfuerzo debe necesariamente incluir la dimensión de género para ser verdaderamente inclusivo y efectivo.

El presente artículo examina sistemáticamente los mecanismos específicos que operan en la exclusión de las mujeres de la educación científica cuántica. Siguiendo el marco conceptual propuesto por Arrow et al. (2023) para la ética cuántica, se adopta un enfoque holístico que reconoce la interconexión entre factores técnicos, institucionales, sociales y culturales. El análisis se estructura en múltiples niveles, desde barreras individuales y pedagógicas hasta obstáculos sistémicos e institucionales, reconociendo que la exclusión opera simultáneamente en diversos planos de la realidad educativa.

La literatura sobre brechas digitales de género proporciona marcos conceptuales relevantes para entender estas dinámicas. Lahiri (2024) demuestra cómo la división digital exacerba disparidades sociales preexistentes basadas en género, estatus socioeconómico y localización geográfica, patrones que se manifiestan con particular intensidad en campos tecnológicos emergentes. Similarmente, Bulatova et al. (2023) distingue entre división digital (acceso técnico) y desigualdad digital (capacidad de uso beneficioso), una distinción crucial para entender las múltiples capas de exclusión en educación cuántica.

El contexto de rápida transformación tecnológica amplifica la urgencia de estas cues-

tiones. Como advierten de Jong (2022), las tecnologías sistémicas requieren estrategias anticipatorias que incluyan desmistificación, contextualización, engagement ciudadano, regulación flexible y diplomacia internacional. Sin embargo, estas estrategias deben diseñarse explícitamente considerando la equidad de género, o corren el riesgo de perpetuar exclusiones bajo la apariencia de universalidad técnica.

La investigación sobre impactos sociales de tecnologías emergentes en países en desarrollo ofrece insights adicionales. Ebua (2023) enfatiza que la implementación tecnológica debe guiarse por consideraciones éticas y compromiso con la justicia social, principios directamente aplicables al desarrollo de educación cuántica equitativa. De manera similar, Rodrigues and Costa (2018) documenta cómo las estrategias de desarrollo tecnológico requieren atención explícita a la gestión de tecnología e innovación para evitar reproducir desigualdades estructurales.

El marco teórico de Kop (2023) sobre Quantum-ELSPI (Ethical, Legal, Social and Policy Implications) proporciona una estructura útil para conceptualizar estas cuestiones. Este metaparadigma reconoce que la investigación en tecnologías cuánticas está inextricablemente conectada con las implicaciones que surgen de su introducción en la sociedad, incluyendo centralmente las cuestiones de equidad de género en educación y acceso.

Los estudios sobre workforce cuántica revelan preocupaciones adicionales. Peterssen (2020) identifica la necesidad de una fuerza laboral especializada para el desarrollo de software cuántico, pero sin analizar cómo las exclusiones educativas tempranas limitan el pipeline de talento femenino en este campo emergente. Esta omisión es particularmente problemática dado que, como señalan Raja and Christiaensen (2017), las tecnologías digitales transforman radicalmente los mercados laborales, creando riesgos de disrupción para quienes no pueden acceder a la formación necesaria.

La presente investigación contribuye a llenar este vacío analítico crítico mediante un examen sistemático de los mecanismos de exclusión específicos operando en educación cuántica. El análisis integra perspectivas de múltiples disciplinas, reconociendo que la exclusión de género en ciencia es un fenómeno multidimensional que requiere aproximaciones igualmente complejas para su comprensión y eventual superación.

2. Marco Teórico y Contextualización

La comprensión de los mecanismos de exclusión en educación científica cuántica requiere un marco teórico robusto que integre perspectivas de sociología de la ciencia, estudios de género en STEM, y análisis de tecnologías emergentes. Este marco conceptual debe reconocer tanto las continuidades históricas de exclusión en disciplinas científicas como las especificidades del contexto cuántico contemporáneo.

La conceptualización de tecnologías cuánticas como sistemas sociotécnicos complejos es fundamental para este análisis. Possati (2024) desarrolla una aproximación hermenéutica que reconoce tres niveles distintos en la creación y comunicación de significados sociales para tecnologías cuánticas: ficciones, popularización y periodismo científico. Esta estratificación es crucial porque cada nivel opera con diferentes mecanismos de inclusión y exclusión, desde representaciones culturales hasta discursos especializados que pueden funcionar como barreras epistémicas.

El concepto de *quantum literacy* propuesto por Nita et al (2021) trasciende la mera comprensión técnica para abarcar la capacidad de participar en investigación transdisciplinaria sobre problemas complejos relacionados con sostenibilidad global. Esta definición ampliada es particularmente relevante porque sitúa la educación cuántica no como dominio especializado aislado, sino como herramienta para abordar desafíos sociales fundamentales. Sin embargo, como señalan los autores, la *quantum literacy* enfrenta desafíos significativos relacionados con la naturaleza altamente limitada de la disciplina y el acceso restringido al conocimiento poderoso.

Meyer (2023) introduce el marco del Quantum Ethics Project, que proporciona una definición operacional de ética cuántica incluyendo explícitamente consideraciones sobre equidad en el acceso educativo. Este enfoque holístico reconoce que las cuestiones éticas en tecnologías cuánticas no pueden separarse de las dinámicas de poder y exclusión en su desarrollo y difusión. La aproximación pedagógica propuesta incluye áreas temáticas específicamente diseñadas para abordar implicaciones sociales y económicas, aunque requiere mayor desarrollo en la dimensión de género.

La literatura sobre democratización tecnológica ofrece marcos conceptuales adicionales. Seskir et al. (2023) analizan la democratización en tecnologías cuánticas a través de tres teorías de democracia: participativa, representativa y deliberativa. Su hallazgo crítico es que los esfuerzos actuales, aunque necesarios, son insuficientes para considerar el campo verdaderamente democratizado. Particularmente relevante es su observación de que las empresas de computación cuántica emplean conceptos de democratización de manera estrecha y limitada, centrándose principalmente en acceso técnico sin abordar dimensiones estructurales de equidad.

El análisis de Wolbring (2022) sobre la dimensión social en tecnologías cuánticas revela patrones preocupantes de invisibilización. Su scoping review masivo de 362,728 resúmenes técnicos encontró que solo 0.24% mencionaban aspectos sociales, y crucialmente, los frameworks de Equidad, Diversidad e Inclusión estaban completamente ausentes. Esta omisión sistemática en la literatura técnica refleja y refuerza la marginalización de consideraciones de género en el desarrollo del campo.

Damayanti (2024) propone un marco ético comprehensivo que integra principios de

mecánica cuántica y metaética, argumentando que el desarrollo de tecnologías cuánticas requiere esfuerzos coordinados entre stakeholders de múltiples sectores incluyendo tecnología, ética, política y gobernanza. Sin embargo, el framework propuesto necesita mayor elaboración específica sobre cómo abordar sistemáticamente las desigualdades de género en educación y acceso.

La perspectiva de Vermaas (2017) sobre el impacto societal de tecnologías cuánticas emergentes enfatiza la urgencia de hacer comprensible la teoría cuántica para facilitar debate social informado. El autor argumenta que el framing actual de la teoría cuántica como enigmática perjudica el debate societal, pero debe añadirse que este framing también opera como barrera diferenciada por género, dada la investigación sobre cómo las representaciones de ciencia como misterio afectan desproporcionadamente la participación femenina.

Kiesow Cortez et al. (2023) desarrollan un roadmap de política y ética cuántica que reconoce tensiones entre objetivos sociales requiriendo trade-offs difíciles. Su argumento de que mejores políticas deben ser sensibles al contexto de deployment es directamente aplicable a educación cuántica: las intervenciones para equidad de género deben diseñarse considerando contextos educativos, culturales y socioeconómicos específicos.

La literatura sobre impactos de tecnologías emergentes en desarrollo proporciona insights valiosos. Ebua (2023) establece que la implementación tecnológica debe guiarse por consideraciones éticas y compromiso con justicia social, utilizando el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU. Particularmente relevante es su énfasis en colaboración interdisciplinaria y aproximaciones participativas en el desarrollo de soluciones tecnológicas, principios aplicables al diseño de educación cuántica inclusiva.

Juma et al. (2001) analiza la gobernanza global de tecnología en el contexto de necesidades de países en desarrollo, identificando dos categorías de medidas: aquellas adoptadas por países en desarrollo para promover investigación científica e innovación, y medidas en países industrializados para contribuir a resolver problemas en países en desarrollo. Este marco bidireccional es aplicable a cuestiones de género en educación cuántica: se requieren tanto iniciativas en instituciones con recursos como esfuerzos específicos en contextos con mayores barreras estructurales.

La investigación sobre tecnologías de información y comunicación en educación ofrece paralelos instructivos. Rosario (2012) examina la implementación de TIC en educación en países en desarrollo, reconociendo que aunque las TIC son drivers de crecimiento económico y competitividad, su promulgación judiciosa requiere consideración explícita de limitaciones de recursos y necesidades de capacitación. Estos insights son directamente transferibles a la implementación de educación cuántica equitativa.

Dahlman et al. (2016) proporciona tres lecciones clave para estrategias digitales na-

cionales en países en desarrollo: la revolución digital se expande más rápido que ondas anteriores de innovación, puede aprovecharse para crecimiento inclusivo y sustentable, pero requiere planificación estratégica gubernamental para maximizar impacto de desarrollo y garantizar distribución equitativa de beneficios. Estas lecciones son fundamentales para políticas de educación cuántica que busquen evitar reproducir patrones de exclusión observados en digitalizaciones previas.

El marco de Lee (2001) sobre educación para preparación tecnológica enfatiza el papel crítico del capital humano, particularmente en niveles secundario y terciario de educación, en determinar desarrollo tecnológico. Su análisis cross-country demuestra que capital humano interactúa con flujos de tecnología extranjera, contribuyendo a crecimiento tecnológico. Sin embargo, este framework requiere incorporación explícita de consideraciones de género para evitar perpetuar sesgos en acumulación de capital humano.

La investigación sobre innovación verde y desarrollo sostenible de Sharma and Dutz (2012) identifica patrones relevantes: innovaciones de frontera concentradas en países de alta renta, colaboración Sur-Sur limitada, y potencial subutilizado para innovación bottom-of-the-pyramid. Estos patrones se replican en tecnologías cuánticas, con la dimensión de género añadiendo una capa adicional de exclusión que interseca con disparidades geográficas y socioeconómicas.

Middleton (1993) proporciona un marco para entender cómo mejorar skills de fuerza laboral en países en desarrollo, enfatizando que fuerza laboral flexible y entrenada mejora eficiencia económica y políticas apropiadas pueden mejorar eficiencia y equidad en desarrollo de habilidades. Este marco es aplicable a educación cuántica al reconocer que inversiones en formación deben diseñarse explícitamente para promover equidad, no solo eficiencia.

La conceptualización de Kop (2023) de Quantum-ELSPI como metaparadigma conecta investigación en tecnologías cuánticas con cuestiones surgiendo de su introducción societal. Este enfoque inherentemente interdisciplinario es crucial para abordar exclusiones de género, que operan simultáneamente en dimensiones técnicas, institucionales, sociales y culturales.

El análisis de de Wolf (2017) sobre impacto potencial de computadoras cuánticas identifica tres áreas específicas de transformación: criptografía, optimización y simulación de sistemas cuánticos. Cada una de estas áreas requiere fuerza laboral altamente calificada, pero el autor no examina cómo las exclusiones educativas de género limitarán el pipeline de talento disponible, representando una omisión significativa en el análisis de impacto.

Coenen et al. (2022) presentan un manifiesto para prevenir fracasos de implementación en la interfaz ciencia-sociedad para tecnologías cuánticas. Aunque identifican stumbling blocks clave y proponen recomendaciones específicas, el marco requiere incorporación más

explícita de consideraciones de equidad de género para ser verdaderamente comprensivo.

3. Mecanismos de Exclusión en Educación Científica Cuántica

Los mecanismos de exclusión operando en educación científica cuántica son múltiples, interrelacionados y operan en diversos niveles del sistema educativo. Esta sección analiza sistemáticamente estos mecanismos, desde barreras epistémicas y pedagógicas hasta obstáculos institucionales y estructurales.

El primer conjunto de mecanismos se relaciona con la construcción curricular y pedagógica de la educación cuántica. Como señala Nita et al. (2021), la quantum literacy enfrenta desafíos inherentes relacionados con la naturaleza altamente limitada de la disciplina y el acceso restringido a conocimiento poderoso. Estas limitaciones se manifiestan diferenciadamente por género debido a patrones históricos de exclusión en física y matemáticas avanzadas. La representación de la teoría cuántica como fundamentalmente misteriosa o contraintuitiva, aunque técnicamente precisa, puede funcionar como barrera diferenciada por género dado que investigaciones en educación STEM documentan cómo narrativas de dificultad excepcional afectan desproporcionadamente la autoeficacia y persistencia de mujeres estudiantes.

Meyer (2023) documenta el desarrollo de uno de los primeros cursos completos sobre ética e impactos sociales de tecnología cuántica, pero reconoce limitaciones actuales incluyendo desventajas en enseñanza de razonamiento ético. Crucialmente, el curriculum reportado no incorpora explícitamente perspectivas de género, representando una oportunidad perdida para abordar estas dinámicas desde las etapas formativas de educación cuántica.

La invisibilización de científicas cuánticas en materiales educativos y narrativas históricas constituye un mecanismo adicional de exclusión. La ausencia de modelos de referencia femeninos en contenidos curriculares refuerza percepciones de la ciencia cuántica como dominio masculino, afectando aspiraciones y autoeficacia de estudiantes mujeres. Como documenta Wolbring (2022), la ausencia de consideraciones sobre grupos marginalizados en literatura técnica cuántica se extiende también a materiales educativos, perpetuando invisibilización sistemática.

Los sesgos en evaluación y assessment constituyen mecanismos sutiles pero potentes de exclusión. La investigación en educación STEM ha documentado extensamente cómo formatos de evaluación, criterios de excelencia y feedback pedagógico pueden incorporar sesgos de género. En educación cuántica, donde la evaluación frecuentemente enfatiza rapidez en resolución de problemas abstractos y competitividad en contextos de alta

presión, estos sesgos pueden manifestarse con particular intensidad.

Arrow et al. (2023) introducen el Quantum Ethics Project con filosofía organizadora que incluye learning outcomes clave y áreas temáticas, pero el reporte no detalla cómo estos elementos abordan específicamente dinámicas de género en educación cuántica. Esta omisión es particularmente significativa dado que los autores reconocen explícitamente que el campo de ética cuántica está en etapas tempranas de desarrollo, presentando oportunidad crítica para incorporar consideraciones de género desde sus fundamentos.

La falta de infraestructura educativa accesible representa una barrera material significativa. El acceso a laboratorios cuánticos, simuladores computacionales y recursos educativos especializados está altamente concentrado en instituciones de élite en países de alta renta. Como documenta Seskir et al. (2023), aunque existen esfuerzos de democratización incluyendo acceso cloud a computadoras cuánticas, estos esfuerzos son insuficientes y no abordan sistemáticamente barreras de género que intersectan con limitaciones de acceso material.

Los mecanismos de exclusión en mentoría y networking profesional son particularmente perniciosos. La investigación sobre desarrollo de workforce cuántica de Peterssen (2020) identifica la necesidad de fuerza laboral especializada pero no examina cómo redes profesionales homogéneas y falta de mentoría para mujeres limitan el desarrollo de talento femenino. Las comunidades científicas cuánticas, históricamente dominadas por hombres, pueden inadvertidamente perpetuar dinámicas de exclusión a través de patrones informales de colaboración, recomendación y sponsorship.

Vermaas (2017) argumenta por la urgencia de hacer comprensible la teoría cuántica para facilitar debate societal informado, pero esta comprensibilidad debe construirse de maneras que no reproduzcan sesgos de género en comunicación científica. La popularización de ciencia cuántica frecuentemente emplea metáforas, narrativas y ejemplos que pueden reforzar estereotipos de género sobre quién pertenece en campos científicos avanzados.

Los mecanismos de exclusión operan también a través de la socialización disciplinaria. La construcción de identidad científica en campos cuánticos puede involucrar normas culturales, prácticas comunicativas y expectativas de comportamiento que reflejan valores masculinizados, creando ambientes inhóspitos para mujeres. Como documenta la literatura sobre clima departamental en física, estos factores ambientales sutiles pero persistentes contribuyen significativamente a attrition diferencial de mujeres en campos STEM.

Possati (2024) desarrolla una aproximación hermenéutica que distingue tres niveles en creación de significados sociales para tecnologías cuánticas: ficciones, popularización y periodismo científico. Cada nivel puede incorporar y reforzar sesgos de género. Las representaciones ficcionales de científicos cuánticos predominantemente masculinos, la popula-

rización que emplea ejemplos y lenguaje genderizados, y el periodismo científico que cita desproporcionadamente fuentes masculinas, todos contribuyen a construcción de educación cuántica como espacio masculino.

La falta de políticas institucionales explícitas sobre equidad de género en programas de educación cuántica representa un mecanismo de exclusión por omisión. Sin requisitos específicos para monitorear participación de género, implementar intervenciones correctivas o evaluar efectividad de iniciativas de inclusión, las instituciones educativas perpetúan inequidades por defecto. Damayanti (2024) argumenta que desarrollo responsable de tecnologías cuánticas requiere esfuerzos coordinados entre múltiples sectores, pero estos esfuerzos deben incluir explícitamente objetivos de equidad de género para ser efectivos.

Los mecanismos de exclusión financiera constituyen barreras adicionales significativas. Los costos asociados con educación cuántica avanzada, incluyendo matrícula, materiales especializados y oportunidades de investigación no remunerada, intersectan con disparidades de género en recursos financieros y responsabilidades de cuidado. La investigación sobre barreras económicas en educación STEM ha documentado cómo estas limitaciones afectan desproporcionadamente a mujeres, particularmente aquellas de backgrounds socioeconómicos desfavorecidos.

Kiesow Cortez et al. (2023) desarrollan un roadmap de política y ética cuántica reconociendo tensiones entre objetivos sociales, pero el roadmap requiere mayor elaboración sobre cómo tensiones específicas relacionadas con equidad de género deben navegarse en contextos educativos. Las decisiones sobre asignación de recursos, diseño curricular y criterios de admisión involucran trade-offs que impactan diferenciadamente por género.

La temporalidad de educación cuántica presenta mecanismos adicionales de exclusión. Los programas educativos frecuentemente asumen trayectorias lineales y continuas que no acomodan interrupciones relacionadas con responsabilidades de cuidado, desproporcionadamente asumidas por mujeres. La falta de flexibilidad en programación, ausencia de opciones part-time en niveles avanzados, y penalizaciones implícitas por gaps en trayectorias educativas, todos contribuyen a attrition diferencial de mujeres.

Ebua (2023) enfatiza que implementación tecnológica debe guiarse por consideraciones éticas y compromiso con justicia social, principios directamente aplicables a diseño de educación cuántica. Sin embargo, la traducción de estos principios abstractos en prácticas educativas concretas requiere atención específica a mecanismos de exclusión de género operando en múltiples niveles del sistema educativo.

Los mecanismos de exclusión epistémica son particularmente insidiosos. La definición de qué constituye conocimiento legítimo en campos cuánticos, qué preguntas de investigación son valoradas, y qué aproximaciones metodológicas son consideradas rigurosas, pueden reflejar sesgos de género en la construcción del conocimiento científico. La margi-

nalización de perspectivas interdisciplinarias, la desvalorización de aplicaciones sociales, y la priorización de teoría abstracta sobre implementación práctica, pueden todas funcionar como mecanismos de exclusión diferenciados por género.

4. Barreras Institucionales y Estructurales

Las barreras institucionales y estructurales en educación científica cuántica operan a nivel sistémico, configurando el terreno sobre el cual se desarrollan las trayectorias educativas individuales. Estas barreras son particularmente perniciosas porque frecuentemente aparecen como neutrales respecto al género, ocultando sus efectos diferenciados sistemáticos.

La estructura departamental de instituciones académicas constituye una barrera fundamental. Los programas de física cuántica típicamente residen en departamentos de física, que históricamente exhiben algunos de los ratios de género más desequilibrados en STEM. Como documenta Wolbring (2022) en su análisis masivo de literatura cuántica, la ausencia de consideraciones sobre equidad, diversidad e inclusión no es accidental sino reflejo de culturas departamentales que normalizan homogeneidad demográfica. Esta normalización crea ambientes donde mujeres estudiantes experimentan aislamiento, falta de sentido de pertenencia y microagresiones cotidianas.

Seskir et al. (2023) identifican que empresas de computación cuántica emplean conceptos de democratización de manera estrecha, centrándose en acceso técnico sin abordar dimensiones estructurales de equidad. Esta limitación se replica en instituciones educativas, donde iniciativas de acceso abierto a recursos cuánticos no van acompañadas de intervenciones para abordar barreras estructurales que impiden que mujeres aprovechen estos recursos efectivamente.

Las estructuras de financiamiento para educación e investigación cuántica incorporan sesgos de género sistemáticos. La investigación sobre asignación de becas y subsidios en STEM ha documentado extensamente cómo procesos de evaluación aparentemente meritocráticos producen resultados inequitativos. En campos cuánticos, donde financiamiento es altamente competitivo y concentrado, estos sesgos se amplifican. Peterssen (2020) documenta la necesidad de workforce cuántica especializada pero no examina cómo inequidades en financiamiento limitan el desarrollo de talento femenino en el pipeline educativo.

Las políticas de admisión a programas avanzados de física cuántica frecuentemente priorizan criterios que correlacionan con privilegio socioeconómico y cultural. Énfasis en puntajes de exámenes estandarizados, background en física avanzada desde educación secundaria, y experiencia previa en investigación, todos favorecen desproporcionadamente a estudiantes de backgrounds privilegiados donde hombres están sobrerrepresentados. Como

argumenta Lee (2001), aunque capital humano en niveles secundario y terciario es crítico para preparación tecnológica, las estrategias para construir este capital deben diseñarse explícitamente para promover equidad de género.

Meyer (2023) reporta el desarrollo de uno de los primeros cursos sobre ética e impactos sociales de tecnología cuántica, pero incluso este desarrollo curricular innovador opera dentro de estructuras institucionales que pueden limitar su efectividad. La ubicación de cursos sobre ética cuántica como electivos marginales en lugar de componentes centrales del curriculum, la falta de integración con formación técnica core, y la ausencia de incentivos institucionales para participación estudiantil, todas limitan el impacto potencial de estas iniciativas.

Las estructuras de mentoría y supervisión en programas de posgrado cuánticos presentan barreras adicionales. La concentración de faculty senior en hombres significa que mujeres estudiantes frecuentemente carecen de mentores del mismo género, limitando acceso a modelos de referencia, networks profesionales y understanding de dinámicas de género en el campo. Arrow et al. (2023) introducen el Quantum Ethics Project pero no detallan cómo su estructura aborda sistemáticamente necesidades de mentoría diferenciadas por género.

La organización temporal de educación cuántica incorpora asunciones estructurales que desfavorecen a mujeres. Los programas de doctorado en física típicamente requieren cinco o más años de dedicación tiempo completo durante años críticos para decisiones reproductivas. La falta de políticas institucionales robustas sobre licencias parentales, cuidado infantil subsidiado y flexibilidad en timelines de graduación, crea barreras estructurales desproporcionadamente enfrentadas por mujeres.

Vermaas (2017) argumenta por hacer comprensible la teoría cuántica, pero la comprensibilidad debe construirse dentro de estructuras educativas que no perpetúen exclusiones. Las estructuras curriculares que asumen conocimiento previo específico, la organización de cursos que no acomoda responsabilidades de cuidado, y los formatos pedagógicos que privilegian ciertos estilos de aprendizaje, todos pueden funcionar como barreras estructurales diferenciadas por género.

Las políticas institucionales sobre acoso y discriminación, aunque formalmente existentes, frecuentemente son inadecuadas para abordar dinámicas específicas de campos altamente masculinizados como física cuántica. Los mecanismos de reporte pueden ser intimidantes, los procesos de investigación largos e inciertos, y las consecuencias para perpetradores mínimas. Esta inadecuación estructural en protecciones crea ambientes donde mujeres estudiantes pueden experimentar hostilidad sin recursos institucionales efectivos.

Possati (2024) desarrolla una aproximación hermenéutica que distingue niveles de creación de significados sociales, pero esta creación ocurre dentro de estructuras institucionales

de comunicación científica que pueden marginalizar voces femeninas. Las estructuras de publicación académica, presentación en conferencias y diseminación de investigación, todas incorporan sesgos de género documentados que limitan visibilidad de contribuciones de mujeres científicas cuánticas.

La estructura de colaboraciones internacionales en investigación cuántica presenta barreras adicionales. Como documenta Sharma and Dutz (2012) para innovación verde, la colaboración Sur-Sur es muy limitada, un patrón que se replica en tecnologías cuánticas con la dimensión de género añadiendo complejidad adicional. Las redes internacionales de investigación cuántica, críticas para desarrollo profesional, son altamente genderizadas, limitando acceso de mujeres a oportunidades de colaboración prestigiosas.

Las estructuras de evaluación y promoción académica en instituciones que albergan programas cuánticos frecuentemente valoran desproporcionadamente métricas que favorecen a hombres. Énfasis en cantidad de publicaciones sobre calidad, valorización de autoría individual sobre colaboración, y priorización de investigación teórica sobre aplicaciones, pueden todas constituir barreras estructurales para progreso de mujeres en campos cuánticos.

Damayanti (2024) propone un marco ético comprehensivo para tecnologías cuánticas, pero la implementación de este marco requiere cambios estructurales institucionales significativos. Las instituciones deben crear estructuras de gobernanza que incluyan explícitamente consideraciones de equidad de género, establecer mecanismos de accountability para progreso hacia objetivos de diversidad, y asignar recursos adecuados para iniciativas de inclusión.

Las barreras estructurales en acceso a infraestructura física son particularmente significativas. Los laboratorios cuánticos requieren inversiones masivas en equipamiento especializado, típicamente concentrado en instituciones de élite. Como documenta Seskir et al. (2023), aunque cloud computing cuántico ofrece acceso remoto, este acceso no elimina barreras para aquellos sin formación previa adecuada o networks profesionales para navegar estos recursos efectivamente.

La estructura de incentivos para faculty en departamentos que albergan programas cuánticos raramente prioriza trabajo en diversidad e inclusión. Faculty que invierten tiempo significativo en mentoría de estudiantes subrepresentados, desarrollo de curricula inclusivos o servicio en comités de equidad, frecuentemente encuentran este trabajo subvalorado en procesos de tenure y promoción. Esta estructura de incentivos perpetúa sistemas donde mejorar equidad de género queda como responsabilidad marginalizada.

Kiesow Cortez et al. (2023) desarrollan un roadmap que reconoce tensiones entre objetivos sociales, pero navegar estas tensiones requiere estructuras institucionales capaces de balancear múltiples valores. Las instituciones necesitan mecanismos estructurales pa-

ra identificar cuando decisiones aparentemente técnicas sobre curriculum, admisiones o financiamiento tienen implicaciones diferenciadas por género, y procesos para adjudicar entre objetivos potencialmente conflictivos.

Las estructuras de *partnerships* entre academia e industria cuántica pueden amplificar exclusiones de género. La industria cuántica emergente exhibe ratios de género altamente sesgados, y *partnerships* que enfatizan *placement* de estudiantes en industria pueden inadvertidamente canalizar recursos hacia estudiantes hombres más fácilmente absorbidos por estas compañías. Sin atención estructural explícita a equidad, estos *partnerships* pueden exacerbar disparidades.

5. Dimensiones Socioculturales de la Exclusión

Las dimensiones socioculturales de exclusión en educación científica cuántica operan a través de normas, valores, creencias y prácticas compartidas que configuran quien es percibido como perteneciente legítimamente en el campo. Estas dimensiones son particularmente insidiosas porque frecuentemente operan inconscientemente, naturalizando patrones de exclusión como inevitables o meritocráticos.

La construcción cultural de la física cuántica como dominio inherentemente masculino constituye una barrera fundamental. Las representaciones mediáticas, narrativas históricas y discursos populares sobre física cuántica consistentemente presentan el campo como poblado por genios masculinos solitarios. Como documenta Possati (2024), la creación de significados sociales para tecnologías cuánticas opera en múltiples niveles incluyendo ficciones y popularización, cada uno potencialmente reforzando asociaciones de género que excluyen a mujeres.

Possati (2024) introduce el concepto de *quantum literacy* enfatizando su rol en abordar investigación transdisciplinaria sobre problemas complejos de sostenibilidad. Sin embargo, la construcción sociocultural de quien posee capacidad para esta *literacy* frecuentemente se encuentra *genderizada*. Las asunciones culturales sobre brillantez innata, capacidad matemática y pensamiento abstracto, todas documentadas como estereotipadas por género, operan con particular fuerza en campos cuánticos donde la complejidad matemática y conceptual es enfatizada.

Los estereotipos sobre intereses y capacidades de género constituyen mecanismos potentes de exclusión sociocultural. La asociación cultural entre masculinidad e interés en física, particularmente física teórica abstracta, comienza en etapas tempranas de socialización y se refuerza a través de múltiples instituciones sociales. Estos estereotipos afectan aspiraciones educativas de mujeres jóvenes, autoeficacia en materias relevantes y persistencia frente a dificultades académicas.

Vermaas (2017) argumenta que el framing de teoría cuántica como enigmática perjudica debate societal, pero debe añadirse que este framing también tiene dimensiones de género. Las narrativas culturales que presentan ciencia cuántica como misteriosamente difícil pueden funcionar como discouraging para mujeres dado que investigación documenta cómo percepciones de dificultad interactúan con estereotipos de género para afectar participación.

Las normas culturales sobre expresión de competencia en ambientes académicos presentan barreras adicionales. La cultura de muchos departamentos de física valoriza estilos de interacción agresivamente competitivos, auto-promoción constante y displays públicos de brillantez. Estas normas culturales, aunque presentadas como neutrales, reflejan valores masculinizados que pueden alienar a mujeres estudiantes socializadas en normas de modestia y colaboración.

Meyer (2023) documenta desarrollo de educación en ética cuántica, pero incluso estos esfuerzos operan dentro de culturas disciplinarias más amplias que pueden marginalizar perspectivas éticas y sociales como menos rigurosas o centrales que trabajo técnico. La jerarquía cultural implícita entre trabajo teórico puro y aplicaciones prácticas, entre física fundamental y consideraciones sociales, puede desincentivar participación de estudiantes interesados en dimensiones sociales de tecnologías cuánticas.

Las dinámicas de microagresiones en ambientes educativos cuánticos constituyen formas cotidianas de exclusión sociocultural. Comentarios sobre apariencia en lugar de contribuciones intelectuales, asunciones de menor competencia técnica, atribución de éxitos a factores externos y errores a capacidad inherente, todos contribuyen a ambientes hostiles. Como documenta Wolbring (2022), la ausencia casi total de consideraciones sobre grupos marginalizados en literatura técnica cuántica refleja y refuerza normalización de homogeneidad demográfica.

Las prácticas culturales de networking y socialización profesional en comunidades cuánticas frecuentemente excluyen sutilmente a mujeres. Eventos sociales en bares, actividades deportivas masculinizadas, y conversaciones dominadas por hombres sobre tópicos específicos, pueden crear barreras informales para construcción de relaciones profesionales críticas para desarrollo de carrera. Estas prácticas, aunque aparentemente periféricas a educación técnica, son fundamentales para integración en comunidades científicas.

Arrow et al. (2023) introducen el Quantum Ethics Project con filosofía organizadora, pero la implementación efectiva requiere transformación de culturas disciplinarias más amplias. Las culturas que valoran exclusivamente producción técnica sobre reflexión ética, que marginalizan perspectivas interdisciplinarias, y que normalizan homogeneidad demográfica, todas limitan efectividad de iniciativas educativas innovadoras.

Las representaciones mediáticas de científicos cuánticos perpetúan estereotipos de

género dañinos. Las películas, programas de televisión y cobertura periodística de descubrimientos cuánticos consistentemente presentan protagonistas masculinos, reforzando asociaciones culturales entre masculinidad y excelencia en física cuántica. Estas representaciones afectan aspiraciones de mujeres jóvenes y percepciones de sus capacidades por educadores y pares.

Possati (2024) distingue tres niveles de creación de significados sociales para tecnologías cuánticas, cada uno con potencial para reforzar exclusiones de género. Las ficciones que presentan científicos cuánticos como genios masculinos antisociales, la popularización que emplea lenguaje y metáforas genderizadas, y el periodismo científico que cita desproporcionadamente fuentes masculinas, todos contribuyen a construcción cultural del campo como masculino.

Las expectativas culturales sobre balance trabajo-vida presentan barreras diferenciadas por género. La cultura de muchos programas de física cuántica glorifica dedicación exclusiva, jornadas laborales extendidas y sacrificio de vida personal por avance científico. Estas expectativas culturales son incompatibles con responsabilidades de cuidado desproporcionadamente asumidas por mujeres, creando tensiones entre identidad científica y identidad de género.

Seskir et al. (2023) documentan que esfuerzos actuales de democratización en tecnologías cuánticas son insuficientes, una limitación que se extiende a dimensiones socioculturales. La democratización técnica sin transformación de culturas científicas que normalizan exclusión simplemente hace más accesible participación en ambientes hostiles. Democratización efectiva requiere cambios culturales profundos en cómo comunidades cuánticas definen pertenencia, valoran diversidad y construyen ambientes inclusivos.

Las normas culturales sobre comunicación científica en campos cuánticos pueden excluir sutilmente. Los estilos de presentación valorizados en conferencias cuánticas, los formatos de papers académicos privilegiados, y las formas de argumentación consideradas rigurosas, pueden todos reflejar preferencias culturales masculinizadas que marginalizan aproximaciones comunicativas alternativas.

Damayanti (2024) propone framework ético para tecnologías cuánticas argumentando por estrategia comprehensiva priorizando cuestiones éticas, pero la implementación requiere transformación de culturas que frecuentemente ven consideraciones éticas como obstáculos a progreso técnico. Las culturas científicas que valoran velocidad de innovación sobre reflexión ética, que priorizan aplicaciones comerciales sobre impactos sociales, y que marginalizan voces críticas como anti-progreso, todas limitan adopción de frameworks éticos inclusivos.

Las dinámicas de reconocimiento y atribución en comunidades cuánticas exhiben sesgos culturales de género. Las contribuciones de mujeres científicas son más frecuentemente

atribuidas a colaboradores masculinos, minimizadas como asistencia técnica en lugar de liderazgo intelectual, y menos probables de recibir citación apropiada. Estas dinámicas culturales de reconocimiento afectan no solo visibilidad sino también autoeficacia y sentido de pertenencia de mujeres en el campo.

6. Iniciativas y Propuestas para la Inclusión

La superación de los mecanismos de exclusión documentados en secciones previas requiere intervenciones deliberadas, sistemáticas y multinivel. Esta sección examina iniciativas existentes y propone estrategias adicionales para promover equidad de género en educación científica cuántica.

Las reformas curriculares constituyen un punto de partida fundamental. Meyer (2023) documenta el desarrollo de uno de los primeros cursos sobre ética e impactos sociales de tecnología cuántica, representando un modelo valioso pero que requiere expansión. Los currícula de educación cuántica deben integrar sistemáticamente perspectivas sobre equidad, diversidad e inclusión no como contenido marginal sino como dimensión central de formación científica. Esto incluye visibilización de contribuciones históricas de mujeres científicas, análisis de implicaciones sociales diferenciadas por género de tecnologías cuánticas, y desarrollo de competencias para trabajo en equipos diversos.

? propone quantum literacy como marco para abordar investigación transdisciplinaria sobre problemas complejos de sostenibilidad. Este enfoque puede aprovecharse para equidad de género desarrollando materiales educativos que demuestren cómo diversidad de perspectivas fortalece investigación científica. Los currícula deben incorporar ejemplos de cómo consideraciones de género han enriquecido investigación en otros campos científicos, estableciendo precedentes para su relevancia en contextos cuánticos.

Las iniciativas de mentoría estructurada representan intervenciones críticas. Los programas deben incluir matching deliberado entre mujeres estudiantes y mentores que comprenden dinámicas de género en campos STEM, entrenamiento formal para mentores sobre sesgos implícitos y mejores prácticas de mentoría inclusiva, y mecanismos de accountability para evaluar calidad de relaciones de mentoría. Arrow et al. (2023) introducen el Quantum Ethics Project que podría expandirse para incluir componentes explícitos de mentoría de género.

Las modificaciones a políticas de admisión pueden reducir barreras estructurales. Las instituciones deben considerar evaluación holística que valore diversidad de experiencias y backgrounds, reducción de peso de exámenes estandarizados que correlacionan con privilegio, y outreach proactivo a mujeres estudiantes en etapas tempranas del pipeline educativo. Como argumenta Lee (2001), la construcción de capital humano para preparación

tecnológica debe diseñarse explícitamente para promover equidad.

Seskir et al. (2023) documentan limitaciones de esfuerzos actuales de democratización en tecnologías cuánticas, sugiriendo necesidad de aproximaciones más comprehensivas. Las iniciativas de acceso deben complementarse con programas de apoyo que aborden barreras estructurales específicas enfrentadas por mujeres. Esto incluye becas dirigidas, subsidios para cuidado infantil, y flexibilidad en requerimientos temporales de programas.

Las iniciativas de desarrollo profesional para faculty son esenciales. Los programas de entrenamiento sobre sesgos implícitos, pedagogía inclusiva y construcción de ambientes equitativos deben ser obligatorios y regularmente actualizados. Vermaas (2017) argumenta por hacer comprensible la teoría cuántica, esfuerzo que debe incluir preparación de educadores para comunicar de maneras que no perpetúen exclusiones de género.

Las modificaciones a estructuras de financiamiento pueden promover equidad. Las agencias de financiamiento deben implementar evaluación ciega de género en procesos de revisión, establecer objetivos explícitos para distribución equitativa de recursos, y requerir que propuestas demuestren consideración de equidad de género. Como documenta Petersen (2020), el desarrollo de workforce cuántica requiere inversión, pero esta inversión debe distribuirse equitativamente.

Possati (2024) desarrolla aproximación hermenéutica para tecnologías cuánticas que podría aprovecharse para diseñar comunicación científica más inclusiva. Las iniciativas deben incluir entrenamiento para científicos en comunicación que evite reforzar estereotipos de género, desarrollo de materiales de popularización que presenten diversidad de protagonistas, y monitoreo de representaciones mediáticas de ciencia cuántica para identificar sesgos.

Las colaboraciones entre instituciones pueden amplificar impacto de iniciativas individuales. Las redes de instituciones comprometidas con equidad en educación cuántica pueden compartir mejores prácticas, desarrollar recursos curriculares colaborativamente, y crear oportunidades de investigación para estudiantes de instituciones con recursos limitados. Sharma and Dutz (2012) documenta limitaciones de colaboración Sur-Sur en innovación verde, patrón que debe evitarse en educación cuántica mediante construcción deliberada de redes inclusivas.

Las políticas institucionales sobre clima y cultura departamental son fundamentales. Las instituciones deben establecer mecanismos robustos para reportar y abordar acoso y discriminación, conducir evaluaciones regulares de clima departamental, y vincular financiamiento y recursos a progreso demostrable en equidad. Damayanti (2024) argumenta por estrategia comprehensiva priorizando cuestiones éticas, principio aplicable a construcción de ambientes educativos equitativos.

Las iniciativas de pipeline temprano son críticas para expandir pool de mujeres intere-

sadas en física cuántica. Los programas de verano para estudiantes de secundaria, camps de ciencia con énfasis en aplicaciones sociales de tecnologías cuánticas, y partnerships con escuelas en comunidades subrepresentadas, pueden todos contribuir a desarrollo de interés y autoeficacia en etapas formativas.

Kiesow Cortez et al. (2023) desarrollan roadmap de política y ética cuántica que reconoce necesidad de sensibilidad contextual. Las intervenciones para equidad deben diseñarse considerando contextos institucionales, culturales y geográficos específicos. Las aproximaciones one-size-fits-all son inadecuadas; instituciones necesitan flexibilidad para adaptar iniciativas a sus circunstancias particulares mientras mantienen accountability hacia objetivos de equidad.

Las modificaciones a prácticas de evaluación y assessment pueden reducir sesgos. Las instituciones deben diversificar formatos de evaluación para valorar múltiples formas de demostrar competencia, implementar rubrics claras y transparentes, y entrenar evaluadores en reconocimiento y mitigación de sesgos. La evaluación debe valorar no solo velocidad y competitividad sino también profundidad de comprensión, creatividad en resolución de problemas, y capacidad de colaboración.

Las iniciativas de visibilización de mujeres científicas cuánticas son esenciales para construir modelos de referencia. Las instituciones deben invitar activamente mujeres speakers a seminarios y conferencias, destacar investigación de mujeres científicas en materiales educativos, y crear espacios para que mujeres estudiantes interactúen con profesionales exitosas. Wolbring (2022) documenta invisibilización sistemática de grupos marginalizados en literatura cuántica, patrón que debe revertirse mediante esfuerzos deliberados de representación.

Las políticas de balance trabajo-vida son críticas para retención. Las instituciones deben implementar políticas robustas de licencia parental, provisiones para cuidado infantil, y flexibilidad en timelines de programas para acomodar responsabilidades de cuidado. Estas políticas no deben presentarse como excepciones especiales sino como componentes normales de programas inclusivos.

Ebua (2023) enfatiza que implementación tecnológica debe guiarse por consideraciones éticas y compromiso con justicia social, principios que deben extenderse a diseño de educación. Las iniciativas deben evaluarse no solo por métricas de participación sino por su efectividad en crear ambientes verdaderamente inclusivos donde mujeres puedan prosperar sin adaptarse a normas masculinizadas.

Las colaboraciones entre academia e industria cuántica deben estructurarse para promover equidad. Las partnerships deben incluir requisitos explícitos sobre diversidad en placements, mentoría para mujeres estudiantes interesadas en carreras industriales, y monitoreo de outcomes de empleo desagregados por género. Sin accountability estructural,

estas colaboraciones pueden exacerbar disparidades.

La investigación continua sobre equidad en educación cuántica es esencial. Las instituciones deben invertir en investigación que documente patrones de participación, identifique barreras emergentes, y evalúe efectividad de intervenciones. Esta investigación debe ser conducida con participación de mujeres científicas y estudiantes, asegurando que análisis refleje experiencias vividas de aquellos más afectados por exclusiones.

7. Conclusiones

El análisis desarrollado en este artículo revela que la exclusión de las mujeres de la educación científica cuántica no es accidental ni inevitable, sino producto de mecanismos sistemáticos operando en múltiples niveles del sistema educativo y científico. Estos mecanismos, desde sesgos curriculares hasta barreras institucionales y dinámicas socioculturales, constituyen un sistema integrado de exclusión que perpetúa desigualdades históricas en campos científicos avanzados.

La evidencia presentada demuestra que las tecnologías cuánticas, pese a su carácter emergente y potencial transformador, están replicando patrones de exclusión de género observados en revoluciones tecnológicas previas. Como documenta Wolbring (2022), la ausencia casi total de consideraciones sobre equidad, diversidad e inclusión en literatura técnica cuántica no es anomalía sino reflejo de la normalización de homogeneidad demográfica en el campo. Esta normalización amenaza con consolidar las tecnologías cuánticas como dominio masculino, limitando tanto el desarrollo del talento disponible como la capacidad de estas tecnologías para servir necesidades sociales diversas.

El análisis de mecanismos de exclusión revela su carácter multidimensional e interrelacionado. Las barreras epistémicas en construcción curricular interactúan con limitaciones estructurales en financiamiento e infraestructura, mientras dinámicas socioculturales de estereotipos y normas masculinizadas operan transversalmente a todos los niveles. Esta complejidad implica que intervenciones aisladas son insuficientes; se requieren aproximaciones sistemáticas que aborden simultáneamente múltiples dimensiones de exclusión.

El marco conceptual de Seskir et al. (2023) sobre democratización de tecnologías cuánticas proporciona lente útil para evaluar limitaciones actuales. Su hallazgo de que esfuerzos de democratización son necesarios pero insuficientes es directamente aplicable a equidad de género en educación cuántica. El acceso técnico a recursos, aunque importante, no constituye democratización genuina sin transformación de estructuras y culturas que normalizan exclusión. La democratización efectiva requiere cambios profundos en cómo se construye, valora y transmite conocimiento cuántico.

Las iniciativas propuestas en este artículo, desde reformas curriculares hasta modifi-

caciones institucionales y transformaciones culturales, representan conjunto comprehensivo pero no exhaustivo de intervenciones necesarias. La implementación efectiva requiere compromiso institucional sostenido, asignación de recursos adecuados, y mecanismos robustos de accountability. Como argumenta Damayanti (2024), el desarrollo responsable de tecnologías cuánticas requiere esfuerzos coordinados entre múltiples sectores, principio igualmente aplicable a construcción de educación cuántica equitativa.

La temporalidad de intervenciones es crítica. Las tecnologías cuánticas se encuentran en etapa relativamente temprana de desarrollo, presentando oportunidad única para incorporar consideraciones de equidad desde fundamentos del campo. Como advierte de Jong (2022), las tecnologías sistémicas requieren estrategias anticipatorias; esperar hasta que patrones de exclusión estén completamente consolidados hará significativamente más difícil su reversión. La acción deliberada ahora puede prevenir consolidación de inequidades que posteriormente serían extraordinariamente costosas de remediar.

El análisis también revela tensiones inherentes que deben navegarse cuidadosamente. La urgencia de desarrollar workforce cuántica documentada por Peterssen (2020) puede crear presión para priorizar velocidad sobre equidad. Sin embargo, esta sería falsa dicotomía: la exclusión de la mitad del talento potencial limita fundamentalmente la capacidad de desarrollo del campo. La equidad y la excelencia no son objetivos competitivos sino mutuamente constitutivos.

Las implicaciones de este análisis se extienden más allá de educación cuántica específicamente. Los patrones documentados son emblemáticos de dinámicas más amplias en desarrollo de tecnologías emergentes. La inteligencia artificial, biotecnología y otras fronteras científicas enfrentan desafíos similares de exclusión. Las lecciones de educación cuántica pueden informar aproximaciones a equidad en estos campos relacionados, mientras experiencias de otros dominios tecnológicos pueden enriquecer estrategias para tecnologías cuánticas.

La interseccionalidad constituye dimensión crítica que requiere mayor atención en investigación futura. Este análisis ha centrado género, pero las exclusiones operan interseccionalmente con raza, clase, geografía, discapacidad y otras dimensiones de identidad social. Las mujeres de color, mujeres de países de bajos ingresos, y mujeres con discapacidades enfrentan barreras compuestas que este análisis solo ha podido abordar parcialmente. La investigación futura debe desarrollar comprensión más sofisticada de cómo múltiples sistemas de opresión interactúan en educación científica cuántica.

El rol de políticas públicas merece énfasis particular. Como argumenta Kiesow Cortez et al. (2023), las políticas efectivas deben ser sensibles al contexto de deployment. Los gobiernos pueden incentivar equidad en educación cuántica mediante financiamiento condicionado a demostración de progreso en diversidad, requisitos de reporting sobre par-

ticipación de género, y apoyo para desarrollo de capacidad institucional en equidad. Las políticas educativas nacionales deben incorporar explícitamente preparación para tecnologías cuánticas con atención deliberada a equidad de género.

Las colaboraciones internacionales presentan tanto oportunidades como desafíos. La concentración de recursos para educación cuántica en países de alta renta crea geografías desiguales de acceso, con mujeres de países en desarrollo enfrentando barreras compuestas. Como documenta Sharma and Dutz (2012), la colaboración Sur-Sur en innovación tecnológica es limitada. Las iniciativas internacionales deben diseñarse deliberadamente para promover tanto equidad geográfica como equidad de género, reconociendo que estas dimensiones interactúan.

El carácter transdisciplinario de tecnologías cuánticas, enfatizado por *Q* en su concepto de quantum literacy, ofrece oportunidades para aproximaciones pedagógicas más inclusivas. La integración de perspectivas de ciencias sociales, humanidades y campos aplicados puede hacer educación cuántica más acogedora para estudiantes con diversos intereses y backgrounds. Esta transdisciplinariedad también puede facilitar el cuestionamiento de normas disciplinarias masculinizadas que caracterizan física tradicional.

El análisis presentado subraya que la construcción de educación científica cuántica equitativa no es responsabilidad exclusiva de mujeres en el campo o de especialistas en equidad. Requiere compromiso de toda la comunidad científica cuántica, desde estudiantes hasta líderes institucionales, desde investigadores técnicos hasta formuladores de políticas. La transformación necesaria es colectiva y debe involucrar a aquellos que actualmente disfrutaban de privilegio en el sistema existente.

Las limitaciones de este análisis sugieren direcciones para investigación futura. El estudio ha sido predominantemente teórico, basado en análisis de literatura existente. La investigación empírica cuantitativa sobre patrones de participación de género en programas de educación cuántica específicos, complementada por investigación cualitativa sobre experiencias vividas de mujeres estudiantes, enriquecería significativamente comprensión de estos fenómenos. Los estudios longitudinales que rastreen trayectorias de mujeres en pipeline cuántico desde educación temprana hasta carreras profesionales serían particularmente valiosos.

La urgencia de abordar exclusiones de género en educación cuántica no puede subestimarse. Las decisiones tomadas ahora sobre estructura, cultura y políticas de educación cuántica tendrán consecuencias duraderas. La consolidación de tecnologías cuánticas como dominio masculino limitaría no solo oportunidades individuales para mujeres sino también la capacidad colectiva de la sociedad para desarrollar y gobernar estas tecnologías de maneras que sirvan intereses diversos. La equidad de género en educación cuántica no es cuestión periférica sino central para la realización del potencial transformador de estas

tecnologías para beneficio de toda la humanidad.

El camino hacia educación científica cuántica verdaderamente inclusiva será largo y requerirá esfuerzo sostenido. Sin embargo, la alternativa de perpetuar exclusiones es inaceptable tanto por razones de justicia como de eficacia científica y tecnológica. La comunidad científica cuántica, las instituciones educativas, los formuladores de políticas y la sociedad en general enfrentan elección clara: actuar deliberada y sistemáticamente para construir equidad, o permitir por omisión la consolidación de un campo que replica y amplifica desigualdades históricas. Este análisis ha buscado iluminar los contornos de esta elección y proporcionar fundamentos para acción informada y efectiva.

Referencias

- Arrow, J. , Marsh, S. E., and Meyer, J. C. (2023). A holistic approach to quantum ethics education. In *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, pages 119–128. IEEE.
- Bulatova, O., Reznikova, N., and Ivashchenko, O. (2023). Digital divide or digital inequality? new dimensions of global asymmetries of socio-economic development and international trade in the conditions of technoglobalism. *Visnik Marùupolskogo deržavnogo unìversitetu Seriâ Ekonomika*, 13(25):45–57.
- Coenen, C., Grinbaum, A., Grunwald, A., Milburn, C., and Vermaas, P. (2022). Quantum technologies and society: Towards a different spin. *NanoEthics*, 16(1):1–6.
- Dahlman, C. J., Mealy, S., and Wermelinger, M. (2016). Harnessing the digital economy for developing countries. Technical report, Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD).
- Damayanti, C. (2024). Quantum ethics: Navigating the intersection of quantum mechanics and metaethics in the digital era for a just and equitable society. *Jurnal Filsafat*, 34(2):210.
- de Jong, E. (2022). Own the unknown: An anticipatory approach to prepare society for the quantum age. *Digital Society*, 1(2).
- de Wolf, R. (2017). The potential impact of quantum computers on society. *Ethics and Information Technology*, 19(4):271–276.
- Ebua, E. J. (2023). Investigating the potential of technology to promote development and the ethical and social implications of technological innovation in the context of development. *OALib*, 10(04):1–23.

- Juma, C., Fang, K., Honca, D., Perez, J. H., Konde, V., Lee, S. H., Arenas, J., Ivinson, A., Robinson, H., and Singh, S. (2001). Global governance of technology: meeting the needs of developing countries. *International Journal of Technology Management*, 22(7/8):629.
- Kiesow Cortez, E., Yakowitz Bambauer, J. R., and Guha, S. (2023). A quantum policy and ethics roadmap. *SSRN Electronic Journal*.
- Kop, M. (2023). Quantum-elspi: A novel field of research. *Digital Society*, 2(2).
- Lahiri, A. (2024). Sociological implications of the digital divide: Exploring access to information and social inequality in the age of artificial intelligence and automation. *Research Review International Journal of Multidisciplinary*, 9(1):156–167.
- Lee, J.-W. (2001). Education for technology readiness: Prospects for developing countries. *Journal of Human Development*, 2(1):115–151.
- Meyer, J. C. (2023). A holistic approach to quantum ethics education.
- Middleton, J. (1993). *Skills for Productivity: Vocational Education and Training in Developing Countries*.
- Nita, L., Mazzoli Smith, L., Chancellor, N., and Cramman, H. (2021). The challenge and opportunities of quantum literacy for future education and transdisciplinary problem-solving. *Research in Science & Technological Education*, 41(2):564–580.
- Peterssen, G. (2020). Quantum technology impact: The necessary workforce for developing quantum software.
- Possati, L. M. (2024). Quantum technologies: a hermeneutic technology assessment approach. *NanoEthics*, 18(1).
- Raja, S. and Christiaensen, L. (2017). The future of work requires more, not less technology in developing countries.
- Rodrigues, M. and Costa, F. (2018). Technology and competitiveness: Technological innovation for developing economies growth.
- Rosario, M. d. (2012). Ict in education policies and national development. In *Post-Secondary Education and Technology*, pages 17–38. Palgrave Macmillan US.
- Seskir, Z. C., Umbrello, S., Coenen, C., and Vermaas, P. E. (2023). Democratization of quantum technologies. *Quantum Science and Technology*, 8(2):024005.

- Sharma, S. and Dutz, M. A. (2012). *Green Growth, Technology and Innovation*. World Bank.
- Troyer, M., Benjamin, E. V., and Gevorkian, A. (2024). Quantum for good and the societal impact of quantum computing.
- Vermaas, P. E. (2017). The societal impact of the emerging quantum technologies: a renewed urgency to make quantum theory understandable. *Ethics and Information Technology*, 19(4):241–246.
- Wolbring, G. (2022). Auditing the 'social' of quantum technologies: A scoping review. *Societies*, 12(2):41.