



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación y
Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Análisis descriptivo del panorama actual del
cómputo cuántico para las propuestas de ingeniería
de software cuántico**

presentada por

Ing. Jesús Alfonso Ocampo Mújica

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias de la Computación

Directora de tesis

Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto de 2026.

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ciencias Computacionales

Cuernavaca, Mor., 29/JUNIO/2026

OFICIO No. DCC/138/2026

Asunto: Aceptación de documento de tesis
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de **Jesús Alfonso Ocampo Mújica** con número de control **M24CE060**, de la Maestría en Ciencias de la Computación, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado **"Análisis descriptivo del panorama actual del cómputo cuántico para las propuestas de ingeniería de software cuántico"** y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles
Directora de tesis

Dr. René Santaolaya Salgado
Revisor 1

M.C. José Luis Ramírez Alcántara
Revisor 2

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante



2026
año de
Margarita
Maza





Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 30/junio/2026

Oficio No. SAC/200/2026

Asunto: Autorización de impresión de tesis

JESÚS ALFONSO OCAMPO MÚJICA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA COMPUTACIÓN
P R E S E N T E

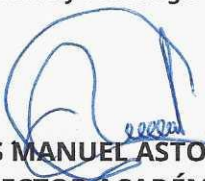
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Análisis descriptivo del panorama actual del cómputo cuántico para las propuestas de ingeniería de software cuántico"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y Tecnología al servicio de México"


CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ciencias Computacionales
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2026
año de
Margarita
Maza

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico





**TECNÓLOGICO NACIONAL DE MÉXICO
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO TECNOLÓGICO
CENIDET**

Ciencias de la Computación

Maestría en Ciencias de la Computación

**Análisis descriptivo del panorama actual del Cómputo Cuántico
para las propuestas de Ingeniería de Software Cuántico**

Autor: Jesús Alfonso Ocampo Mújica

Directora: Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles

Comité:

Dr. René Santaolaya Salgado

M.C. José Luis Ramírez Alcántara

agosto, 2026

*A mi madre, Ana María Estela Mújica Figueroa, y a mi hermana, Guadalupe
Karen Ocampo Mújica*

*Por ser mi origen, mi fuerza y una parte esencial de todo lo que soy. Gracias por su amor, apoyo y
presencia incondicional. Todo este camino también les pertenece.*

Agradecimientos

A mi madre y a mi hermana,

A mi madre, Ana María Estela Mújica Figueroa, y a mi hermana, Guadalupe Karen Ocampo Mújica, porque gracias a ellas soy la persona que soy hoy. Su apoyo, cariño y presencia constante, así como su ejemplo y fortaleza, han sido pilares esenciales en este camino.

A mis compañeros de vida,

A Minino, Mininota, Frida, Luna, Chanel y Canela, por su compañía silenciosa, leal e incondicional durante este recorrido. En los días de cansancio, incertidumbre o desvelo, su presencia fue una forma sencilla, pero profundamente significativa de calma, alegría y refugio.

A mi directora de tesis,

A la Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles, por su guía, acompañamiento y consejos a lo largo de esta etapa. Su orientación fue fundamental tanto en lo académico como en lo personal, pues sus palabras y observaciones fueron esenciales para el desarrollo y culminación de este trabajo.

A mis revisores de tesis,

Al Dr. René Santaolaya Salgado y al Mtro. José Luis Ramírez Alcántara por sus valiosos comentarios y aportaciones. Sus observaciones críticas fortalecieron este trabajo y contribuyeron a mi formación académica. Asimismo, agradezco al Mtro. José Luis por su guía en la comprensión del cómputo cuántico, así como por su paciencia y dedicación durante este proceso.

A las instituciones que hicieron posible esta etapa,

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, por la beca otorgada durante mis estudios de maestría. Asimismo, al Tecnológico Nacional de México y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, por brindar las instalaciones y las condiciones académicas necesarias para el desarrollo de este trabajo y para mi crecimiento académico.

A quien me impulsó hacia este tema,

A Diego Carlos Luna Márquez, por haberme invitado a aventurarme en el campo del cómputo cuántico y por confiar en mí sin conocerme previamente. Su confianza marcó el inicio de una parte fundamental de esta investigación.

A mis amigos,

A cada una de las personas a las que llamo amigos, por haber estado presentes de distintas formas y en distintos momentos de este trayecto. Sus consejos, chistes, anécdotas y compañía hicieron más llevadera esta etapa. Cada uno de ustedes ha aportado algo valioso a mi vida.

A la vida, al tiempo y a aquello que nos acompaña,

Agradezco también a aquello que, de una u otra forma, está por encima de nosotros o nos acompaña en esta aventura que llamamos vida, al gran arquitecto del universo. Y, si no fuera así, agradezco simplemente al tiempo y a las casualidades de la vida, que suelen dar dulce salida a muchas amargas dificultades y recordarnos que, pese a todo, vale la pena vivir.

Jesús Alfonso Ocampo Mújica
Cuernavaca, Morelos, 2026

**Análisis descriptivo del panorama actual del Cómputo Cuántico
para las propuestas de Ingeniería de Software Cuántico**

Jesús Alfonso Ocampo Mújica
Cuernavaca, Morelos, agosto 2026

Resumen

El cómputo cuántico plantea retos relevantes para la ingeniería de software en el diseño, integración, prueba, mantenimiento, calidad y formación asociada con el desarrollo de software cuántico. Sin embargo, la literatura sobre ingeniería de software cuántico se encuentra dispersa entre propuestas técnicas, metodológicas, educativas y conceptuales, lo que dificulta identificar una organización inicial de conocimientos para apoyar la formación de perfiles vinculados con este campo. Esta tesis tuvo como objetivo contribuir a dicha organización mediante un análisis descriptivo del panorama actual del cómputo cuántico en las propuestas de ingeniería de software cuántico.

Para ello, se integraron dos estrategias de revisión documental. La primera fue un análisis bibliométrico, que partió de 659 registros recuperados de Scopus y Web of Science, de los cuales se obtuvo un corpus final de 385 documentos correspondientes al periodo de 2020 a marzo de 2025. Sus resultados mostraron una evolución reciente del campo asociada con software cuántico, pruebas, lenguajes de programación cuántica, sistemas híbridos, herramientas y aplicaciones cuánticas. La segunda fue una revisión sistemática de la literatura, que partió de 1,571 registros recuperados de Web of Science, IEEE Xplore Digital Library y ACM Digital Library, de los cuales se seleccionaron 67 estudios finales correspondientes al periodo de 2019 a noviembre de 2025. Esta revisión permitió reconocer metodologías, buenas prácticas, ciclo de vida, calidad, verificación, validación y pruebas, desafíos de implementación, entornos tecnológicos y elementos formativos relacionados con la ingeniería de software cuántico.

Con base en estos resultados, se propone *QSEAK: Quantum Software Engineering Areas of Knowledge*, un marco de fundamentos referenciales cuya primera versión documentada, QSEAK_v0, se organizó en tres áreas: fundamentos, conocimientos técnicos especializados y conocimientos transversales y profesionales. La propuesta recibió cinco retroalimentaciones en una revisión académica inicial, lo que permitió identificar fortalezas, límites y oportunidades de mejora. QSEAK_v0 se presenta como una base referencial inicial, trazable y abierta a refinamiento, con potencial para contribuir al desarrollo de futuras guías formativas y orientar discusiones académicas sobre la formación en ingeniería de software cuántico.

Palabras clave: Cómputo Cuántico, Ingeniería de Software Cuántico, Análisis Bibliométrico, Revisión Sistemática de la Literatura, Marco de Fundamentos Referenciales, Guías Formativas.

Abstract

Quantum computing poses significant challenges for software engineering in the design, integration, testing, maintenance, quality, and training associated with quantum software development. However, the literature on quantum software engineering is dispersed across technical, methodological, educational, and conceptual proposals, which makes it difficult to identify an initial organization of knowledge to support the training of professional profiles linked to this field. This thesis aimed to contribute to such organization through a descriptive analysis of the current landscape of quantum computing in quantum software engineering proposals.

To this end, two literature review strategies were integrated. The first was a bibliometric analysis based on 659 records retrieved from Scopus and Web of Science, from which a final corpus of 385 documents corresponding to the period from 2020 to March 2025 was obtained. Its results showed a recent evolution of the field associated with quantum software, testing, quantum programming languages, hybrid systems, tools, and quantum applications. The second was a systematic literature review based on 1,571 records retrieved from Web of Science, IEEE Xplore Digital Library, and ACM Digital Library, from which 67 final studies corresponding to the period from 2019 to November 2025 were selected. This review made it possible to identify methodologies, good practices, life cycle proposals, quality, verification, validation and testing approaches, implementation challenges, technological environments, and educational elements related to quantum software engineering.

Based on these results, *QSEAK: Quantum Software Engineering Areas of Knowledge* is proposed as a reference framework of foundational knowledge. Its first documented version, QSEAK_v0, was organized into three areas: foundations, specialized technical knowledge, and transversal and professional knowledge. The proposal received five feedback reports in an initial academic review, which made it possible to identify strengths, limitations, and opportunities for improvement. QSEAK_v0 is presented as an initial, traceable reference base open to refinement, with the potential to contribute to the development of future educational guidelines and to guide academic discussions on education in quantum software engineering.

Keywords: Quantum Computing, Quantum Software Engineering, Bibliometric Analysis, Systematic Literature Review, Reference Framework of Foundational Knowledge, Educational Guidelines.

Índice general

Agradecimientos.....	iv
Resumen	iv
Abstract.....	v
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	x
Lista de siglas, abreviaturas y herramientas metodológicas.....	xi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Contextualización.....	1
1.2. Problema de investigación.....	2
1.3. Objetivo general	2
1.4. Objetivos específicos.....	2
1.5. Alcances	3
1.6. Limitaciones.....	3
1.7. Justificación.....	3
Capítulo 2. Marco conceptual y estado del arte.....	5
2.1. Conceptos generales.....	5
2.1.1. Cómputo cuántico.....	5
2.1.2. Ingeniería de software	7
2.1.3. Ingeniería de software cuántico	8
2.1.4. Sistemas híbridos clásico-cuánticos.....	8
2.2. Panorama reciente de investigación en ingeniería de software cuántico.....	10
2.3. Formación en cómputo cuántico e ingeniería de software cuántico.....	10
2.4. Trabajos relacionados.....	11
Capítulo 3. Metodología.....	15
3.1. Fases de la investigación	15
3.1.1. Fase I: Análisis bibliométrico.....	17
3.1.2. Fase II: Revisión sistemática de la literatura.....	17
3.1.3. Fase III: Propuesta de marco referencial de ingeniería de software cuántico.....	18
3.2. Análisis bibliométrico	18
3.2.1. Fuentes de información y estrategia de búsqueda.....	19
3.2.2. Criterios de depuración y normalización	20
3.2.3. Tipo de análisis, herramientas y técnicas empleadas	21
3.2.4. Síntesis del proceso de análisis bibliométrico.....	23
3.3. Revisión sistemática de la literatura	24
3.3.1. Revisiones previas y pertinencia del estudio	24

3.3.2. Preguntas de investigación	25
3.3.3. Fuentes de información y estrategia de búsqueda.....	26
3.3.4. Criterios de inclusión, exclusión y notas metodológicas.....	26
3.3.5. Proceso de selección de artículos académicos	27
3.3.6. Evaluación de calidad y extracción de datos.....	28
3.3.7. Síntesis y análisis de la información.....	29
3.4. Elaboración de la versión inicial del marco referencial	30
3.4.1. Clasificación temática	30
3.4.2. Priorización de contenido	31
3.4.3. Elaboración de la propuesta inicial	32
3.4.4. Desarrollo de las versiones en español e inglés	32
3.5. Revisión y refinamiento	33
Capítulo 4. Resultados.....	35
4.1. Resultados del análisis bibliométrico	35
4.1.1. Corpus y alcance del análisis.....	35
4.1.2. Evolución temporal y productividad científica	36
4.1.3. Estructura temática y evolución del campo	37
4.1.4. Redes de colaboración.....	40
4.1.5. Aporte del análisis bibliométrico a la investigación	43
4.2. Resultados de la revisión sistemática de la literatura.....	44
4.2.1. Identificación, selección y clasificación temática	44
4.2.2. Metodologías y buenas prácticas	47
4.2.3. Propuestas de ciclo de vida.....	48
4.2.4. Calidad, verificación, validación y pruebas	49
4.2.5. Desarrollo de software en sistemas híbridos clásico-cuánticos.....	50
4.2.6. Qiskit y ecosistema tecnológico	51
4.2.7. Enseñanza y formación en ingeniería de software cuántico.....	52
4.2.8. Aporte de la revisión sistemática de la literatura a la investigación.....	53
4.3. Versión inicial del marco referencial.....	53
4.3.1. Propósito y delimitación del marco referencial	54
4.3.2. Estructura general del marco referencial	55
4.3.3. Área 1: Fundamentos.....	56
4.3.4. Área 2: Conocimientos técnicos especializados.....	58
4.3.5. Área 3: Conocimientos transversales y profesionales	60
4.3.6. Síntesis del aporte del marco referencial	62
4.4. Resultados de la revisión académica inicial.....	63

4.4.1. Alcance y desarrollo de la revisión académica inicial.....	63
4.4.2. Retroalimentación recibida por revisor.....	64
4.4.3. Oportunidades de mejora para una versión posterior del marco referencial.....	66
4.5. Discusión de los resultados	67
4.6. Amenazas a la validez	69
4.6.1. Amenazas internas.....	69
4.6.2. Amenazas externas	71
4.7. Productos obtenidos	72
4.8. Cumplimiento de los objetivos de la investigación.....	73
Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros.....	75
5.1. Conclusiones	75
5.2. Trabajos futuros.....	76
Bibliografía.....	78
Anexos.....	88

Índice de figuras

Figura 1. Ruta metodológica general de la investigación.....	16
Figura 2. Distribución temporal de documentos del corpus bibliométrico entre 2020 y el primer trimestre de 2025.....	36
Figura 3. Mapa de evolución temática del corpus bibliométrico durante el periodo 2020- primer trimestre de 2025 basado en documentos.	37
Figura 4. Red de coautoría de autores en el corpus bibliométrico durante el periodo 2022- 2024.	40
Figura 5. Red de citación entre instituciones en el corpus bibliométrico durante el periodo 2022-2024.....	41
Figura 6. Red de citación entre países en el corpus bibliométrico durante el periodo 2022- 2024.	42
Figura 7. Diagrama PRISMA 2020 para la identificación, cribado y selección de estudios de la revisión sistemática de la literatura.....	45
Figura 8. Distribución de estudios incluidos por categoría temática de la revisión sistemática de la literatura.	46
Figura 9. Estructura general de la versión inicial del marco referencial.	55
Figura 10. Componentes del Área 1: Fundamentos en la versión inicial del marco referencial.	57
Figura 11. Componentes del Área 2: Conocimientos técnicos especializados en la versión inicial del marco referencial.	59
Figura 12. Componentes del Área 3: Conocimientos transversales y profesionales en la versión inicial del marco referencial.	61

Índice de tablas

Tabla 1. Trabajos relacionados y posicionamiento de esta investigación.	12
Tabla 2. Síntesis metodológica de la investigación.	16
Tabla 3. Conformación del corpus del análisis bibliométrico.	20
Tabla 4. Técnicas y configuración del análisis bibliométrico.	22
Tabla 5. Preguntas de investigación de la revisión sistemática de la literatura.	25
Tabla 6. Clústeres temáticos por periodo del análisis bibliométrico.	37
Tabla 7. Entidades destacadas en las redes bibliométricas.	42
Tabla 8. Categorías temáticas de la revisión sistemática de la literatura y distribución de estudios.	45
Tabla 9. Seguimiento del contacto con especialistas para la revisión académica inicial. ...	63
Tabla 10. Síntesis del cumplimiento de los objetivos de la investigación.	74

Lista de siglas, abreviaturas y herramientas metodológicas

En esta lista se incluyen las siglas, abreviaturas y herramientas metodológicas utilizadas de forma recurrente en la tesis. Su propósito es facilitar la lectura del documento y evitar aclaraciones repetidas en el cuerpo del texto.

Elemento	Significado o descripción
AB	Análisis bibliométrico
CE	Criterios de exclusión
CI	Criterios de inclusión
CQ	Cómputo cuántico
IS	Ingeniería de software
ISQ	Ingeniería de software cuántico
NISQ	Cómputo cuántico ruidoso de escala intermedia
NM	Notas metodológicas
QA	Criterios de calidad
QSEAK	Quantum Software Engineering Areas of Knowledge
QSEAK_v0	Versión inicial de QSEAK
RQ	Preguntas de investigación
RSL	Revisión sistemática de la literatura
PRISMA	Guía para reportar revisiones sistemáticas y metaanálisis
SciMAT	Herramienta para análisis de mapeo científico y evolución temática
VOSviewer	Herramienta para construcción y visualización de redes bibliométricas
Scopus	Base de datos bibliográfica
Web of Science	Base de datos bibliográfica

Capítulo 1. Introducción

Este capítulo presenta el encuadre general de la investigación y delimita los elementos que orientan su desarrollo. En primer lugar, se ofrece una presentación del contexto, el enfoque y el producto integrador de la tesis. Posteriormente, se plantea el problema de investigación, se establecen el objetivo general y los objetivos específicos, y se precisan los alcances y limitaciones del estudio. Finalmente, se desarrolla la justificación, destacando la pertinencia de organizar conocimientos para la formación inicial en ingeniería de software cuántico.

1.1. Contextualización

El cómputo cuántico (CQ) ha abierto nuevas posibilidades de procesamiento para abordar problemas que resultan difíciles de tratar mediante enfoques computacionales clásicos. Sin embargo, su desarrollo no sólo implica avances físicos, matemáticos o algorítmicos, sino también desafíos relacionados con la ingeniería de software (IS). La construcción de software cuántico requiere considerar aspectos como diseño, integración con sistemas clásicos, pruebas, mantenimiento, documentación, calidad, reproducibilidad y formación especializada.

En este contexto, la ingeniería de software cuántico (ISQ) se perfila como un campo emergente orientado a estudiar métodos, procesos, herramientas y prácticas para el desarrollo de software cuántico y sistemas clásico-cuánticos (híbridos). Aunque la literatura reciente muestra aportes relevantes, estos se encuentran distribuidos entre enfoques técnicos, metodológicos, educativos y conceptuales. Esta dispersión dificulta identificar con claridad qué conocimientos resultan necesarios para orientar la formación inicial de perfiles vinculados con el desarrollo de software cuántico.

Esta investigación aborda dicha necesidad mediante un análisis descriptivo del panorama actual del cómputo cuántico en las propuestas de ingeniería de software cuántico. Para ello, se articula un análisis bibliométrico (AB), una revisión sistemática de la literatura (RSL) y la elaboración de una propuesta inicial de marco de fundamentos referenciales. Esta articulación permite pasar de una lectura panorámica del campo a una revisión especializada de contenidos técnicos, metodológicos y formativos.

Como producto integrador de esta investigación, se propone *QSEAK: Quantum Software Engineering Areas of Knowledge*, cuya primera versión documentada corresponde a QSEAK_v0. Esta versión inicial organiza conocimientos en tres áreas: fundamentos, conocimientos técnicos especializados y conocimientos transversales y profesionales. Además, QSEAK_v0 fue sometido a una revisión académica inicial con especialistas, cuyos comentarios permitieron reconocer fortalezas, límites y oportunidades de mejora para una versión posterior. Por ello, la propuesta no se plantea como un currículo cerrado ni como un estándar validado, sino como una base referencial inicial, trazable y abierta a refinamiento, con potencial para contribuir al desarrollo de futuras guías formativas y orientar discusiones académicas sobre la formación en ingeniería de software cuántico.

La tesis se organiza en cinco capítulos. El primero presenta el problema de investigación, los objetivos, los alcances, las limitaciones y la justificación del estudio. El segundo desarrolla el marco conceptual y el estado del arte. El tercero describe la metodología empleada. El cuarto presenta los resultados del análisis bibliométrico, la revisión sistemática de la literatura, QSEAK_v0 y la revisión académica inicial. Finalmente, el quinto capítulo expone las conclusiones y los trabajos futuros.

1.2. Problema de investigación

A pesar del avance significativo en el contexto del CQ, el dominio de *las propuestas de ISQ carece de un cuerpo de conocimiento unificado y consistente* que proporcione un panorama actual de los elementos clave que lo componen.

Algunos investigadores han documentado de forma independiente algunos de los elementos que componen el CQ y su relación con la IS tradicional. Sin embargo, la falta de un cuerpo de conocimiento unificado y consistente, dificulta la identificación de los elementos clave necesarios para comprender el panorama actual del CQ en las propuestas de ISQ, ya que estos no están organizados ni estructurados en una versión unificada y consistente.

La carencia de esta información de forma unificada y consistente, genera problemas como la dificultad para consolidar y comprender conceptos cuánticos en la IS tradicional, limitando el aprendizaje y el desarrollo de las propuestas de ISQ, lo que representa un desafío significativo para los ingenieros de software en formación que desean explorar este campo.

1.3. Objetivo general

Contribuir al establecimiento de un cuerpo de conocimiento unificado y consistente que sirva como recurso para la formación de ingenieros de software involucrados en el desarrollo de software cuántico, realizando un análisis descriptivo del estado actual de los principales elementos del CQ en las propuestas de ISQ, mediante la aplicación de métodos cuantitativos, estadísticos, estructurados y reproducibles.

1.4. Objetivos específicos

- Realizar un AB para la comprensión cuantitativa y objetiva del estado, desarrollo y dirección del panorama actual del CQ en las propuestas de ISQ.
- Realizar una RSL para proporcionar una base sólida, exhaustiva y confiable de evidencia que permita comprender el panorama actual del CQ en las propuestas de ISQ.

- Realizar un documento de propuesta de fundamentos referenciales para la formación de ingenieros de software sobre el panorama actual del CQ en las propuestas de ISQ.

1.5. Alcances

- Se realizará la redacción y difusión de los hallazgos obtenidos del AB de los últimos cinco años.
- Se realizará la redacción y difusión de un informe de la RSL de los últimos cinco años.
- Se generará un documento de propuesta de fundamentos referenciales que aporte a la formación de ingenieros de software en el contexto del CQ, fundamentado en los hallazgos del AB y la RSL.
- Se realizará una revisión del documento de propuesta generado con especialistas de software de ISQ, o áreas afines, quienes proporcionarán retroalimentación.

1.6. Limitaciones

- El contenido temático del documento de propuesta de fundamentos referenciales será con base en los aspectos documentados en la literatura científica.
- La revisión del recurso educativo se realizará con especialistas disponibles en ISQ, o áreas afines.
- Los análisis se centrarán en describir el panorama actual, sin proponer estándares para la ISQ, ni realizar propuestas experimentales o validaciones prácticas.

1.7. Justificación

El CQ es una tecnología emergente con el potencial de revolucionar áreas como la seguridad informática, la simulación de sistemas complejos y el desarrollo de inteligencia artificial [1]–[7]. A nivel mundial, los avances en este campo han generado un interés significativo en su aplicación práctica, pero también han expuesto desafíos importantes relacionados con la integración de tecnologías cuánticas en la IS [2], [3], [8]–[11].

Dentro de este panorama, las propuestas de ISQ enfrentan un problema fundamental: la ausencia de un cuerpo de conocimiento unificado y consistente que organice y describa los elementos clave del campo. Sin un marco estructurado, tanto el aprendizaje como la investigación en esta área emergente son limitados, dificultando la formación de ingenieros de software y la adopción de estas tecnologías [4], [5], [7]–[11].

Esta investigación busca aportar al cierre de esta brecha mediante un análisis descriptivo del panorama actual del CQ y su relación con la IS. Al identificar y describir los elementos más relevantes, se pretende facilitar el acceso al conocimiento y ofrecer un recurso guía para los ingenieros de software en formación [2], [4], [5], [11]–[15]. Este aporte no sólo

promoverá el aprendizaje, sino que también fomentará el desarrollo de nuevas líneas de investigación y el avance del campo en entornos académicos y profesionales, alineándose con la necesidad de consolidar estándares y metodologías específicas [4], [10], [12], [14], [15].

Al realizar un documento que aporte a la base de conocimiento, se fortalecerá la capacidad de instituciones académicas para participar activamente en esta área emergente [2], [4], [5], [7], [11], [13], [15], [16]. Además, contribuirá a la implementación de tecnologías cuánticas en proyectos prácticos, apoyando la transición hacia una computación transformadora que integre sistemas cuánticos y clásicos en sectores como la salud, las finanzas y la simulación molecular [2]–[6].

Esta justificación permite situar la investigación como una contribución inicial a la organización de conocimientos relevantes para la formación en ISQ. A partir de esta necesidad, el capítulo siguiente desarrolla los fundamentos conceptuales y el estado del arte que permiten comprender la relación entre CQ, IS e ISQ.

Capítulo 2. Marco conceptual y estado del arte

Este capítulo desarrolla el sustento teórico y conceptual que enmarca la investigación, así como el análisis del estado del arte en torno al CQ, la IS y la ISQ. En primer lugar, se presentan los conceptos generales necesarios para delimitar el dominio de estudio. Posteriormente, se revisa el panorama reciente de investigación en ISQ y la dimensión formativa asociada con el campo. Finalmente, se describen los trabajos relacionados más cercanos a la aportación de este trabajo.

2.1. Conceptos generales

Para situar el marco teórico de esta investigación, es necesario establecer una base conceptual mínima sobre cuatro nociones articuladoras: CQ, IS, ISQ y sistemas híbridos. Estos conceptos permiten delimitar el dominio de estudio y explicar por qué el desarrollo de software cuántico requiere una perspectiva distinta a la programación convencional de circuitos o al uso instrumental de plataformas específicas.

El CQ aporta el contexto tecnológico del problema, mientras que la IS proporciona la base disciplinar para comprender el desarrollo de software como una actividad sistemática, organizada y orientada a procesos, calidad, mantenimiento y evolución. A partir de la relación entre ambos campos, la ISQ puede entenderse como una disciplina emergente que adapta y extiende principios de la IS al desarrollo de software cuántico e híbrido.

Finalmente, los sistemas híbridos permiten reconocer el contexto práctico en el que actualmente se desarrollan muchas soluciones cuánticas, donde componentes clásicos y cuánticos interactúan dentro de una misma arquitectura. Con base en ello, los apartados siguientes presentan los conceptos generales necesarios para sostener el análisis posterior de esta investigación.

2.1.1. Cómputo cuántico

El CQ puede entenderse como un paradigma de procesamiento de información que utiliza principios de la mecánica cuántica para representar, transformar y medir información de manera distinta al modelo clásico. Mientras que la computación clásica opera con bits cuyos valores se representan como 0 o 1, el CQ utiliza qubits como unidad básica de información. Esta diferencia no implica sólo un cambio en la representación de los datos, sino también una manera distinta de formular operaciones, diseñar algoritmos e interpretar resultados [17], [18].

El qubit puede describirse como un sistema capaz de encontrarse en una combinación lineal de los estados base $|0\rangle$ y $|1\rangle$. Esta propiedad, conocida como superposición, permite representar un estado cuántico mediante amplitudes asociadas a cada estado base. Sin embargo, dichas amplitudes no son directamente observables mediante una sola medición. Al medir el sistema, el resultado obtenido es clásico y probabilístico, por lo que la

interpretación de una ejecución cuántica debe realizarse a partir de distribuciones de probabilidad obtenidas mediante múltiples ejecuciones [17], [18].

Además de la superposición, el entrelazamiento constituye una de las propiedades distintivas del CQ. Este fenómeno ocurre cuando el estado de dos o más qubits no puede describirse de manera independiente, aun cuando cada qubit pueda medirse por separado. En términos computacionales, el entrelazamiento permite representar correlaciones que no tienen un equivalente directo en la descripción clásica tradicional. Junto con la interferencia, que permite reforzar o cancelar amplitudes de probabilidad, estas propiedades son utilizadas por los algoritmos cuánticos para modificar la probabilidad de obtener ciertos resultados al final de la ejecución [6], [17], [19].

Las operaciones en CQ suelen representarse mediante compuertas cuánticas organizadas en circuitos. Estas compuertas transforman el estado de uno o más qubits y, en el modelo ideal, se describen mediante operaciones reversibles y unitarias. De esta manera, un algoritmo cuántico puede entenderse como una secuencia estructurada de transformaciones aplicadas sobre un estado inicial, seguida generalmente por un proceso de medición. Esta representación mediante circuitos resulta importante porque permite expresar de forma gráfica y formal la evolución del sistema, así como analizar la relación entre operaciones, qubits, mediciones y resultados [17], [18].

El potencial del CQ no debe interpretarse como una superioridad general sobre la computación clásica para cualquier tipo de problema. Su relevancia se asocia con clases específicas de problemas en las que ciertos algoritmos cuánticos pueden ofrecer ventajas teóricas o prácticas, como ocurre en factorización, búsqueda, simulación de sistemas físicos u optimización. En este sentido, el CQ no sustituye de manera directa a la computación clásica, sino que amplía el conjunto de modelos y recursos disponibles para abordar problemas particulares [6], [18].

En la etapa actual del desarrollo tecnológico, gran parte de los dispositivos cuánticos disponibles se ubican en contextos de cómputo cuántico ruidoso de escala intermedia (NISQ, por sus siglas en inglés), caracterizados por hardware ruidoso, recursos limitados y ausencia de tolerancia a fallos plenamente consolidada. Factores como la decoherencia, la fidelidad de las compuertas, la conectividad limitada, la variabilidad de los dispositivos y los errores de ejecución condicionan la implementación de circuitos y la calidad de los resultados obtenidos. Por ello, el CQ actual debe comprenderse no sólo desde sus fundamentos teóricos, sino también desde las restricciones prácticas que impone la tecnología disponible [1], [20], [21].

Para esta investigación, el CQ no se aborda como un tema aislado, sino como la base conceptual que permite comprender los desafíos que enfrenta la ISQ. La naturaleza probabilística de la medición, la dependencia del hardware, las restricciones de los dispositivos actuales y la necesidad de interpretar resultados bajo condiciones de ruido introducen problemas que exceden la simple programación de circuitos. Por esta razón, comprender los conceptos generales del CQ resulta necesario para analizar posteriormente cómo la IS puede adaptarse a este nuevo contexto [1], [2].

2.1.2. Ingeniería de software

La IS puede entenderse como una disciplina orientada al desarrollo, operación, mantenimiento y evolución sistemática de sistemas de software. Su propósito no se limita a la programación, sino que abarca procesos, métodos, prácticas, herramientas y criterios de calidad necesarios para construir software de manera organizada, confiable y sostenible. Desde esta perspectiva, el software no se concibe únicamente como código fuente, sino como un producto técnico que requiere análisis, diseño, documentación, verificación, gestión y mejora continua a lo largo de su ciclo de vida [22], [23].

Uno de los aportes centrales de la IS es comprender el desarrollo de software como un proceso estructurado. Esto implica organizar actividades relacionadas con la identificación de necesidades, la especificación de requerimientos, el diseño, la implementación, las pruebas, el despliegue, el mantenimiento y la evolución del sistema. Dichas actividades pueden ordenarse mediante distintos modelos de proceso, de acuerdo con el tipo de proyecto, el contexto organizacional y las características del sistema desarrollado [22], [23].

La IS también proporciona principios para enfrentar la complejidad del software, entre ellos la abstracción, la modularidad, la separación de responsabilidades, la trazabilidad, la reusabilidad, la verificabilidad y la mantenibilidad. Estos principios permiten organizar sistemas complejos en componentes comprensibles, facilitar su análisis, reducir errores, apoyar su evolución y justificar decisiones de diseño. En este sentido, la IS no sólo busca que un programa funcione, sino que pueda ser comprendido, probado, modificado, integrado y mantenido bajo condiciones cambiantes [22], [23].

De manera complementaria, la IS se apoya en referentes normativos y modelos de calidad que permiten estructurar procesos, productos y criterios de evaluación del software. En este sentido, estándares como ISO/IEC/IEEE 12207, asociado con procesos del ciclo de vida del software, e ISO/IEC 25010, vinculado con modelos de calidad del producto software, resultan relevantes porque ofrecen una base desde la cual pueden analizarse posteriormente las adaptaciones requeridas en el contexto de la ISQ [23].

Para esta investigación, la IS constituye la base disciplinar desde la cual se analiza el desarrollo de software cuántico. Su relevancia radica en que actividades como requerimientos, diseño, arquitectura, pruebas, calidad, mantenimiento, gestión y evolución no desaparecen en el contexto cuántico, sino que deben reconsiderarse frente a nuevas restricciones tecnológicas. Por ello, antes de abordar la ISQ, resulta necesario reconocer que el desarrollo de software cuántico no puede entenderse únicamente como programación o construcción de circuitos, sino como una actividad de ingeniería que requiere adaptar y extender principios ya consolidados en la IS [22], [23].

2.1.3. Ingeniería de software cuántico

La ISQ puede entenderse como una disciplina emergente orientada a adaptar y extender principios, procesos, métodos y herramientas de la IS a la construcción de soluciones cuánticas e híbridas. Su surgimiento responde a la necesidad de abordar el software cuántico no sólo como programación de circuitos, sino como una actividad de ingeniería que involucra análisis, diseño, implementación, pruebas, validación, integración, operación, mantenimiento y evolución de soluciones que incorporan software cuántico [2], [4], [24], [25].

Esta distinción es relevante porque el desarrollo de software cuántico presenta condiciones que no se explican por completo desde la IS tradicional ni desde el CQ entendido únicamente como fundamento físico o computacional. La naturaleza probabilística de la medición, la dificultad para observar directamente los estados cuánticos sin alterarlos, la presencia de ruido, la dependencia del hardware y las restricciones de los dispositivos actuales modifican la forma en que se diseñan, ejecutan, prueban e interpretan los programas cuánticos [26], [27].

Desde esta perspectiva, la ISQ no sustituye a la IS, sino que parte de ella para reconsiderar sus prácticas frente a un dominio tecnológico distinto. Actividades como requerimientos, modelado, arquitectura, diseño, pruebas, aseguramiento de calidad, mantenimiento y gestión de configuración siguen siendo relevantes; sin embargo, deben revisarse a la luz de problemas específicos del desarrollo cuántico, como la validación probabilística, la reproducibilidad de resultados, la selección de plataformas de ejecución y la evolución de soluciones condicionadas por hardware todavía inmaduro [2], [27]–[29].

La ISQ también se relaciona estrechamente con el desarrollo de software híbrido clásico-cuántico, ya que muchas soluciones actuales combinan componentes clásicos y cuánticos dentro de una misma arquitectura. Esta condición amplía el alcance de la programación cuántica hacia problemas de integración, interoperabilidad, orquestación, despliegue y operación. No obstante, estos aspectos se desarrollan con mayor detalle en el apartado siguiente, dedicado a los sistemas híbridos [8], [13].

En términos generales, la ISQ debe comprenderse como un campo en desarrollo, con avances en metodologías, herramientas, ciclo de vida, pruebas, arquitectura, calidad y formación, pero aún con desafíos relacionados con la fragmentación conceptual, la ausencia de estándares plenamente consolidados y la necesidad de fortalecer propuestas formativas específicas. Para esta investigación, la ISQ constituye el punto de convergencia entre el dominio tecnológico del CQ y la base disciplinar de la IS, y permite justificar la necesidad de organizar conocimientos que apoyen una formación inicial más estructurada en este campo [13], [30].

2.1.4. Sistemas híbridos clásico-cuánticos

Los sistemas híbridos clásico-cuánticos pueden entenderse como soluciones de software en las que componentes clásicos y cuánticos interactúan dentro de un mismo flujo

computacional. En estos sistemas, el componente cuántico no suele operar de manera aislada, sino como parte de una arquitectura más amplia en la que intervienen programas clásicos, simuladores, plataformas de ejecución cuántica, servicios en la nube, mecanismos de orquestación y procesos de análisis de resultados. Esta condición resulta especialmente relevante en la etapa actual del CQ, donde las restricciones del hardware favorecen esquemas de ejecución combinados [27], [31].

En una solución híbrida, los componentes clásicos suelen encargarse de tareas como preparación de datos, formulación del problema, control del flujo de ejecución, optimización de parámetros, selección de plataformas de ejecución cuántica, gestión de iteraciones y posprocesamiento de resultados. Los componentes cuánticos, por su parte, se incorporan para ejecutar circuitos, subrutinas o procedimientos específicos que buscan aprovechar propiedades del modelo cuántico en partes concretas del problema. Por ello, el desarrollo de sistemas híbridos implica definir cómo se distribuyen responsabilidades entre ambos entornos y cómo se coordina su interacción [8], [16].

Esta distribución exige decisiones de ingeniería relacionadas con la partición clásico-cuántica del problema. Antes de implementar una solución, es necesario analizar qué parte puede formularse de manera clásica, qué parte podría beneficiarse de recursos cuánticos, qué datos deben codificarse, qué restricciones impone la plataforma de ejecución disponible y cómo se evaluará el resultado obtenido. Estas decisiones afectan el diseño de la arquitectura, la profundidad y complejidad de los circuitos, la comunicación entre componentes, la reproducibilidad de la ejecución y la comparación frente a soluciones clásicas [32], [33].

Desde una perspectiva arquitectónica y operativa, estos sistemas requieren coordinar artefactos heterogéneos y dependencias tecnológicas cambiantes. Una solución puede involucrar código clásico, circuitos cuánticos, bibliotecas de simulación, plataformas de ejecución, configuraciones de la plataforma de ejecución cuántica, servicios externos y flujos de despliegue. Esta heterogeneidad plantea desafíos de interoperabilidad, trazabilidad, mantenimiento, control de versiones y dependencia de proveedores. Además, la ejecución en plataformas reales introduce variabilidad asociada con ruido, disponibilidad del dispositivo, calibración, conectividad y errores de ejecución, por lo que la compilación, el despliegue y la operación deben considerar las restricciones del hardware disponible [21], [32], [34].

Para esta investigación, los sistemas híbridos permiten comprender el contexto práctico en el que se sitúa gran parte del desarrollo actual de software cuántico. Su estudio vincula los fundamentos del CQ con decisiones propias de la IS, como arquitectura, integración, operación, evaluación y mantenimiento. Por esta razón, constituyen un concepto clave para analizar cómo las soluciones cuánticas se insertan en infraestructuras mixtas y cómo sus resultados dependen de la interacción entre componentes clásicos, circuitos cuánticos, procesos de compilación y condiciones de ejecución [8], [27].

2.2. Panorama reciente de investigación en ingeniería de software cuántico

La investigación reciente en ISQ muestra un campo en crecimiento, con avances conceptuales, metodológicos y técnicos, pero todavía con distintos grados de madurez entre sus líneas de trabajo. En la literatura revisada destacan estudios orientados a delimitar el campo, caracterizar sus desafíos, proponer panoramas de investigación y sistematizar prácticas relacionadas con procesos, herramientas, calidad, pruebas, mantenimiento, integración híbrida y formación especializada [2], [4], [24], [26].

Una primera línea de atención se concentra en manifiestos, revisiones, estudios de mapeo y análisis de tendencias que buscan ordenar el desarrollo de la ISQ como área de investigación. Estos trabajos muestran una base conceptual en expansión, aunque también evidencian dispersión terminológica, diferencias en el nivel de formalización de las propuestas y una articulación todavía limitada entre resultados técnicos, metodológicos y formativos [13], [30].

Otra línea relevante se relaciona con modelos de ciclo de vida, metodologías, arquitectura, integración y buenas prácticas para el desarrollo de software cuántico e híbrido. En este ámbito se estudian problemas como la partición clásico-cuántica, la selección de plataformas de ejecución, la dependencia del hardware, la interoperabilidad, la reusabilidad, la variabilidad tecnológica y la operación de soluciones que combinan componentes clásicos, circuitos cuánticos, simuladores y servicios en la nube [8], [27], [31], [32].

La calidad, verificación, validación, pruebas, reproducibilidad y formación especializada también ocupan un lugar creciente en el estado del arte. Estos temas revelan que el avance del campo no depende sólo de nuevos algoritmos o herramientas, sino de la capacidad para establecer prácticas evaluables, criterios de confiabilidad y rutas formativas más integradas. Esta lectura justifica la necesidad de organizar de manera más sistemática los conocimientos del área, especialmente ante la dispersión conceptual, metodológica y educativa que aún caracteriza a la ISQ [13], [30], [35].

2.3. Formación en cómputo cuántico e ingeniería de software cuántico

La formación en CQ ha adquirido mayor relevancia conforme el campo se ha vinculado con plataformas de programación, simuladores, servicios en la nube y herramientas accesibles para estudiantes, investigadores y desarrolladores. Este crecimiento ha favorecido la aparición de cursos, laboratorios, tutoriales, entornos interactivos y experiencias prácticas orientadas a enseñar fundamentos cuánticos, algoritmos, circuitos y programación cuántica. Sin embargo, la disponibilidad creciente de estos recursos no implica, por sí misma, la consolidación de trayectorias formativas específicas en ISQ [36], [37].

En términos generales, la formación en CQ suele concentrarse en conceptos como qubits, superposición, entrelazamiento, medición, circuitos, compuertas, algoritmos introductorios

y uso de plataformas de desarrollo. Estos contenidos son necesarios para comprender el dominio cuántico y constituyen una base indispensable para aproximarse al software cuántico. No obstante, resultan insuficientes cuando el objetivo formativo se orienta hacia perfiles capaces de desarrollar, integrar, probar, mantener y evaluar soluciones de software cuántico o híbrido desde una perspectiva de IS. En particular, una formación centrada únicamente en algoritmos o en el uso instrumental de herramientas puede dejar fuera dimensiones como requerimientos, arquitectura, diseño, calidad, pruebas, documentación, integración, mantenimiento, despliegue, trazabilidad y evaluación sistemática de resultados [35], [38].

Esta diferencia permite distinguir entre aprender CQ, programar circuitos cuánticos y formarse en ISQ. Aprender CQ supone comprender los fundamentos conceptuales, matemáticos y computacionales del paradigma cuántico. Programar circuitos cuánticos implica utilizar lenguajes, bibliotecas, simuladores o plataformas para implementar procedimientos cuánticos. En cambio, formarse en ISQ requiere articular esos conocimientos con principios, procesos y prácticas de IS, de modo que el estudiante pueda razonar sobre el ciclo de vida, la calidad, la integración clásico-cuántica, la reproducibilidad, la evolución y la operación de las soluciones desarrolladas [38], [39].

Las propuestas educativas recientes muestran esfuerzos valiosos por reducir la barrera de entrada al CQ y a la programación cuántica. Entre ellas se encuentran cursos introductorios, laboratorios guiados, actividades de programación, entornos reproducibles, cuadernos interactivos, ejercicios de ejecución en simuladores o hardware real y mecanismos de evaluación automatizada. En esta línea, las experiencias recientes de diseño de cursos muestran que la formación en CQ requiere decisiones pedagógicas explícitas sobre profundidad conceptual, selección de herramientas, tipo de ejercicios y progresión del aprendizaje [40]. Estas iniciativas acercan al estudiante a experiencias prácticas de implementación, depuración, ejecución y análisis de resultados; sin embargo, muchas de ellas permanecen en el ámbito de la enseñanza general de CQ o de la programación cuántica, por lo que la formación específicamente orientada a ISQ continúa siendo limitada, dispersa y con distintos niveles de formalización [36], [41]–[43].

En este contexto, la brecha formativa identificada resulta central para esta investigación. La literatura muestra avances en recursos educativos y experiencias prácticas relacionadas con CQ y programación cuántica, pero también evidencia la necesidad de articular dichos contenidos con procesos, métodos, herramientas, criterios de calidad y dimensiones profesionales propias de la IS. Por ello, esta investigación retoma dicha brecha como punto de partida para desarrollar, en capítulos posteriores, una primera versión del marco orientada a organizar niveles de conocimiento relevantes para la formación inicial en ISQ.

2.4. Trabajos relacionados

Después de presentar el panorama reciente de investigación en ISQ y la dimensión formativa asociada con el campo, esta sección delimita los trabajos más cercanos a la aportación de este trabajo y precisa la diferencia de alcance frente a ellos. Los antecedentes

revisados muestran que la ISQ ha sido abordada desde perspectivas conceptuales, técnicas y educativas; por tanto, la contribución de esta investigación no se plantea desde la ausencia de estudios previos, sino desde la necesidad de articular sus aportes en una organización referencial orientada a la formación inicial.

Una primera línea de trabajos ha contribuido a establecer la necesidad de una disciplina orientada al desarrollo sistemático de software cuántico. En esta dirección se encuentran manifiestos, propuestas conceptuales y rutas de consolidación del campo que destacan la importancia de adaptar principios de la IS al dominio del CQ, aprovechando la experiencia acumulada en la IS tradicional para enfrentar los retos del nuevo paradigma [4], [14], [24]–[26], [29]. De manera complementaria, revisiones y estudios de mapeo recientes han identificado desafíos asociados con metodologías, ciclo de vida, pruebas, calidad, mantenimiento, arquitectura, herramientas, integración híbrida y colaboración interdisciplinaria [13], [27], [30]. Estos trabajos ofrecen una lectura amplia del campo, aunque suelen centrarse en caracterizar líneas de investigación, discutir retos o mapear tendencias, más que en derivar una propuesta referencial de conocimientos orientada a la formación inicial.

Otra línea relevante se concentra en dimensiones técnicas y formativas específicas de la creación, integración y evaluación de software cuántico. Trabajos sobre ciclo de vida, arquitectura de software y retos desde la perspectiva de desarrolladores han mostrado que el desarrollo cuántico requiere considerar decisiones de diseño, integración, despliegue, operación, pruebas, evaluación y mantenimiento [8], [31]–[33]. En paralelo, los estudios sobre educación y formación han señalado la necesidad de preparar perfiles capaces de comprender fundamentos cuánticos, prácticas de desarrollo, competencias técnicas y criterios de calidad propios de la ISQ [35], [38], [40]. Estas contribuciones son relevantes porque evidencian que el campo requiere una articulación entre fundamentos, práctica técnica y formación especializada.

Como se observa en la Tabla 1, los trabajos relacionados aportan antecedentes relevantes para comprender la evolución conceptual, técnica y formativa de la ISQ. Sin embargo, también muestran que las contribuciones existentes suelen concentrarse en dimensiones particulares del campo, como su delimitación disciplinar, sus retos técnicos, sus herramientas o sus necesidades educativas. Esta investigación se diferencia de dichos trabajos al integrar un AB, una RSL y la elaboración de una propuesta referencial orientada a organizar conocimientos para la formación inicial.

Tabla 1. Trabajos relacionados y posicionamiento de esta investigación.

Línea o trabajo relacionado	Referencias	Enfoque principal	Diferencia con esta investigación
Manifiestos, propuestas conceptuales y rutas de consolidación del campo	[4], [14], [24], [25], [26], [29]	Contribuyen a delimitar la ISQ como disciplina emergente y proponen principios, retos y rutas de consolidación.	Aportan orientación conceptual y estratégica para organizar el campo, pero no desarrollan una estructura formativa de conocimientos.

Revisiones, estudios de mapeo y panoramas recientes	[13], [27], [30]	Sintetizan o caracterizan literatura, tendencias, retos y brechas del campo.	Mapean o discuten el estado de la ISQ, sin articular AB, RSL y propuesta referencial en un mismo proceso.
Trabajos técnicos sobre ciclo de vida, arquitectura y desarrollo híbrido	[8], [31], [32], [33]	Abordan procesos, arquitectura, integración, operación y retos del desarrollo cuántico o híbrido.	Profundizan en dimensiones técnicas específicas, pero no proponen una organización formativa amplia de conocimientos.
Trabajos educativos y de competencias	[35], [38], [40]	Analizan formación, competencias, cursos, fuerza laboral y brechas educativas.	Respaldan la necesidad de formación especializada, aunque no integran esa necesidad con una estructura referencial amplia para ISQ.
Taxonomías y fundamentos de CQ vinculados con IS	[19]	Proponen una visión taxonómica de fundamentos de CQ y conceptos vinculados con ISQ.	Constituyen uno de los antecedentes más cercanos, pero se concentran principalmente en fundamentos y conceptos base.
Esta investigación	—	Integra AB, RSL y una propuesta inicial de marco de fundamentos referenciales.	Articula evidencia bibliométrica, revisión sistemática y organización referencial para la formación inicial en ISQ.

Entre los antecedentes revisados, destaca una contribución orientada a organizar los fundamentos de CQ y su relación con la IS, la cual resulta especialmente cercana al propósito de este trabajo por su interés en estructurar conceptos que permitan aproximar el dominio cuántico a perfiles de ciencias computacionales [19]. Este antecedente propone una visión taxonómica de conceptos fundamentales del CQ y de conceptos derivados vinculados con la ISQ, con el propósito de ofrecer una base de comprensión para estudiantes y docentes que no necesariamente provienen de una formación especializada en física.

La cercanía con esta investigación se observa en que ambos trabajos reconocen la importancia de los fundamentos de CQ para comprender la ISQ y parten de la necesidad de ordenar conocimientos en un campo interdisciplinario. La diferencia se encuentra en el alcance, el proceso metodológico y el producto resultante. Mientras dicho antecedente se concentra principalmente en una taxonomía de fundamentos cuánticos y conceptos asociados con software cuántico, este trabajo articula una caracterización bibliométrica, una RSL y una propuesta de marco de fundamentos referenciales para la etapa inicial de formación en ISQ. Desde esta perspectiva, la investigación amplía el foco hacia fundamentos matemáticos, computacionales, de IS y de CQ, así como hacia conocimientos técnicos especializados y dimensiones transversales o profesionales.

Por tanto, la aportación de esta investigación debe entenderse como una integración complementaria frente a los trabajos previos. A partir de la literatura revisada, no se

identificó una propuesta exactamente equivalente en su articulación entre evidencia bibliométrica, revisión sistemática y organización referencial de conocimientos orientada a la formación inicial en ISQ. En los capítulos siguientes, esta propuesta se desarrolla metodológicamente y se presenta como QSEAK_v0, la versión inicial del marco de fundamentos referenciales QSEAK.

Capítulo 3. Metodología

Este capítulo presenta la ruta metodológica que guió la investigación desde la caracterización bibliométrica del campo hasta la elaboración de QSEAK_v0 y su revisión académica inicial. Asimismo, describe las fases, insumos, procedimientos y productos que permitieron articular evidencia documental en una versión de partida del marco de fundamentos referenciales QSEAK.

En primer lugar, se describen las fases de la investigación; posteriormente, se detallan los procedimientos seguidos para el AB, la RSL, la elaboración de la versión inicial del marco y la revisión académica inicial.

3.1. Fases de la investigación

La investigación se desarrolló mediante una ruta metodológica organizada en tres fases principales: AB, RSL y propuesta de marco referencial. Esta organización permitió avanzar de manera progresiva desde una caracterización general del campo hacia una revisión especializada de la literatura, para posteriormente integrar los hallazgos obtenidos en una propuesta orientada a la formación inicial en ISQ.

Las fases no se plantearon como actividades independientes, sino como momentos articulados dentro de un mismo proceso. En este sentido, el AB permitió obtener un diagnóstico contextual del campo; la RSL profundizó en el análisis documental especializado; y la tercera fase integró los insumos previos en una estructura referencial compuesta por áreas, componentes y tópicos. Como parte de esta última fase, también se realizó una revisión académica inicial con especialistas, entendida como un ejercicio de contraste preliminar del producto construido y no como una validación definitiva.

Antes de la ejecución de las fases principales, se realizó una etapa exploratoria inicial orientada a reconocer el estado general del campo y a delimitar el problema de investigación. De esta etapa se derivó un artículo académico que funciona como antecedente documental del estudio y se integra como Anexo A.

La Figura 1 presenta de manera sintética la relación entre las tres fases de la investigación.

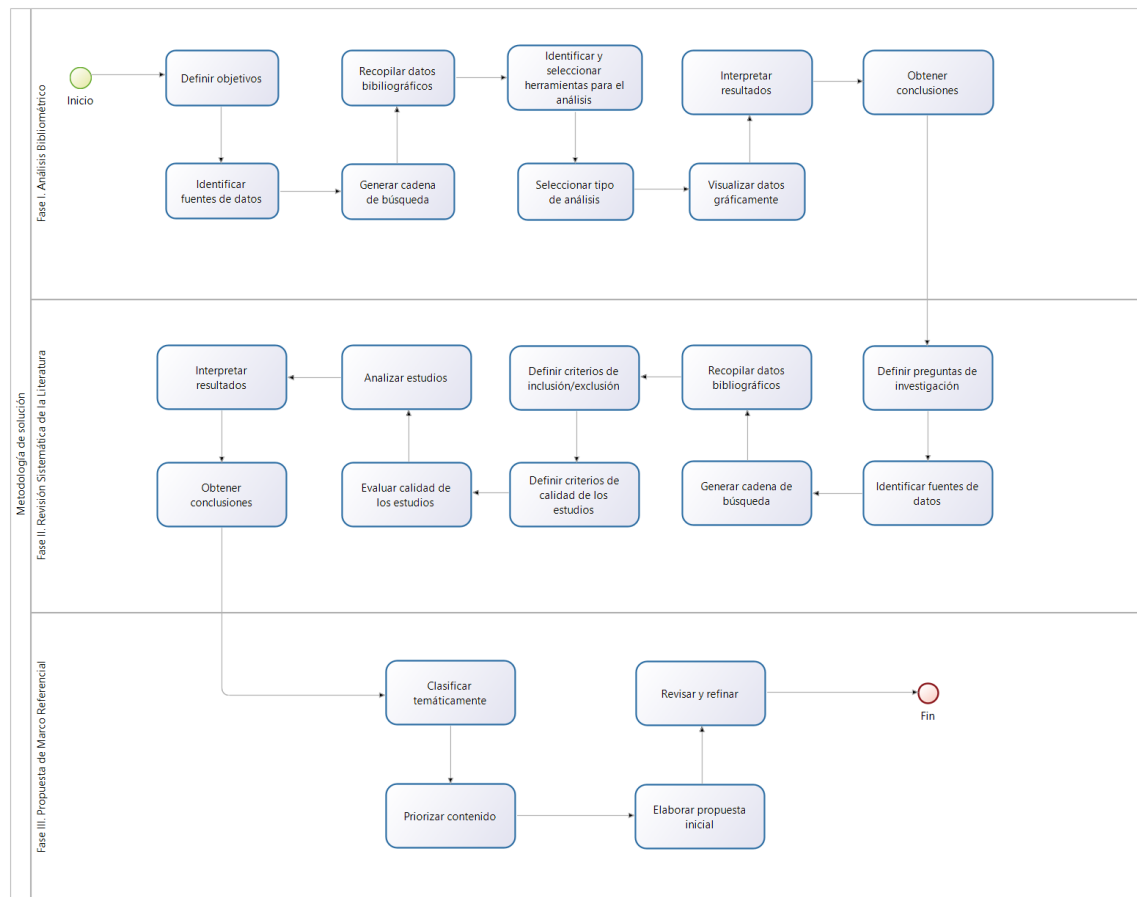


Figura 1. Ruta metodológica general de la investigación.

La Tabla 2 complementa la representación general de la metodología al sintetizar la relación entre los insumos utilizados, los procesos desarrollados, los productos generados y el uso posterior de cada resultado dentro de la investigación.

Tabla 2. Síntesis metodológica de la investigación.

Fase	Insumo principal	Proceso metodológico	Producto generado	Uso posterior
Fase I: AB	Registros bibliográficos sobre CQ e ISQ	Recuperación, depuración, normalización y AB del corpus.	Diagnóstico bibliométrico del campo: tendencias, estructura temática y redes.	Delimitar la RSL y orientar líneas de análisis especializado.
Fase II: RSL	Estudios seleccionados mediante el protocolo de revisión	Búsqueda, selección, evaluación de calidad, extracción de datos y síntesis temática.	Base documental especializada sobre enfoques, propuestas, herramientas, desafíos y elementos formativos de la ISQ.	Aportar insumos técnicos y temáticos para la elaboración del marco referencial.

Fase III: Propuesta de Marco Referenci al	Resultados del AB y la RSL, referentes sobre CQ, IS e ISQ, y retroalimentación de especialistas	Clasificación temática, priorización de contenidos, organización referencial y revisión académica inicial.	QSEAK_v0 como versión inicial del marco de fundamentos referenciales, con observaciones para su refinamiento.	Constituir el producto central de la tesis y orientar versiones posteriores del marco.
---	---	---	--	---

3.1.1. Fase I: Análisis bibliométrico

La Fase I de la investigación correspondió al AB, cuyo propósito fue caracterizar el panorama científico reciente relacionado con el CQ y las propuestas de ISQ. Esta fase permitió obtener un diagnóstico contextual del campo a partir de la producción científica publicada, sus tendencias temporales, sus agrupamientos temáticos y sus redes de colaboración.

El análisis se apoyó en un corpus bibliográfico depurado y normalizado, con el fin de observar patrones generales de producción, relación entre conceptos, concentración temática y evolución reciente del área. Su alcance fue panorámico: no buscó evaluar en profundidad el contenido técnico de cada estudio, sino reconocer cómo se estaba configurando el campo desde una perspectiva cuantitativa y documental.

Dentro de la ruta metodológica de esta investigación, el AB cumplió una función orientadora. Sus resultados permitieron reconocer líneas de interés, tendencias generales y áreas de concentración temática que justificaron una revisión posterior más específica. Por ello, esta fase no sustituyó la RSL, sino que preparó el terreno para una lectura especializada de la evidencia.

3.1.2. Fase II: Revisión sistemática de la literatura

La Fase II correspondió a la RSL, desarrollada como una etapa de profundización posterior al AB. Mientras el AB permitió reconocer tendencias generales del campo, la RSL se orientó a examinar con mayor detalle estudios relacionados con ISQ, con énfasis en enfoques, propuestas, herramientas, desafíos, prácticas técnicas y elementos formativos documentados en la literatura especializada.

Esta fase se estructuró mediante preguntas de investigación, criterios de inclusión y exclusión, normas de calidad y procedimientos de extracción de datos. Su propósito no fue sólo reunir estudios sobre software cuántico, sino identificar qué evidencia podía aportar a la comprensión de la ISQ como campo de formación y práctica ingenieril.

Dentro de la ruta metodológica, la RSL constituyó el principal insumo documental para la elaboración de QSEAK_v0. Sus hallazgos no fueron trasladados de manera directa al marco, sino reinterpretados posteriormente en la Fase III, con el fin de convertir la evidencia revisada en una organización referencial de conocimientos.

3.1.3. Fase III: Propuesta de marco referencial de ingeniería de software cuántico

La Fase III correspondió a la elaboración de QSEAK_v0 como primera versión del marco de fundamentos referenciales QSEAK. Esta fase integró los resultados del AB, los hallazgos de la RSL y referentes teóricos y técnicos sobre CQ, IS e ISQ, con el propósito de organizar conocimientos relevantes para la formación inicial en ISQ.

La actividad central de esta fase fue transformar los insumos documentales en una estructura de áreas, componentes y tópicos. Para ello, se desarrollaron tareas de clasificación temática, priorización de contenido, elaboración de la propuesta inicial y preparación de versiones en español e inglés. Estas tareas permitieron pasar de una lectura dispersa de la literatura a una propuesta organizada bajo una lógica formativa.

En esta sección se ubica la fase dentro de la ruta metodológica general. El procedimiento específico se desarrolla en la sección 3.4, mientras que el producto resultante, su estructura y su aporte se presentan como parte de los resultados en el Capítulo 4.

3.2. Análisis bibliométrico

Esta sección describe el procedimiento seguido para el AB. Mientras que la sección 3.1.1 presentó su función dentro de la ruta metodológica general, aquí se documentan las decisiones operativas relacionadas con la recuperación, depuración, normalización y análisis del corpus bibliográfico. En términos metodológicos, los estudios bibliométricos permiten examinar la estructura intelectual, social y temática de un área de investigación, así como reconocer patrones de productividad, colaboración y evolución científica [44]. Por ello, el AB se utilizó como una estrategia adecuada para caracterizar el comportamiento reciente del campo desde una perspectiva cuantitativa y estructural.

El desarrollo de la sección se organiza en cuatro momentos. En primer lugar, se presentan las fuentes de información y la estrategia de búsqueda empleada para recuperar los registros. En segundo lugar, se describen los criterios aplicados para depurar y normalizar el corpus. En tercer lugar, se especifican las herramientas y técnicas utilizadas para analizar la producción científica, la evolución temática y las redes bibliométricas. Finalmente, se ofrece una síntesis del proceso de análisis, destacando su función como diagnóstico contextual para orientar la RSL.

De esta manera, la sección permite documentar la trazabilidad del AB desde la recuperación inicial de registros hasta la obtención de productos analíticos utilizados como insumo para la fase posterior, sin desarrollar todavía los resultados específicos, los cuales se presentan en el Capítulo 4.

3.2.1. Fuentes de información y estrategia de búsqueda

La recuperación de información para el AB se realizó en las bases de datos Scopus y Web of Science. La selección de estas fuentes respondió a su cobertura multidisciplinaria, calidad de indexación y disponibilidad de metadatos bibliográficos necesarios para analizar producción científica, autores, instituciones, países, fuentes de publicación, palabras clave y relaciones bibliográficas [45]–[47]. El uso combinado de ambas bases permitió ampliar la cobertura del corpus y reducir la dependencia de una única fuente de información.

La búsqueda se efectuó el 25 de marzo de 2025 y el análisis se delimitó al periodo entre 2020 y el primer trimestre de 2025. Esta delimitación temporal respondió al interés de caracterizar el panorama reciente de publicaciones asociadas con CQ e ISQ, en un periodo en el que el desarrollo de software cuántico, las herramientas de programación, los sistemas híbridos y las propuestas de ISQ han adquirido mayor presencia en la literatura especializada.

La estrategia de búsqueda se construyó a partir de dos bloques conceptuales. El primero integró términos asociados con desarrollo, diseño, arquitectura, ciclo de vida, metodologías y pruebas de software cuántico. El segundo incorporó términos relacionados con el entorno de desarrollo cuántico, incluyendo programación, sistemas híbridos, entornos de desarrollo y herramientas. La cadena general de búsqueda utilizada fue la siguiente:

("quantum software engineering" OR "quantum software development" OR "quantum software lifecycle" OR "quantum software methodologies" OR "quantum software architecture" OR "quantum software design" OR "quantum software testing") AND ("quantum software" OR "quantum programming" OR "quantum hybrid systems" OR "quantum software frameworks" OR "quantum software tools")

Esta cadena buscó equilibrar especificidad y amplitud. Por un lado, incluyó expresiones directamente vinculadas con prácticas, procesos y actividades propias de la ISQ; por otro, incorporó términos más amplios asociados con el ecosistema de software cuántico, con el fin de recuperar literatura relacionada con herramientas, programación, entornos de desarrollo y sistemas híbridos. De esta manera, la búsqueda no se limitó únicamente a documentos que utilizaran de forma explícita la expresión “*quantum software engineering*”, sino que también consideró trabajos cercanos al desarrollo y gestión de software cuántico.

La cadena se ejecutó en Scopus mediante el campo TITLE-ABS-KEY y en Web of Science mediante el campo TS. Los resultados se restringieron al idioma inglés. Los metadatos recuperados incluyeron título, resumen, palabras clave, autores, afiliaciones, fuente de publicación y referencias citadas. Posteriormente, los registros fueron exportados en formatos compatibles con las herramientas de AB empleadas en la investigación: RIS para SciMAT y CSV para VOSviewer.

Los registros recuperados mediante esta estrategia constituyeron el conjunto inicial del AB. Dicho conjunto fue sometido posteriormente a un proceso de depuración, eliminación de duplicados, revisión de pertinencia y normalización de metadatos, procedimiento que se describe en el siguiente apartado.

3.2.2. Criterios de depuración y normalización

Una vez recuperados los registros bibliográficos, se realizó un proceso de depuración y normalización con el propósito de conformar un corpus consistente para el AB. Esta etapa permitió reducir duplicidades, verificar la pertinencia temática de los documentos y disminuir inconsistencias en los metadatos antes de realizar los análisis posteriores.

La búsqueda inicial recuperó 659 registros: 519 provenientes de Scopus y 140 de Web of Science. En primer lugar, se eliminaron 130 documentos duplicados mediante la comparación de metadatos como título, DOI y autores, conservando la versión más completa de cada registro. Como resultado de este procedimiento, el corpus se redujo a 529 documentos preliminares.

Posteriormente, se llevó a cabo una revisión de pertinencia temática. En esta etapa se revisaron los títulos de los documentos para excluir aquellos que no presentaban una relación suficiente con CQ, software cuántico o propuestas de ISQ. Como resultado, el corpus se redujo de 529 a 395 documentos. En los casos ambiguos, se revisaron los resúmenes para confirmar la relación del documento con el campo de interés. Esta segunda revisión permitió excluir casos marginales y consolidar un corpus final de 385 documentos, compuesto por 377 registros presentes en Scopus y 8 registros únicos procedentes de Web of Science.

La Tabla 3 sintetiza el proceso de conformación del corpus utilizado en el AB.

Tabla 3. Conformación del corpus del análisis bibliométrico.

Etapas de conformación del corpus	Cantidad
Registros recuperados en Scopus	519
Registros recuperados en Web of Science	140
Total de registros iniciales	659
Registros duplicados eliminados	130
Registros únicos tras eliminar duplicados	529
Registros conservados tras revisión de pertinencia por título	395
Corpus final tras revisión de resúmenes	385
Documentos del corpus final indexados en Scopus	377
Documentos del corpus final indexados en Web of Science	8

Además de la depuración documental, se realizó la normalización de autores. Este procedimiento buscó unificar variantes de escritura, abreviaturas, diferencias en iniciales o formas alternativas de un mismo nombre. Para ello, se priorizó la variante asociada con el mayor número de publicaciones y, en caso de coincidencias, se conservó la forma más estandarizada. Con este proceso, el conjunto de autores se redujo de 1,378 a 1,057.

También se depuraron y normalizaron las palabras clave. El conjunto inicial estuvo compuesto por 2,983 términos, los cuales se redujeron a 2,061 después de una primera limpieza. Posteriormente, se conservaron los términos con presencia en al menos el 2.5% de los documentos relevantes, equivalente a 10 o más documentos dentro del periodo analizado. Este criterio permitió generar 61 agrupaciones iniciales de palabras clave, que después fueron consolidadas en 57 agrupaciones finales mediante la fusión de sinónimos, variantes terminológicas y expresiones equivalentes.

En conjunto, la depuración y normalización permitió pasar de un conjunto inicial de 659 registros a un corpus final de 385 documentos relevantes para el AB. Este procedimiento fue necesario para asegurar que los análisis posteriores se realizaran sobre una base documental consistente, evitando que duplicidades, variantes de autor o dispersión terminológica afectaran la interpretación de la producción científica, la estructura temática y las redes bibliométricas del campo.

3.2.3. Tipo de análisis, herramientas y técnicas empleadas

Una vez conformado el corpus bibliométrico, el AB se desarrolló mediante dos enfoques complementarios: análisis de desempeño y mapeo científico. El análisis de desempeño permitió examinar indicadores asociados con productividad e impacto, tales como número de publicaciones, distribución temporal de documentos, citas e índice h. Por su parte, el mapeo científico permitió explorar la estructura temática, intelectual y colaborativa del campo mediante relaciones bibliométricas como coocurrencia, coautoría, cocitación y acoplamiento bibliográfico.

Esta combinación permitió caracterizar el corpus desde una perspectiva cuantitativa y estructural. De esta manera, el AB no se limitó al conteo de publicaciones, sino que también permitió observar relaciones entre temas, actores académicos, instituciones y países.

Para el análisis temático y evolutivo se utilizó SciMAT, herramienta orientada al mapeo científico y al estudio longitudinal de campos de investigación [48]. En esta investigación, SciMAT se empleó para construir redes de coocurrencia de palabras clave, generar diagramas estratégicos e identificar la evolución de los temas mediante mapas de evolución y solapamiento. El análisis se organizó por periodos anuales dentro del intervalo entre 2020 y el primer trimestre de 2025.

De manera complementaria, se utilizó VOSviewer para el análisis estructural y de colaboración [49]. Esta herramienta se empleó para generar redes de coautoría entre autores y redes de citación entre instituciones y países, con el propósito de observar patrones de colaboración, participación institucional y distribución geográfica de la producción científica relacionada con la ISQ.

La Tabla 4 sintetiza los principales enfoques, técnicas y configuraciones empleados durante el AB. Su propósito es mantener la trazabilidad metodológica del análisis sin extender excesivamente la descripción técnica en el cuerpo del texto.

Tabla 4. Técnicas y configuración del análisis bibliométrico.

Herramienta o enfoque	Propósito analítico	Configuración metodológica aplicada
Análisis de desempeño	Productividad e impacto científico	Revisión de indicadores descriptivos: número de publicaciones, distribución temporal de documentos, suma de citas e índice h.
SciMAT	Análisis temático y evolutivo	Unidad de análisis basada en palabras; uso de palabras de autor y palabras de fuente; exclusión de palabras clave añadidas; periodos de análisis anuales entre 2020 y 2024, más el primer trimestre de 2025; matriz de coocurrencia e índice de equivalencia; generación de mapas estratégicos, de evolución y de solapamiento.
SciMAT	Agrupamiento y valoración de clústeres	Frecuencia mínima de 1, fuerza mínima de enlace de 1, algoritmo de centros simples y tamaño de clúster entre 3 y 12 términos; uso de mapeo principal y mapeo secundario como estrategias de mapeo temático; valoración mediante índice h y suma de citas; análisis longitudinal con índices de Jaccard e inclusión.
VOSviewer	Mapeo de redes bibliométricas	Datos bibliográficos exportados desde Scopus; método de conteo completo; redes de coautoría entre autores y redes de citación entre instituciones y países; umbral mínimo de cinco publicaciones por entidad y máximo de 25 entidades por documento; 10 para el caso de instituciones, según el tipo de mapa generado.
VOSviewer	Alcance de las redes generadas	Análisis concentrado en el periodo 2022-2024; redes de autores, instituciones y países construidas a partir de entidades con participación y conectividad suficientes; un umbral de ≥ 5 publicaciones por entidad.

En el caso de SciMAT, la selección de palabras de autor y palabras de fuente permitió trabajar con términos provenientes directamente de los metadatos bibliográficos. Asimismo, se excluyeron las palabras añadidas para evitar la incorporación de términos externos al corpus. Durante la reducción de datos, se estableció una frecuencia mínima de 1 debido al tamaño relativamente acotado del conjunto documental, con el fin de no excluir términos poco frecuentes que pudieran ser relevantes para describir un campo emergente.

La red bibliométrica se construyó mediante una matriz de coocurrencia y se aplicó el índice de equivalencia para normalizar las relaciones entre términos. La fuerza mínima de enlace de 1 se utilizó para conservar relaciones temáticas básicas entre palabras clave, sin exigir umbrales más altos que pudieran excluir conexiones potencialmente relevantes. Posteriormente, se utilizó el algoritmo Simple Centers para realizar la agrupación temática. El tamaño mínimo de 3 términos por clúster permitió evitar agrupamientos demasiado reducidos o poco interpretables, mientras que el tamaño máximo de 12 términos por clúster limitó la formación de agrupamientos excesivamente amplios. Esta configuración buscó mantener un equilibrio entre granularidad e interpretabilidad temática.

La valoración de los clústeres se apoyó en el índice h y en la suma de citas, con el propósito de considerar no sólo la presencia temática de los grupos identificados, sino también su relevancia relativa dentro del corpus. Para el análisis longitudinal se emplearon los índices de Jaccard e inclusión, utilizados respectivamente en los mapas de evolución y solapamiento, lo que permitió observar continuidad, estabilidad y transformación temática entre periodos consecutivos.

En el caso de VOSviewer, los mapas se generaron a partir de datos bibliográficos exportados desde Scopus, debido a que esta base concentró la mayor cobertura del corpus final. La configuración consideró el método de conteo completo y umbrales mínimos de participación para destacar entidades con presencia sostenida dentro del campo. Asimismo, se limitó el número máximo de entidades por documento con el propósito de reducir posibles sesgos derivados de hiperautoría o de una agregación excesiva en los niveles institucional y nacional.

Como consecuencia de esta configuración, el análisis efectivo de redes se concentró en el periodo 2022–2024, correspondiente al intervalo en el que los datos cumplieron las condiciones establecidas de productividad y conectividad para generar redes interpretables. Esta delimitación es importante porque las redes generadas con VOSviewer no representan la totalidad del periodo general del AB, sino el intervalo seleccionado para este análisis estructural.

Los resultados obtenidos mediante el análisis de desempeño, SciMAT y VOSviewer se presentan en el Capítulo 4.

3.2.4. Síntesis del proceso de análisis bibliométrico

El proceso de AB generó un diagnóstico contextual del campo a partir de un corpus bibliográfico depurado, normalizado y analizado mediante técnicas bibliométricas. Como productos metodológicos se obtuvieron indicadores de desempeño, agrupamientos temáticos, diagramas de relación conceptual y redes de colaboración.

Estos resultados deben interpretarse como una lectura panorámica del comportamiento de la producción científica, no como una evaluación exhaustiva del contenido técnico de todos los estudios recuperados. Esta distinción es importante porque el AB muestra tendencias, concentración temática y relaciones entre actores o conceptos, mientras que la valoración detallada de enfoques, herramientas y propuestas corresponde a la RSL.

Dentro de la ruta metodológica, los productos del AB permitieron delimitar líneas de interés para la RSL y ubicar zonas temáticas que requerían análisis documental especializado. El desarrollo completo y los materiales extensos del AB, incluyendo tablas, mapas y visualizaciones de redes, se concentran en los Anexos B y C, respectivamente, con el fin de mantener en el cuerpo de esta tesis una lectura sintética y conectada con los objetivos del estudio.

3.3. Revisión sistemática de la literatura

Esta sección describe el procedimiento metodológico seguido para conducir la RSL. A diferencia de la sección 3.1.2, donde se presentó su función dentro de la ruta general de la investigación, aquí se documenta el protocolo utilizado para identificar, seleccionar, evaluar, extraer y sintetizar información de estudios relacionados con ISQ. La RSL se planteó como un estudio descriptivo y exploratorio, orientado a organizar evidencia científica reciente y a generar una base documental especializada para la elaboración de QSEAK_v0.

La revisión se desarrolló con apoyo en lineamientos utilizados en IS para planificar, conducir y reportar revisiones sistemáticas de literatura [50], complementados con criterios de transparencia para documentar el proceso de identificación, cribado e inclusión de estudios [51]. Con base en esta orientación, el protocolo consideró la definición de preguntas de investigación (RQs), la selección de fuentes de información, la construcción de la estrategia de búsqueda, los criterios de inclusión (CI) y criterios de exclusión (CE), las notas metodológicas (NM), el proceso de selección de artículos académicos, la evaluación de calidad, la extracción de datos y la síntesis de la información.

El desarrollo de esta sección se organiza en siete apartados. En primer lugar, se presenta la pertinencia de la RSL frente a revisiones previas. Posteriormente, se exponen las RQs que guiaron la revisión. Después, se describen las fuentes de información y la estrategia de búsqueda, los CI y CE, el proceso de selección de artículos académicos, la evaluación de calidad y extracción de datos, así como el procedimiento seguido para sintetizar y analizar la información obtenida.

De esta manera, esta sección documenta la trazabilidad metodológica de la RSL sin adelantar los resultados derivados del análisis. Los hallazgos obtenidos a partir de los estudios seleccionados se presentan posteriormente en el Capítulo 4, particularmente en la sección correspondiente a los resultados de la RSL.

3.3.1. Revisiones previas y pertinencia del estudio

Como parte del diseño de la RSL, se revisaron trabajos secundarios relacionados con CQ, ISQ y áreas vinculadas con el desarrollo de software cuántico. Esta revisión preliminar permitió identificar antecedentes relevantes para contextualizar el campo, pero también mostró que la literatura secundaria disponible presenta alcances heterogéneos y, en varios casos, se concentra en dimensiones particulares del ecosistema cuántico.

En particular, se identificó una revisión centrada directamente en ISQ, orientada a explorar la relación entre CQ e IS y a describir el estado actual del área [26]. No obstante, dicha revisión presenta un carácter principalmente narrativo y no explicita un protocolo sistemático de búsqueda, selección, evaluación y síntesis de estudios. Esta condición limita su trazabilidad metodológica y justifica la necesidad de una revisión sistemática con un procedimiento más explícito.

Asimismo, se reconocieron revisiones sistemáticas, estudios de mapeo y revisiones generales relacionadas con subdominios específicos del CQ y del desarrollo de software cuántico [12], [32], [52]–[54]. Aunque estos trabajos aportan antecedentes valiosos, no integran de manera conjunta el alcance requerido por esta investigación para analizar la ISQ desde una perspectiva metodológica, técnica y formativa.

A partir de lo anterior, la RSL desarrollada en esta investigación se consideró pertinente porque permitió organizar evidencia reciente mediante un protocolo explícito y trazable. Su propósito no fue sustituir las revisiones previas, sino complementarlas mediante una síntesis sistemática orientada a generar una base documental especializada para la elaboración posterior de QSEAK_v0.

3.3.2. Preguntas de investigación

Con base en la delimitación temática obtenida a partir del AB y en el objetivo definido para la RSL, se formularon las RQs que orientaron el análisis de la literatura. Estas preguntas permitieron delimitar los aspectos de la ISQ que serían revisados y establecer una referencia para la organización posterior de la evidencia.

La Tabla 5 presenta las RQs formuladas para la RSL.

Tabla 5. Preguntas de investigación de la revisión sistemática de la literatura.

Identificador	Pregunta de investigación
RQ1	¿Qué metodologías y buenas prácticas se están empleando en la ISQ?
RQ2	¿Qué propuestas existen para definir y estructurar el ciclo de vida del software cuántico?
RQ3	¿Qué enfoques de calidad, validación y pruebas han sido propuestos o adoptados para el desarrollo de software cuántico?
RQ4	¿Cuáles son los principales desafíos y limitaciones documentados en la literatura para el desarrollo de software cuántico en sistemas híbridos basados en el modelo de circuitos cuánticos con tecnología física de superconductores, considerando tanto los aspectos de hardware como los entornos de desarrollo?
RQ4a	¿Cuál es el impacto directo de estas limitaciones en la calidad, confiabilidad y rendimiento del software cuántico?
RQ5	¿Cómo se ha documentado en la literatura el uso y las aplicaciones de Qiskit como herramienta principal para el desarrollo de software cuántico?
RQ6	¿Qué propuestas o enfoques de enseñanza especializada en ISQ se han documentado en la literatura científica?

Estas preguntas se utilizaron como eje de referencia para vincular el objetivo del estudio con los criterios de selección, la extracción de datos y la organización de los resultados.

3.3.3. Fuentes de información y estrategia de búsqueda

Para la recuperación de estudios de la RSL se seleccionaron tres bases de datos científicas: Web of Science, IEEE Xplore Digital Library y ACM Digital Library. La selección de estas fuentes respondió a su pertinencia para localizar literatura académica relacionada con IS, CQ, tecnologías emergentes y desarrollo de software, así como a su cobertura de publicaciones en revistas, congresos y workshops relevantes para el campo.

La búsqueda se efectuó el 18 de noviembre de 2025 y se delimitó al periodo 2019–2025. Esta fecha estableció el corte temporal de recuperación de los registros considerados en la RSL, mientras que el periodo seleccionado respondió al interés de analizar literatura reciente relacionada con ISQ y desarrollo de software cuántico.

La estrategia de búsqueda se diseñó mediante una cadena booleana organizada en dos bloques conceptuales. El primer bloque agrupó términos asociados con el dominio base de la revisión, mientras que el segundo incorporó términos complementarios vinculados con actividades técnicas, metodológicas y formativas de interés para las RQs.

La cadena de búsqueda utilizada fue la siguiente:

("quantum software engineering" OR "quantum software development" OR "quantum software lifecycle" OR "quantum software methodology" OR "quantum software design" OR "quantum software testing" OR "quantum software process" OR "quantum software validation" OR "quantum software evaluation" OR "quantum software quality" OR "quantum software tools" OR "quantum software frameworks" OR "quantum software education" OR "quantum software teaching" OR "quantum programming course" OR "qiskit" OR "quantum devops") AND ("code generation" OR "code" OR "verification" OR "testing framework" OR "best practice" OR "curriculum" OR "education" OR "teaching" OR "learning" OR "competence" OR "pedagogy" OR "tutorial" OR "quantum circuits" OR "quantum hybrid systems" OR "hybrid systems"))

La misma cadena fue utilizada en las tres bases de datos seleccionadas, con el propósito de mantener consistencia en la recuperación de estudios y reducir variaciones derivadas del uso de estrategias distintas entre fuentes. Los registros recuperados mediante esta estrategia constituyeron el conjunto inicial de documentos de la RSL.

Las decisiones posteriores relacionadas con CI, CE, NM, cribado y selección de estudios se describen en los apartados siguientes.

3.3.4. Criterios de inclusión, exclusión y notas metodológicas

Para delimitar el alcance de la RSL, se definieron CI, CE y NM. Estos elementos permitieron establecer condiciones explícitas para determinar qué estudios podían incorporarse al análisis y cuáles debían descartarse por no ajustarse al objetivo de la revisión.

Los CI se orientaron a recuperar literatura académica escrita en inglés, publicada entre 2019 y 2025, con revisión por pares y relación explícita con la ISQ o el desarrollo de

software cuántico. Asimismo, permitieron considerar estudios con aportes relacionados con metodologías, ciclos de vida, procesos, calidad, validación, pruebas, herramientas, entornos de desarrollo, Qiskit, desafíos técnicos con impacto en el software cuántico, sistemas híbridos, propuestas educativas y enfoques conceptuales aplicables al desarrollo o formación en ISQ.

Los CE permitieron descartar documentos que no cumplieran las condiciones mínimas de pertinencia documental, metodológica o temática. En términos generales, se excluyeron trabajos fuera del periodo definido, escritos en idiomas distintos al inglés, sin revisión por pares, sin acceso al texto completo o con menciones superficiales al software cuántico. También se descartaron estudios centrados en áreas no alineadas con el objetivo de la RSL, como trabajos exclusivamente físicos, matemáticos, teóricos, de hardware o de aprendizaje automático y aprendizaje automático cuántico, cuando no establecían una relación explícita con procesos, herramientas, actividades o formación en ISQ.

Además de los CI y CE, se definieron NM para orientar decisiones en casos ambiguos. Estas notas fueron necesarias porque parte de la literatura sobre software cuántico no especifica con claridad el modelo computacional, la tecnología física utilizada o la relación entre entornos de desarrollo, herramientas y actividades de desarrollo. Por ello, se establecieron criterios de interpretación para evitar exclusiones prematuras y mantener consistencia en la clasificación de estudios potencialmente relevantes.

En conjunto, los CI, CE y NM contribuyeron a mantener la coherencia del proceso de selección y a reducir decisiones arbitrarias durante la revisión. El desarrollo ampliado del proceso y de los resultados de la RSL se presenta en el Anexo D. Por su parte, el listado completo de CI, CE, NM, categorías temáticas y criterios de calidad (QA) se integra en el Anexo E, correspondiente a los instrumentos metodológicos de la revisión. Su aplicación dentro del proceso de selección, evaluación y extracción de datos se describe en los apartados siguientes.

3.3.5. Proceso de selección de artículos académicos

El proceso de selección de artículos académicos se desarrolló a partir de los registros recuperados mediante la estrategia de búsqueda descrita en el apartado anterior. Esta etapa tuvo como propósito depurar el conjunto inicial de documentos y conservar aquellos estudios con vinculación suficiente con el objetivo de la RSL y con las RQs formuladas.

En primer lugar, se integraron los registros recuperados en las bases de datos seleccionadas y se eliminaron los documentos duplicados. Posteriormente, se realizó el cribado mediante la revisión de títulos y resúmenes, aplicando los CI, los CE y las NM previamente definidos. Esta revisión permitió descartar documentos claramente alejados del alcance de la RSL y conservar aquellos pertinentes para una evaluación posterior.

Durante esta etapa también se verificó la correspondencia general entre los estudios retenidos y las RQs. Asimismo, los documentos seleccionados fueron organizados

mediante los tópicos temáticos definidos para el proyecto, con el fin de facilitar su manejo durante las fases posteriores de evaluación, extracción y síntesis.

El proceso fue documentado mediante un diagrama de flujo basado en PRISMA 2020 [51], utilizando la variante orientada a búsquedas en bases de datos y registros. Este recurso permitió registrar de manera ordenada las etapas de identificación, eliminación de duplicados, cribado y selección de estudios. El flujo cuantitativo derivado de este proceso se presenta posteriormente en el apartado 4.2.1, como parte de los resultados de la RSL.

Los estudios seleccionados en esta etapa constituyeron la base documental sobre la cual se aplicó posteriormente la evaluación de calidad y la extracción de datos. Dichos procedimientos se describen en el apartado siguiente.

3.3.6. Evaluación de calidad y extracción de datos

Una vez concluido el proceso de selección de estudios, se realizó una evaluación de calidad sobre los artículos académicos retenidos. Esta etapa tuvo como propósito valorar la pertinencia, claridad y solidez de cada estudio respecto del objetivo de la RSL y de las RQs formuladas. Para ello, se empleó un conjunto de QA definidos específicamente para esta revisión.

Los QA permitieron revisar aspectos como la existencia de una contribución sustantiva para la ISQ, la claridad de los objetivos, la definición del contexto cuántico, la adecuación del enfoque al desarrollo de software cuántico, la descripción metodológica, la evidencia o validación presentada, la reproducibilidad, la delimitación de la contribución y la calidad formal del documento.

Los QA fueron evaluados mediante una escala de cumplimiento de tres niveles: cumplimiento completo, cumplimiento parcial y no cumplimiento. Esta escala permitió valorar el grado en que cada estudio satisfacía los criterios definidos, evitando una clasificación estrictamente binaria entre aceptación y rechazo. De esta manera, la evaluación funcionó como un mecanismo para ponderar la solidez y pertinencia de la evidencia disponible, distinguiendo entre estudios con aportes sustantivos, estudios con contribuciones parciales pero relevantes y estudios con una relación insuficiente respecto de los criterios establecidos.

Durante la aplicación de los QA se consideró también la relación de cada estudio con las preguntas RQ1–RQ6. En particular, se revisó si los trabajos aportaban elementos técnicos, metodológicos o formativos relacionados con metodologías y buenas prácticas, ciclo de vida, calidad, validación y pruebas, sistemas híbridos, Qiskit y ecosistema tecnológico, así como enseñanza y formación en ISQ.

A partir de este proceso, y considerando tanto el nivel de cumplimiento obtenido en los QA como la relevancia del estudio respecto de las RQs, se conformó un corpus final de 67 artículos académicos para análisis completo. Esta decisión no se asumió como una selección automática basada únicamente en la evaluación de calidad, sino como una

valoración combinada entre cumplimiento de los criterios, pertinencia temática y contribución al objetivo de la RSL.

De manera complementaria, se llevó a cabo la extracción de datos de los estudios seleccionados. Esta extracción se orientó a registrar información necesaria para responder las RQs y preparar la síntesis posterior. Entre los datos extraídos se consideraron el tipo de aporte del estudio, el tópico temático asociado o RQs relacionadas, las herramientas o enfoques abordados, las características técnicas relevantes, las limitaciones reportadas y los elementos útiles para identificar patrones, brechas o necesidades formativas en ISQ.

La información extraída fue utilizada como insumo para la etapa posterior de síntesis y análisis, descrita en el apartado siguiente, donde los estudios se organizaron en función de los tópicos T1–T8 y las preguntas RQ1–RQ6.

3.3.7. Síntesis y análisis de la información

La síntesis y análisis de la información se realizaron a partir de los datos extraídos de los 67 estudios seleccionados para análisis completo. Esta etapa tuvo como propósito organizar la evidencia recuperada y establecer una estructura de interpretación coherente con las RQs de la RSL, sin modificar el corpus previamente definido.

El análisis combinó un tratamiento cuantitativo básico con una síntesis cualitativa de carácter narrativo. El componente cuantitativo retomó la clasificación temática T1–T8, con el propósito de reconocer la distribución general de los estudios por áreas de contribución. Esta revisión permitió identificar la presencia relativa de los tópicos dentro del corpus, sin que ello implicara una nueva selección de artículos académicos ni una ponderación automática de su importancia.

El componente cualitativo se desarrolló mediante una síntesis narrativa organizada alrededor de las preguntas RQ1–RQ6. Para ello, los estudios fueron revisados según su relación con cada pregunta de investigación y con los tópicos temáticos previamente asignados. Esta organización permitió integrar trabajos con enfoques distintos dentro de una estructura común de análisis, facilitando la comparación entre los distintos tipos de contribución documentados en la literatura.

Durante la síntesis se consideraron también las NM definidas en etapas previas, especialmente en aquellos casos donde existían ambigüedades terminológicas o diferencias en la forma de reportar el contexto cuántico, las herramientas utilizadas, el tipo de contribución o la relación del estudio con actividades propias del desarrollo de software cuántico. Esto permitió mantener consistencia en la interpretación de estudios con aportes parciales, transversales o relacionados con más de una pregunta de investigación.

La síntesis no se planteó como un metaanálisis estadístico, debido a la heterogeneidad de los estudios incluidos y a la diversidad de enfoques, herramientas, contextos y tipos de contribución identificados. En su lugar, se adoptó una síntesis descriptiva y narrativa orientada a reconocer patrones, tendencias, vacíos y relaciones entre los aportes documentados en la literatura.

En conjunto, esta etapa permitió preparar la evidencia para su presentación en el Capítulo 4 y generar una base documental especializada para la elaboración posterior de QSEAK_v0. De esta manera, los resultados de la RSL no fueron trasladados de forma automática a la propuesta, sino que sirvieron como insumo para la interpretación, reorganización y articulación formativa desarrollada en la fase siguiente. El desarrollo y los instrumentos de la RSL, incluyendo CI, CE, NM, tópicos temáticos y QA, se concentran en los Anexos D y E, respectivamente, con el fin de mantener en el cuerpo de esta tesis una lectura sintética y conectada con los objetivos del estudio.

3.4. Elaboración de la versión inicial del marco referencial

Esta sección describe el procedimiento seguido para elaborar QSEAK_v0 como versión inicial del marco de fundamentos referenciales. La actividad formó parte de la tercera fase y retomó los insumos del AB, la RSL y literatura complementaria sobre CQ, IS e ISQ.

Metodológicamente, la elaboración se organizó en cuatro actividades principales: clasificación temática, priorización de contenido, elaboración de la propuesta inicial y desarrollo de versiones en español e inglés. Estas actividades permitieron transformar los insumos documentales en una estructura de áreas, componentes y tópicos, sin presentar todavía la delimitación conceptual completa del marco.

Estos elementos fueron articulados con referentes especializados de ISQ, trabajos que vinculan fundamentos de CQ con IS y referentes disciplinares de IS, sin asumir una equivalencia directa con cuerpos de conocimiento consolidados [4], [19], [23]–[25], [28].

Los apartados siguientes describen cada actividad. La revisión académica inicial, aunque forma parte de la tercera fase, se aborda por separado en la sección 3.5 porque corresponde al contraste preliminar del producto construido.

3.4.1. Clasificación temática

La clasificación temática tuvo como propósito organizar los contenidos identificados durante la investigación en una estructura inicial para la versión inicial del marco. Para ello, se distinguieron tres niveles de organización: áreas de conocimiento, componentes y tópicos. Las áreas funcionan como grandes bloques, los componentes como agrupaciones intermedias y los tópicos como unidades temáticas específicas.

El principal insumo para esta clasificación fue la RSL, debido a que permitió reconocer temas, prácticas, herramientas, desafíos y necesidades documentadas en la literatura especializada sobre ISQ. Sin embargo, las categorías obtenidas en la revisión no fueron trasladadas de manera directa al marco; se utilizaron como mapa inicial para identificar núcleos temáticos, relaciones entre contenidos y posibles funciones formativas.

La clasificación incorporó también literatura complementaria sobre CQ, IS e ISQ. Para ubicar contenidos de base se retomaron trabajos relacionados con fundamentos de CQ,

fundamentos matemáticos y referentes disciplinares de IS [17]–[19], [22], [23], [55], [56]. Esta revisión permitió distinguir qué conocimientos actuaban como base conceptual y cuáles correspondían a dimensiones más técnicas o profesionales.

En el caso de los conocimientos técnicos especializados, la clasificación se apoyó principalmente en los hallazgos de la RSL. A partir de estos resultados se agruparon contenidos relacionados con actividades, artefactos, herramientas, procesos, integración, calidad y evaluación del software cuántico e híbrido. Esta agrupación buscó conservar una relación clara con preocupaciones propias de la IS, pero considerando las condiciones particulares del desarrollo clásico-cuántico.

Los conocimientos transversales y profesionales se organizaron a partir de literatura especializada en ISQ y de preocupaciones recurrentes sobre adopción, gestión, comunicación, colaboración, reproducibilidad y actualización profesional [4], [24], [25], [28]. Con ello, la clasificación no se limitó a contenidos técnicos, sino que incorporó dimensiones necesarias para situar la práctica de la ISQ en contextos académicos, profesionales y organizacionales.

Como resultado, los contenidos se organizaron en tres áreas principales: fundamentos, conocimientos técnicos especializados y conocimientos transversales y profesionales. La trazabilidad entre insumos, temas identificados e incorporación inicial en áreas y componentes del marco se documenta en la matriz sintética incluida en el Anexo F. Este apartado presenta la lógica metodológica de clasificación; el desarrollo conceptual de las áreas se presenta en el Capítulo 4.

3.4.2. Priorización de contenido

La priorización de contenido tuvo como propósito establecer un orden inicial para la presentación y articulación de los contenidos incluidos en la versión inicial del marco. A diferencia de la clasificación temática, que permitió agrupar los insumos en la estructura interna de la propuesta, esta actividad se orientó a definir una secuencia razonada para presentar dichos contenidos de manera progresiva.

Esta actividad no se planteó como una evaluación formal para aceptar o descartar contenidos, sino como un proceso de ordenamiento interpretativo. Se consideraron criterios como pertinencia para comprender la ISQ, recurrencia en la literatura, relación con otros temas identificados, dependencia conceptual y función de soporte para la formación inicial.

La recurrencia en la literatura fue tomada como un indicio relevante, pero no como un criterio automático de jerarquización. Algunos contenidos se priorizaron por aparecer con frecuencia en los estudios revisados, mientras que otros se incorporaron por su función de soporte conceptual, por su relación con contenidos posteriores o por su capacidad para conectar conocimientos de CQ, IS e ISQ.

También se consideró la dependencia conceptual entre contenidos. Bajo este criterio, los fundamentos matemáticos, computacionales, de IS y de CQ se ubicaron como base inicial; posteriormente, se organizaron contenidos relacionados con desarrollo, integración y

evaluación del software cuántico e híbrido; finalmente, se incorporaron dimensiones transversales y profesionales vinculadas con gestión, colaboración, comunicación y actualización continua.

La priorización no debe entenderse como una jerarquía definitiva ni como una ruta curricular cerrada. En esta investigación funciona como una secuencia metodológica razonada y adaptable, cuya trazabilidad con los insumos revisados se documenta en la matriz sintética incluida en el Anexo F.

3.4.3. Elaboración de la propuesta inicial

Una vez clasificados y priorizados los contenidos, se elaboró QSEAK_v0 como primera versión documentada del marco de fundamentos referenciales QSEAK. Esta actividad convirtió la organización temática previa en una propuesta estructurada y orientada a la formación inicial en ISQ.

La elaboración de la propuesta implicó revisar la función de cada nivel de organización. Las áreas debían operar como bloques amplios de conocimiento; los componentes, como agrupaciones intermedias con coherencia temática; y los tópicos, como unidades específicas que permitieran delimitar el alcance de cada componente. Esta revisión evitó que el marco se convirtiera en una lista acumulativa de temas sin relación interna.

Durante este proceso se revisó la coherencia interna de la estructura, la ubicación de los contenidos y la relación entre los insumos documentales y la propuesta resultante. Evitar duplicidades no significó eliminar toda coincidencia temática, sino impedir que un mismo contenido apareciera en varios componentes sin una función diferenciada. Cuando un tema podía relacionarse con más de un área, se ubicó según su papel principal dentro de la formación inicial.

También se cuidó que la estructura mantuviera una progresión razonada. Los contenidos de fundamentos se colocaron como base de comprensión; los conocimientos técnicos especializados se organizaron alrededor de actividades y problemas propios del desarrollo de software cuántico o híbrido; y las dimensiones transversales se mantuvieron como criterios profesionales que acompañan la práctica técnica. La delimitación completa de propósito, alcance y carácter referencial se desarrolla en el Capítulo 4, donde el producto se presenta como resultado de la investigación.

3.4.4. Desarrollo de las versiones en español e inglés

El desarrollo de las versiones en español e inglés tuvo como propósito disponer de dos documentos lingüísticamente equivalentes de QSEAK_v0, de manera que la propuesta pudiera ser comunicada y revisada en distintos contextos académicos. Esta actividad no modificó la estructura conceptual del marco, sino que buscó conservar la correspondencia entre áreas, componentes, tópicos y descripciones en ambos idiomas.

La versión en español se elaboró como documento principal de trabajo dentro de esta investigación. En ella se cuidó la consistencia terminológica entre los conceptos de CQ, IS e ISQ, así como la correspondencia interna entre los distintos niveles de organización del marco. Asimismo, se procuró mantener una redacción académica clara, homogénea y coherente con el carácter formativo de la propuesta.

Posteriormente, se preparó la versión en inglés con el objetivo de ampliar la comunicabilidad académica del marco y facilitar su revisión por parte de especialistas no hispanohablantes. Esta versión no se planteó como una traducción literal, sino como una adaptación terminológica orientada a conservar el sentido conceptual de la versión en español. Para ello, se revisó la correspondencia entre términos como Ingeniería de Software Cuántico y *Quantum Software Engineering*, Ingeniería de Software y *Software Engineering*, Cómputo Cuántico y *Quantum Computing*, así como otros conceptos asociados con el desarrollo de software cuántico o clásico-cuánticas.

Durante la elaboración de ambas versiones se verificó que la estructura general se mantuviera equivalente. Esto implicó revisar que las áreas, componentes, tópicos y descripciones conservaran correspondencia entre idiomas, evitando ajustes que alteraran el alcance conceptual de la propuesta. También se procuró que los títulos, acrónimos y expresiones técnicas fueran consistentes con la literatura especializada y con el propósito formativo del marco.

Como resultado de esta actividad, se obtuvieron dos versiones documentadas de la propuesta: la versión en español, integrada como Anexo G, y la versión en inglés, integrada como Anexo H.

3.5. Revisión y refinamiento

La revisión académica inicial tuvo como propósito someter QSEAK_v0 a la valoración de especialistas relacionados con ISQ, CQ, IS y áreas afines, con el fin de obtener retroalimentación sobre la claridad, alcance, profundidad, secuenciación y pertinencia de la propuesta. Esta etapa se planteó como un ejercicio inicial de contraste académico, no como una validación formal o definitiva del marco. En consecuencia, las observaciones recibidas fueron consideradas como insumos para identificar posibles líneas de mejora hacia una versión posterior.

La selección de posibles revisores se realizó de manera intencional, considerando su relación académica con el campo de estudio. Para ello, se conformó un listado inicial de especialistas vinculados con ISQ, CQ, IS o áreas afines. Algunos fueron identificados por su participación en redes académicas relacionadas con ISQ; otros fueron seleccionados a partir de las referencias utilizadas durante la elaboración del marco o por su trayectoria en disciplinas cercanas al objeto de estudio. Esta selección no tuvo como finalidad integrar una muestra estadísticamente representativa, sino reunir perspectivas especializadas que permitieran contrastar críticamente la propuesta.

El proceso de contacto inició el 13 de mayo de 2026 y se desarrolló mediante rondas sucesivas de correos electrónicos. En la invitación se explicó el propósito general de la revisión y se solicitó retroalimentación sobre aspectos como pertinencia de los contenidos, profundidad del tratamiento, secuenciación de los apartados, claridad conceptual, alcance de la propuesta y posible presencia de elementos faltantes, sobredimensionados o susceptibles de reorganización. Asimismo, se indicó que las observaciones podían compartirse en el formato que resultara más conveniente para cada revisor, ya fuera mediante comentarios en el documento, un archivo separado o una respuesta por correo electrónico.

El documento fue compartido en español o en inglés, de acuerdo con el perfil de cada revisor. Esta decisión permitió mantener la accesibilidad de la propuesta para especialistas hispanohablantes y, al mismo tiempo, ampliar el alcance de la revisión hacia investigadores de otros contextos académicos. En ambos casos, el contenido enviado correspondió a la misma versión inicial, conservando la estructura general del marco. Los mensajes base utilizados para la invitación inicial y para el envío posterior de la propuesta, así como la evidencia documental asociada con el proceso de contacto, se presentan en el Anexo I y en el archivo digital correspondiente.

Debido a que la propuesta correspondía a un documento preliminar y no publicado, inicialmente se consideró el uso de un acuerdo de confidencialidad, cuya aceptación debía expresarse por correo electrónico antes de compartir el material. Sin embargo, a partir de comentarios recibidos y tras discutirlo internamente, el 22 de mayo de 2026 se decidió retirar dicho acuerdo como requisito para participar en la revisión. Esta modificación tuvo como finalidad facilitar la participación de los revisores y reducir barreras para recibir retroalimentación. No obstante, al enviar el documento se reiteró que el material debía utilizarse únicamente con fines de revisión académica y retroalimentación.

Las observaciones recibidas fueron revisadas y organizadas de acuerdo con su tipo de contribución. Se distinguieron comentarios orientados a ajustes puntuales de contenido, observaciones sobre secuenciación y claridad conceptual, recomendaciones de ampliación o reorganización, y sugerencias metodológicas relacionadas con trazabilidad, validación futura y delimitación de alcances. Este procedimiento permitió analizar la retroalimentación sin incorporarla de manera automática a la versión documentada en esta tesis, ya que cada posible modificación debía valorarse según su pertinencia, justificación conceptual y posible sustento en la literatura.

En este sentido, el refinamiento considerado en esta etapa no implicó la construcción completa de una nueva versión del marco dentro de esta tesis. Más bien, consistió en identificar oportunidades de mejora y líneas de ajuste para una versión posterior, denominada preliminarmente QSEAK_v0.1. Por ello, QSEAK_v0 se mantiene como la versión de partida documentada, mientras que las observaciones académicas recibidas constituyen una agenda de refinamiento posterior. El flujo de contacto, los perfiles de los revisores que aportaron retroalimentación y la síntesis de sus observaciones se presentan en el capítulo de resultados.

Capítulo 4. Resultados

Este capítulo presenta los resultados de la investigación, organizados en cuatro bloques principales: los resultados del AB, los resultados de la RSL, la organización inicial del marco de fundamentos referenciales QSEAK y la revisión académica inicial. Posteriormente, se desarrolla una discusión integradora, se presentan las amenazas a la validez y se sintetizan los productos obtenidos.

4.1. Resultados del análisis bibliométrico

Esta sección presenta los principales resultados derivados del AB, desarrollado para caracterizar el comportamiento reciente de la producción científica relacionada con la ISQ durante el periodo entre 2020 y el primer trimestre de 2025. A diferencia del capítulo metodológico, donde se describió el procedimiento de búsqueda, depuración y análisis de metadatos, aquí se analizan los hallazgos obtenidos a partir del corpus final.

La presentación de resultados se organiza en cinco apartados. Primero, se describe el corpus y el alcance del análisis. Después, se expone la evolución temporal de la producción científica. Posteriormente, se sintetiza la estructura temática y la evolución del campo a partir de los resultados obtenidos con SciMAT. Enseguida, se presentan las redes de colaboración identificadas mediante VOSviewer. Finalmente, se explica el aporte del AB dentro de la investigación y su relación con las fases posteriores del estudio.

4.1.1. Corpus y alcance del análisis

El corpus final del AB quedó conformado por 385 documentos en idioma inglés relacionados con la ISQ y áreas afines, recuperados de Scopus y Web of Science. Del total analizado, 377 documentos correspondieron a registros presentes en Scopus y ocho a registros únicos procedentes de Web of Science. El proceso mediante el cual se conformó este corpus fue descrito previamente en el apartado metodológico correspondiente.

El periodo cubierto por el análisis comprende de 2020 al primer trimestre de 2025. Esta delimitación permitió observar el comportamiento reciente de la producción científica vinculada con la ISQ. Sin embargo, los resultados correspondientes a 2025 deben interpretarse con cautela, debido a que sólo representan una fracción del año y no un periodo completo comparable directamente con los años anteriores.

El alcance del AB se centró en el análisis de metadatos bibliográficos. Por ello, los resultados derivados de esta fase permiten describir patrones de producción científica, evolución temática, relaciones entre palabras clave y redes de colaboración. En consecuencia, este apartado no evalúa en profundidad el contenido técnico de cada publicación, sino que delimita la base documental empleada para los resultados bibliométricos que se presentan en los apartados siguientes.

4.1.2. Evolución temporal y productividad científica

La evolución temporal de la producción científica muestra un crecimiento sostenido de las publicaciones relacionadas con la ISQ durante el periodo analizado. A partir del corpus final del AB, se identificó que la producción inició en 2020 con un volumen todavía reducido de documentos y aumentó progresivamente hasta alcanzar su punto más alto en 2024. Este comportamiento permite observar una mayor presencia del campo en la literatura científica reciente, aunque no implica por sí mismo una madurez plena del área.

La Figura 2 presenta la distribución temporal de documentos identificados entre 2020 y el primer trimestre de 2025.

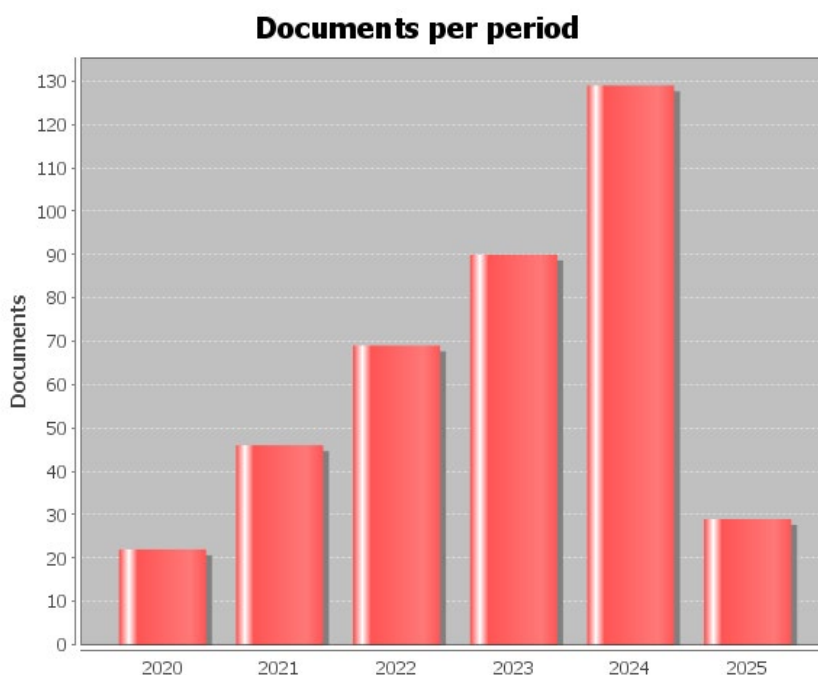


Figura 2. Distribución temporal de documentos del corpus bibliométrico entre 2020 y el primer trimestre de 2025.

En 2020 se identificaron 22 documentos, lo que representa el punto de partida del periodo analizado. En los años posteriores se observa una tendencia ascendente en la cantidad de publicaciones, hasta llegar a 2024, año en el que se registró el mayor volumen de producción científica, con 129 documentos. Este incremento sugiere una consolidación progresiva del interés académico por la ISQ dentro de las bases analizadas.

Los resultados correspondientes a 2025 deben interpretarse con cautela, debido a que sólo cubren el primer trimestre del año. Por esta razón, la disminución aparente respecto de 2024 no debe entenderse como una reducción real de la producción científica, sino como consecuencia del corte temporal del estudio. Aun así, durante los primeros tres meses de 2025 se identificaron 29 documentos, cantidad superior a la registrada durante todo 2020.

En términos generales, la evolución temporal muestra que la ISQ ha incrementado su visibilidad científica durante el periodo analizado. Sin embargo, el crecimiento en el número de publicaciones no permite concluir automáticamente que el campo se encuentre plenamente consolidado desde el punto de vista conceptual, metodológico o formativo. Por ello, la lectura temporal debe complementarse con el análisis de la estructura temática y de las redes de colaboración, los cuales se presentan en los apartados siguientes.

4.1.3. Estructura temática y evolución del campo

El análisis temático realizado con SciMAT permitió identificar la estructura conceptual del corpus y observar la evolución de los principales clústeres durante el periodo entre 2020 y el primer trimestre de 2025. A diferencia del apartado anterior, centrado en la productividad científica por año, este apartado describe los temas que articularon la producción analizada y los cambios observados entre periodos.

La Figura 3 presenta el mapa de evolución temática del corpus analizado. Este recurso permite observar la continuidad, transformación y relación entre los principales clústeres identificados durante el periodo de estudio.

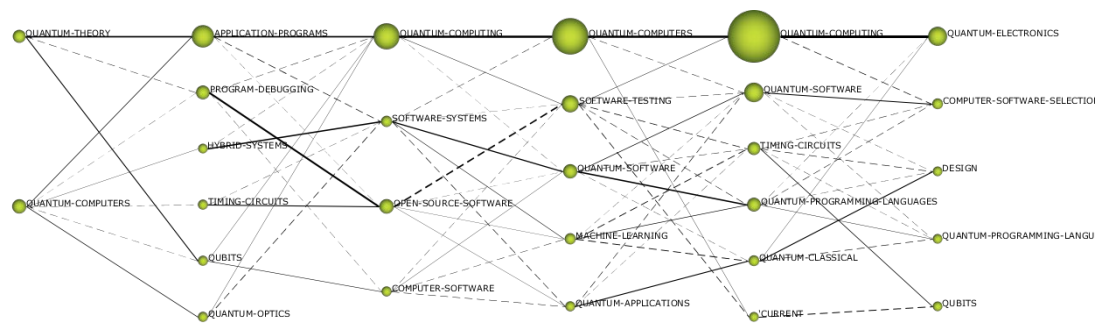


Figura 3. Mapa de evolución temática del corpus bibliométrico durante el periodo 2020-primer trimestre de 2025 basado en documentos.

De manera complementaria, la Tabla 6 sintetiza los clústeres principales identificados por periodo. Esta tabla permite ubicar de forma general los temas predominantes en cada etapa del análisis, sin sustituir la interpretación evolutiva desarrollada posteriormente.

Tabla 6. Clústeres temáticos por periodo del análisis bibliométrico.

Periodo	Clústeres
2020	QUANTUM-COMPUTERS, QUANTUM-THEORY
2021	APPLICATION-PROGRAMS, HYBRID-SYSTEMS, PROGRAM-DEBUGGING, QUANTUM-OPTICS, QUBITS, TIMING-CIRCUITS

2022	COMPUTER-SOFTWARE, OPEN-SOURCE-SOFTWARE, QUANTUM-COMPUTING, SOFTWARE-SYSTEMS
2023	MACHINE-LEARNING, QUANTUM-APPLICATIONS, QUANTUM-COMPUTERS, QUANTUM-SOFTWARE, SOFTWARE-TESTING
2024	‘CURRENT, QUANTUM-CLASSICAL, QUANTUM-COMPUTING, QUANTUM-PROGRAMMING-LANGUAGES, QUANTUM-SOFTWARE, TIMING-CIRCUITS
Primer trimestre de 2025	COMPUTER-SOFTWARE-SELECTION-AND-EVALUATION, DESIGN, QUANTUM-ELECTRONICS, QUANTUM-PROGRAMMING-LANGUAGES, QUBITS

Algunos clústeres conservan denominaciones amplias derivadas de los metadatos bibliográficos. Por ello, su interpretación debe asumirse como un indicio temático dentro del corpus analizado y no como una categoría conceptual cerrada de la ISQ.

A grandes rasgos, los resultados muestran una transición temática desde clústeres inicialmente centrados en fundamentos cuánticos y computacionales hacia temas más cercanos al desarrollo de software cuántico, lenguajes de programación, pruebas, diseño, evaluación e integración clásico-cuántica. Esta evolución sugiere que, durante el periodo analizado, la producción científica comenzó a desplazarse gradualmente desde una visión más general del CQ hacia preocupaciones asociadas con la construcción, evaluación y organización de software cuántico e híbrido.

En 2020, la estructura temática se concentró principalmente en QUANTUM-COMPUTERS y QUANTUM-THEORY. La presencia de estos clústeres indica que, al inicio del periodo, la producción científica todavía estaba fuertemente asociada con fundamentos conceptuales, físicos y computacionales del CQ. En esta etapa no se observa una separación clara entre el estudio general del CQ y los problemas específicos del desarrollo de software cuántico, por lo que la ISQ aparece todavía como un dominio emergente.

Durante 2021, la estructura temática comenzó a diversificarse mediante clústeres como APPLICATION-PROGRAMS, PROGRAM-DEBUGGING e HYBRID-SYSTEMS. Este resultado introduce preocupaciones más cercanas a la aplicación, depuración e interacción entre componentes clásicos y cuánticos. Aunque todavía se mantienen clústeres vinculados con fundamentos físicos y tecnológicos, la aparición de temas asociados con programas, depuración y sistemas híbridos anticipa una aproximación más clara hacia problemas propios del desarrollo de software.

En 2022, los clústeres OPEN-SOURCE-SOFTWARE, SOFTWARE-SYSTEMS y COMPUTER-SOFTWARE mostraron una mayor aproximación hacia el ecosistema de desarrollo. A diferencia de los años iniciales, en este periodo comenzaron a aparecer con mayor claridad términos relacionados con sistemas, herramientas y recursos de software. Esto sugiere una transición gradual desde el estudio del CQ como tecnología hacia la consideración de elementos necesarios para construir, organizar y utilizar soluciones de software cuántico.

Para 2023, los clústeres QUANTUM-SOFTWARE y SOFTWARE-TESTING evidenciaron una mayor visibilidad del software cuántico como objeto de estudio específico dentro del corpus analizado. La presencia de SOFTWARE-TESTING resulta especialmente significativa, ya que muestra una atención creciente hacia actividades de evaluación, comprobación y aseguramiento de la calidad, dimensiones directamente vinculadas con la IS. Asimismo, la coexistencia con clústeres como QUANTUM-APPLICATIONS y MACHINE-LEARNING indica que el campo continuaba articulándose con dominios de aplicación y tecnologías emergentes.

En 2024, la estructura temática se amplió con clústeres como QUANTUM-COMPUTING, QUANTUM-SOFTWARE, QUANTUM-PROGRAMMING-LANGUAGES y QUANTUM-CLASSICAL. En este periodo se advierte una mayor presencia de temas relacionados con software, programación cuántica e integración clásico-cuántica. La permanencia de QUANTUM-COMPUTING como eje relevante indica que el campo aún conserva una base asociada con el CQ general, mientras que los clústeres más específicos evidencian un proceso de diferenciación progresiva hacia preocupaciones propias de la ISQ.

En el primer trimestre de 2025, los clústeres COMPUTER-SOFTWARE-SELECTION-AND-EVALUATION, DESIGN y QUANTUM-PROGRAMMING-LANGUAGES sugieren continuidad en la aparición de temas asociados con evaluación, diseño y lenguajes de programación. No obstante, estos resultados deben interpretarse con cautela debido a que corresponden únicamente a un corte parcial del año. Aun así, la presencia de estos clústeres permite observar que el campo continúa incorporando preocupaciones relacionadas con la selección, organización y evaluación de software.

Los mapas de evolución y solapamiento muestran continuidad temática entre periodos consecutivos. Los temas no cambiaron de forma abrupta, sino que se mantuvieron, reorganizaron y especializaron progresivamente. Esta evolución permite observar una especialización gradual del campo y una presencia cada vez más clara de preocupaciones propias de la ISQ.

Este resultado aportó una base contextual para la investigación, al mostrar que la ISQ se encuentra en un proceso de consolidación temática, aunque todavía con una estructura dispersa y en desarrollo. A partir de esta lectura, se justificó la necesidad de una revisión especializada capaz de profundizar en contenidos técnicos, metodológicos y formativos del campo.

El desarrollo ampliado del AB se presenta en el Anexo B, correspondiente al artículo académico derivado del AB. Por su parte, el material técnico complementario, incluyendo diagramas estratégicos, redes temáticas, tablas de centralidad y densidad, mapas de solapamiento y visualizaciones adicionales, se concentra en el Anexo C.

4.1.4. Redes de colaboración

Las redes bibliométricas generadas mediante VOSviewer permitieron complementar la lectura temática del AB con una aproximación a la configuración social e institucional de la producción científica relacionada con la ISQ. Mientras que el apartado anterior mostró la evolución de los principales clústeres temáticos, este apartado presenta la forma en que autores, instituciones y países se articulan dentro del corpus analizado.

El análisis efectivo de redes se concentró en el periodo 2022–2024, debido a que en este intervalo se identificaron entidades con suficiente productividad y conectividad para generar redes interpretables. Por ello, los resultados presentados en este apartado no deben entenderse como una representación exhaustiva de todo el periodo entre 2020 y el primer trimestre de 2025, sino como una aproximación a los años con mayor consolidación colaborativa dentro del corpus.

En primer lugar, se analizó la red de coautoría entre autores. La figura 4 permite identificar agrupamientos de colaboración y comunidades académicas con participación reconocible dentro de la producción científica relacionada con la ISQ.

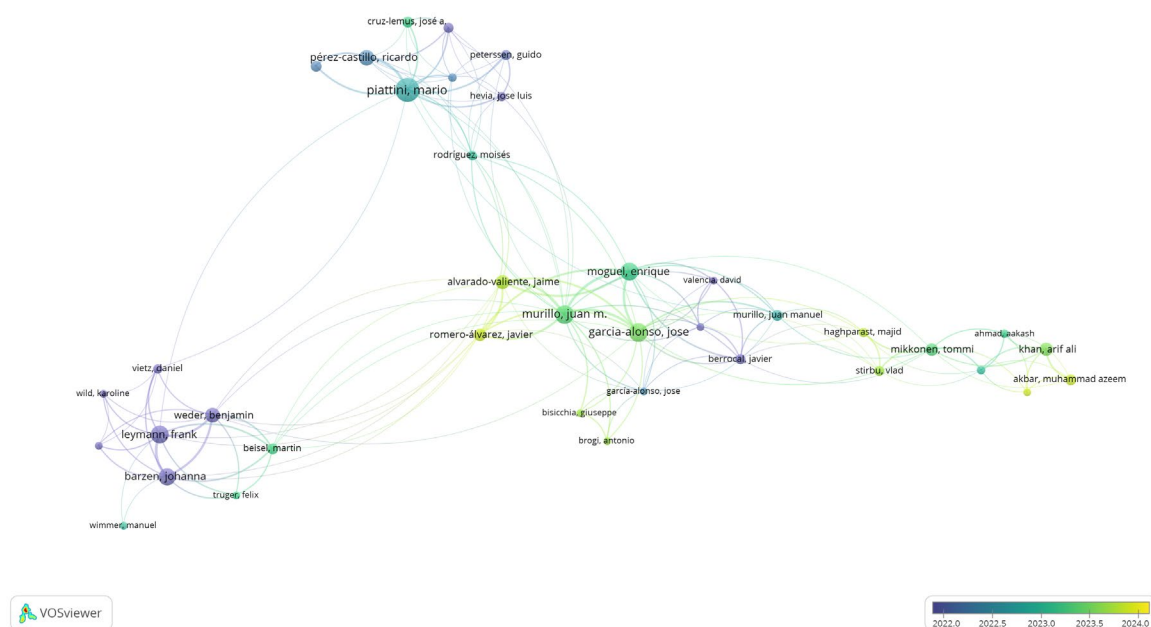


Figura 4. Red de coautoría de autores en el corpus bibliométrico durante el periodo 2022-2024.

En la red de coautoría se observan comunidades académicas organizadas alrededor de núcleos relativamente consolidados. Entre ellos destaca un grupo asociado con Mario Piattini, Ricardo Pérez-Castillo, José A. Cruz-Lemus y José Luis Hevia, así como otro núcleo vinculado con Juan M. Murillo, Enrique Moguel y José García-Alonso. También se identifica una subred más especializada integrada por Frank Leymann, Johanna Barzen y Benjamin Weder. Esta configuración muestra que la producción científica relacionada con

la ISQ no se encuentra completamente dispersa, sino articulada alrededor de grupos con actividad reconocible.

En segundo lugar, se analizó la red de citación entre instituciones. La red visualizada en la Figura 5 permite observar instituciones con mayor visibilidad y conectividad dentro de la producción científica relacionada con la ISQ.

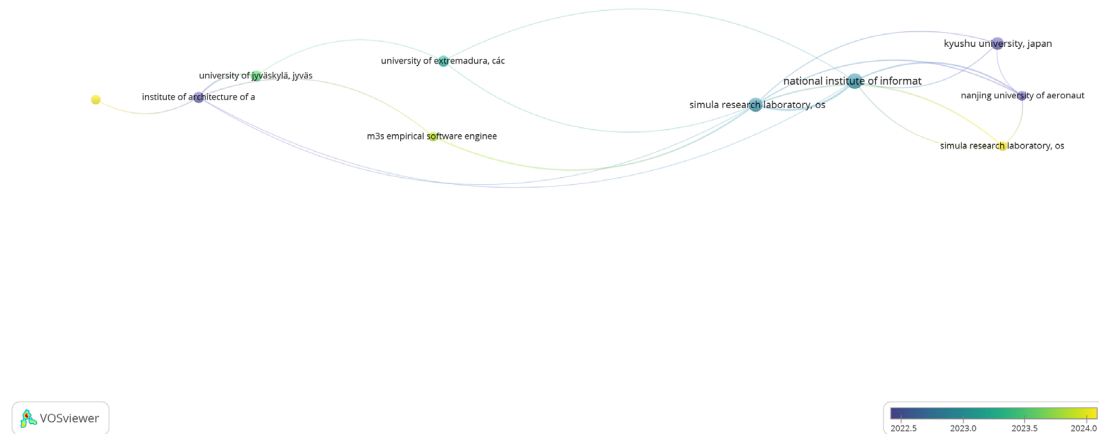


Figura 5. Red de citación entre instituciones en el corpus bibliométrico durante el periodo 2022-2024.

En la red institucional se identifican instituciones con alta visibilidad dentro del campo, entre ellas Simula Research Laboratory y National Institute of Informatics. Junto a estos nodos centrales, también aparecen instituciones con presencia creciente, como University of Jyväskylä y University of Extremadura. Esta distribución sugiere una estructura institucional en la que conviven centros con liderazgo sostenido y actores que han comenzado a ganar relevancia dentro de la producción científica reciente.

En tercer lugar, se analizó la red de citación entre países. La Figura 6 permite observar la distribución geográfica de la producción científica y las relaciones de influencia entre países dentro del corpus analizado.

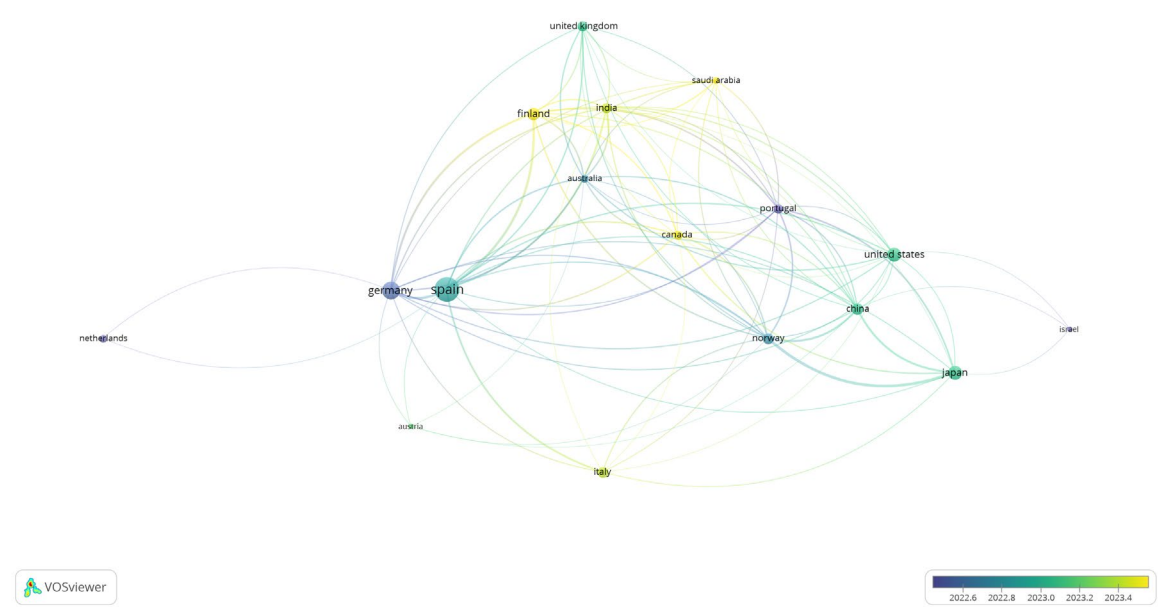


Figura 6. Red de citación entre países en el corpus bibliométrico durante el periodo 2022-2024.

La red de citación entre países muestra una distribución internacional del campo, con España y Alemania como nodos destacados por su visibilidad y conectividad. También aparecen países como Reino Unido, Finlandia, India, Japón, China y Estados Unidos, lo que refleja una participación geográfica diversa en la circulación del conocimiento relacionado con ISQ. Esta configuración permite observar que el campo se articula mediante distintos polos académicos, aunque con grados desiguales de centralidad y participación.

La Tabla 7 sintetiza las entidades más destacadas en las redes analizadas y su lectura general dentro del AB.

Tabla 7. Entidades destacadas en las redes bibliométricas.

Nivel de análisis	Entidades destacadas	Interpretación
Autores	Mario Piattini, Ricardo Pérez-Castillo, José A. Cruz-Lemus y José Luis Hevia	Núcleo consolidado de coautoría con actividad sostenida en ISQ.
	Juan M. Murillo, Enrique Moguel y José García-Alonso	Grupo con posible función articuladora entre líneas y comunidades de investigación.
	Frank Leymann, Johanna Barzen y Benjamin Weder	Subred especializada, con colaboración más delimitada y foco técnico específico.
Instituciones	Simula Research Laboratory y National Institute of Informatics	Instituciones con posición central en la red de citación.

	University of Jyväskylä y University of Extremadura	Instituciones con presencia reciente y creciente dentro de la red.
Países	España y Alemania	Polos principales de visibilidad y conectividad científica.
	Reino Unido, Finlandia, India, Japón, China y Estados Unidos	Nodos relevantes que amplían la dimensión internacional de la red.

En conjunto, las redes de colaboración y citación muestran que la ISQ cuenta con comunidades académicas activas, núcleos institucionales identificables y una distribución internacional en expansión. Sin embargo, la red también evidencia cierta concentración alrededor de autores, instituciones y países con mayor visibilidad, lo que sugiere una consolidación todavía desigual. Esta lectura complementa los resultados temáticos del apartado anterior y permite observar que la evolución conceptual del campo se encuentra acompañada por comunidades académicas que comienzan a articularse de manera más estable.

El desarrollo ampliado de las redes bibliométricas se presenta en el Anexo B, correspondiente al artículo académico derivado del AB.

4.1.5. Aporte del análisis bibliométrico a la investigación

El AB aportó a la investigación una caracterización contextual del campo de la ISQ durante el periodo entre 2020 y el primer trimestre de 2025. A partir del corpus analizado, fue posible observar el crecimiento reciente de la producción científica, la evolución de los principales temas abordados y la configuración general de redes académicas asociadas con autores, instituciones y países. Estos resultados permitieron ubicar la ISQ como un campo emergente con actividad científica creciente, pero aún heterogénea en términos de temas, comunidades y niveles de consolidación.

La evolución temporal mostró un aumento progresivo en la cantidad de publicaciones relacionadas con la ISQ, especialmente hacia 2024. No obstante, este crecimiento no se interpretó como evidencia suficiente de madurez disciplinar, ya que el volumen de publicaciones por sí solo no permite determinar el grado de consolidación de metodologías, herramientas, procesos o enfoques formativos. Por ello, el AB se asumió como una aproximación inicial al comportamiento general del campo.

El aporte principal del AB fue interpretativo y delimitador: permitió reconocer temas con mayor visibilidad, líneas de actividad recurrente y zonas que requerían análisis especializado. Por tanto, sus resultados no definieron por sí mismos los componentes de QSEAK_v0, sino que justificaron la necesidad de una revisión documental posterior con mayor profundidad conceptual, metodológica y formativa.

4.2. Resultados de la revisión sistemática de la literatura

Esta sección presenta los resultados derivados de la RSL, desarrollada como fase de profundización posterior al AB. Mientras el AB permitió caracterizar el comportamiento general del campo a partir de metadatos bibliográficos, la RSL permitió examinar con mayor detalle los estudios especializados relacionados con enfoques, propuestas, herramientas, desafíos y elementos formativos de la ISQ.

La sección se organiza en ocho apartados. Primero, se presenta la identificación, selección y clasificación temática de los estudios. Posteriormente, se desarrollan los resultados relacionados con metodologías y buenas prácticas, propuestas de ciclo de vida, calidad, verificación, validación y pruebas, sistemas híbridos, Qiskit y ecosistema tecnológico, y enseñanza y formación en ISQ. Finalmente, se expone el aporte de la RSL dentro de la investigación.

Los apartados temáticos siguientes no reproducen de manera exhaustiva todos los estudios clasificados en cada tópico. En su lugar, sintetizan las principales líneas identificadas en la RSL y citan trabajos representativos para ejemplificar cada tipo de aporte. La trazabilidad metodológica de la revisión se conserva en el Anexo E, correspondiente a los instrumentos de la RSL.

Esta organización permite mostrar la diversidad de dimensiones desde las cuales la literatura revisada aborda la ISQ, sin reducir el campo únicamente a la programación de circuitos o al uso de herramientas específicas. Asimismo, prepara la lectura de los hallazgos que se desarrollan en los apartados siguientes, los cuales permiten identificar elementos técnicos, metodológicos y formativos relevantes para la construcción posterior de QSEAK_v0.

4.2.1. Identificación, selección y clasificación temática

El proceso de identificación, selección y clasificación temática permitió conformar el conjunto de estudios utilizado para la RSL. A diferencia del apartado metodológico, donde se describieron las fuentes, criterios e instrumentos empleados, este apartado presenta los resultados obtenidos tras aplicar el protocolo de revisión.

La búsqueda inicial permitió recuperar 1,571 registros en las bases de datos seleccionadas. Después de eliminar 231 registros duplicados, se obtuvo un conjunto de 1,340 documentos para cribado. A partir de la aplicación de los criterios definidos, se seleccionaron 587 estudios para clasificación temática y evaluación posterior. Finalmente, tras la evaluación de calidad y la valoración de pertinencia respecto de las RQs, se conformó un corpus final de 67 artículos académicos para análisis completo.

La Figura 7 presenta el flujo general seguido durante la identificación, cribado y selección de estudios. Este diagrama permite visualizar la transición desde el conjunto inicial de registros hasta el corpus final utilizado para el análisis completo, por lo que se integra en este apartado como resultado del proceso de selección.

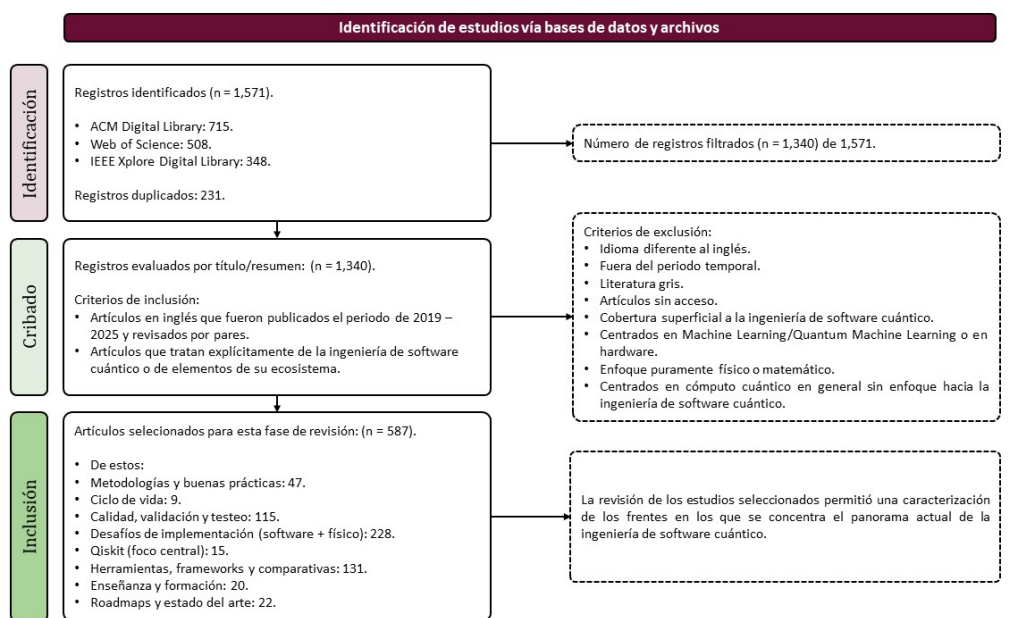


Figura 7. Diagrama PRISMA 2020 para la identificación, cribado y selección de estudios de la revisión sistemática de la literatura.

Posteriormente, los 587 estudios retenidos fueron organizados mediante los tópicos temáticos T1–T8. Esta clasificación permitió ordenar el corpus de acuerdo con las líneas de interés de la RSL y relacionar los estudios con las RQs. Aunque algunos trabajos podían vincularse con más de una dimensión de la ISQ, para fines de organización cada estudio fue asignado al tópico que representaba mejor su contribución principal.

La Tabla 8 presenta la distribución de los estudios clasificados por tópico temático.

Tabla 8. Categorías temáticas de la revisión sistemática de la literatura y distribución de estudios.

Identificador	Categoría temática	Relación con las RQs	Cantidad
T1	Metodologías y buenas prácticas	RQ1	47
T2	Propuestas de ciclo de vida	RQ2	9
T3	Calidad, validación y pruebas	RQ3; parcialmente RQ4a	115
T4	Desafíos de implementación asociados con software y restricciones físicas	RQ4; RQ4a	228
T5	Qiskit como foco central	RQ5	15
T6	Herramientas, entornos de desarrollo y comparativas	Parcialmente RQ5; contexto del ecosistema	131
T7	Enseñanza y formación	RQ6	20
T8	Rutas de consolidación del campo y estado del arte	Contexto transversal	22

La distribución muestra una concentración importante de estudios en tres tópicos: T4, correspondiente a desafíos de implementación asociados con software y restricciones físicas; T6, relacionado con herramientas, entornos de desarrollo y comparativas; y T3, asociado con calidad, validación y pruebas. En conjunto, estos tópicos reúnen la mayor parte de la literatura clasificada, lo que indica una atención predominante hacia problemas técnicos, condiciones de ejecución, herramientas de desarrollo y mecanismos de evaluación del software cuántico.

En contraste, los tópicos T2, T5 y T7 presentaron una menor cantidad de estudios. Esto sugiere que las propuestas explícitas de ciclo de vida, los trabajos centrados específicamente en Qiskit y las propuestas de enseñanza y formación aparecen con menor presencia relativa dentro del corpus clasificado. Esta lectura no implica ausencia de aportes en dichas líneas, sino una menor amplitud documental frente a los tópicos vinculados con desafíos técnicos, herramientas y calidad.

La Figura 8 presenta de manera visual la distribución de estudios por tópico temático, permitiendo observar con mayor claridad la concentración de la literatura en desafíos de implementación, herramientas y calidad.

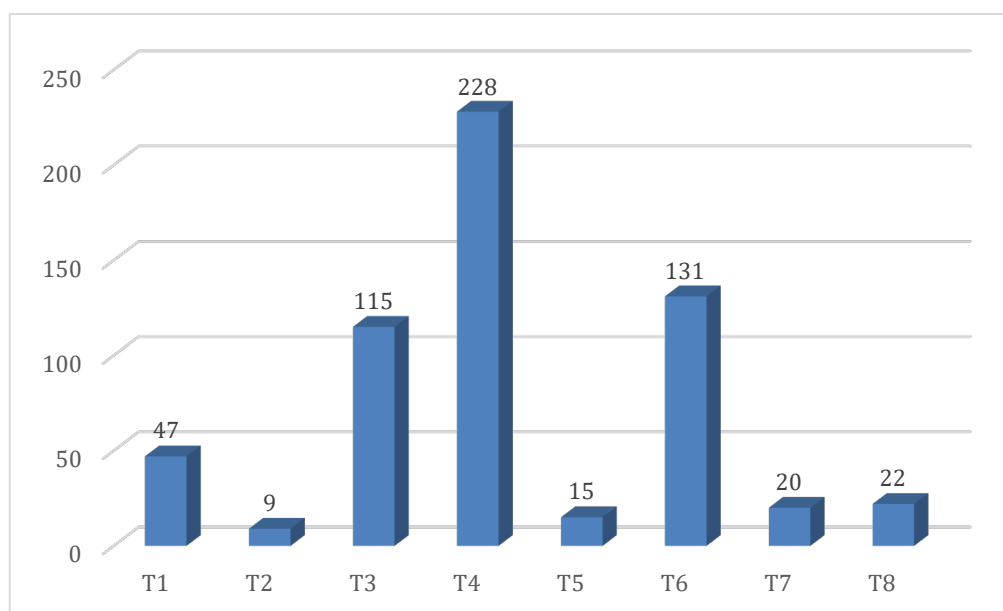


Figura 8. Distribución de estudios incluidos por categoría temática de la revisión sistemática de la literatura.

En conjunto, la clasificación temática permitió reconocer las áreas con mayor y menor presencia dentro de la literatura revisada. Estos resultados sirvieron como base para organizar la síntesis narrativa de los apartados siguientes, donde se analizan con mayor detalle los hallazgos relacionados con metodologías, ciclo de vida, calidad, sistemas híbridos, Qiskit, ecosistema tecnológico y formación en ISQ.

4.2.2. Metodologías y buenas prácticas

Los resultados relacionados con metodologías y buenas prácticas muestran que la ISQ no se aborda únicamente desde la implementación de circuitos, sino también desde enfoques de ingeniería orientados al proceso, diseño, modelado, organización del desarrollo y adecuación técnica a restricciones cuánticas. En este tópico se identifican propuestas que operan en distintos niveles: desde prácticas de diseño y configuración hasta estrategias de compilación, optimización, simulación y mapeo.

En el nivel de proceso y diseño, los estudios revisados enfatizan la necesidad de manejar variabilidad, restricciones y decisiones de desarrollo bajo condiciones propias del dominio cuántico. Se identifican propuestas de metaprogramación para representar variables de elección, atributos cuantitativos y restricciones asociadas con aspectos como crosstalk, fidelidad, exactitud y profundidad del circuito [57]. También se reportan enfoques basados en líneas de producto de software para gestionar configuraciones híbridas clásico-cuánticas [33], así como propuestas de ingeniería basada en modelos, lenguajes específicos de dominio, generación automática de software cuántico y extensiones del lenguaje unificado de modelado para representar sistemas con componentes cuánticos [58]–[62].

En el plano organizacional, la literatura incorpora adaptaciones de enfoques ágiles, modelos predictivos para estimar condiciones de éxito o costo en proyectos cuánticos y propuestas de *Quantum DevOps* orientadas a mejorar la confiabilidad en contextos NISQ [34], [63], [64]. Estos aportes amplían la noción de buenas prácticas más allá de la codificación, al considerar incertidumbre tecnológica, variabilidad de ejecución, experimentación continua y coordinación del proceso de desarrollo.

También se identifican prácticas asociadas con reusabilidad, reproducibilidad, mantenibilidad y documentación técnica. En este grupo se ubican trabajos sobre patrones de diseño, detección automática de patrones, empaquetado de experimentos reproducibles, evolución de repositorios y mantenimiento de flujos de trabajo [65]–[68]. De manera complementaria, algunas contribuciones de síntesis y arquitectura presentan la ISQ como un conjunto de guías, procedimientos y prácticas vinculadas con distintas actividades del desarrollo de software cuántico [27], [69]. En el nivel técnico, estas prácticas se reflejan en estrategias de compilación, mapeo, enrutamiento y reutilización de qubits, orientadas a producir circuitos más eficientes o compatibles con restricciones específicas [70], [71].

La evidencia responde a la RQ1 al mostrar que las metodologías y buenas prácticas en ISQ aún no conforman un enfoque único plenamente consolidado. Lo que se observa es un conjunto de aproximaciones parciales que adaptan principios de IS a problemas de modelado, variabilidad, organización del desarrollo, reproducibilidad, mantenimiento y adecuación técnica. Esta lectura sitúa el desarrollo de software cuántico como una actividad que requiere prácticas de ingeniería sensibles a las restricciones del dominio cuántico.

4.2.3. Propuestas de ciclo de vida

Los resultados relacionados con ciclo de vida muestran cómo la literatura intenta estructurar el desarrollo de software cuántico más allá de la construcción aislada de circuitos. Aunque los estudios centrados explícitamente en este tópico tienen menor presencia relativa frente a otras líneas temáticas, su aportación es relevante porque permiten reconocer fases, actividades, artefactos y decisiones que comienzan a organizar el proceso de desarrollo en ISQ.

Los estudios revisados presentan distintos niveles de formalización. Algunas propuestas plantean ciclos de vida explícitos, mientras que otras describen sólo fases, actividades o componentes parciales del proceso. Entre las aproximaciones más estructuradas se identifica un ciclo con orientación DevOps para contextos NISQ, que articula actividades de planeación, codificación, construcción, pruebas, liberación, evaluación, despliegue, configuración, monitoreo y retroalimentación [34]. En este caso, el interés no se limita a la adopción de DevOps como práctica organizacional, sino a su uso como estructura para ordenar actividades recurrentes del desarrollo de software cuántico.

También se identifican propuestas que buscan organizar el desarrollo desde una perspectiva más amplia. Un ejemplo es el ciclo de vida de diez fases para software cuántico basadas en compuertas, el cual reconoce problemas abiertos por fase y subraya el carácter híbrido clásico-cuántico del proceso [31]. De manera complementaria, se reporta un modelo iterativo de pila completa para entornos híbridos, orientado a articular diseño, implementación y despliegue sobre infraestructuras clásico-cuánticas [16]. Estas contribuciones muestran que el ciclo de vida en ISQ tiende a vincular decisiones de software con restricciones de ejecución, integración e infraestructura.

Otros trabajos no formulan un ciclo de vida integral, pero aportan elementos útiles para comprender actividades específicas del proceso. En este grupo se ubican propuestas de configuración para desarrollo híbrido clásico-cuántico, recomendaciones asociadas con adopción ágil y estimación de éxito o costo en proyectos cuánticos, así como revisiones que organizan la evidencia mediante fases tradicionales de la IS, como requerimientos, diseño, implementación, pruebas y mantenimiento [27], [33], [64]. Asimismo, algunas aproximaciones resaltan la arquitectura de software como subproceso articulador de requisitos, modelado, evaluación y despliegue [69].

Además de los modelos explícitos, la literatura permite reconocer actividades recurrentes que funcionan como fases implícitas del desarrollo. En el diseño se reporta el uso de representaciones intermedias para preservar estructura y restricciones antes de tomar decisiones dependientes del hardware. En la implementación aparecen flujos multietapa asociados con síntesis, descomposición, mapeo, enrutamiento, preparación del circuito y compilación [72]–[74]. Estas actividades no siempre se presentan como un ciclo de vida completo, pero evidencian que el desarrollo de software cuántico requiere coordinar decisiones de análisis, diseño, implementación, pruebas, despliegue, monitoreo y mantenimiento bajo condiciones técnicas particulares.

En conjunto, los hallazgos responden a la RQ2 al evidenciar que existen propuestas de ciclo de vida y fases de desarrollo para software cuántico, pero con distintos grados de formalización. Más que un modelo general ampliamente aceptado, la literatura ofrece aproximaciones que buscan ordenar actividades de análisis, diseño, implementación, pruebas, despliegue, monitoreo y mantenimiento bajo restricciones propias del dominio cuántico. Por ello, el ciclo de vida aparece como una dimensión necesaria, aunque todavía en consolidación, para estructurar el desarrollo de soluciones cuánticas e híbridas.

4.2.4. Calidad, verificación, validación y pruebas

Los resultados relacionados con calidad, verificación, validación y pruebas muestran que el software cuántico requiere enfoques adaptados a propiedades propias del dominio. Entre estas propiedades se encuentran el comportamiento probabilístico, la medición destructiva, la sensibilidad al hardware, las transformaciones introducidas durante la compilación y la dificultad de establecer oráculos de prueba directos. En consecuencia, la calidad del software cuántico no puede evaluarse únicamente mediante criterios tradicionales de corrección funcional.

En materia de pruebas y validación, se identifican enfoques orientados a comparar comportamientos entre implementaciones, configuraciones o representaciones del software. Un ejemplo de ello son las pruebas diferenciales de pilas de software cuántico, utilizadas para detectar inconsistencias entre distintos entornos o implementaciones [75]. También se reportan propuestas de validación basada en modelos, donde se emplean restricciones formales para verificar condiciones de buena formación en representaciones de circuitos o sistemas cuánticos [76]. Desde la ingeniería dirigida por modelos, algunos estudios señalan además dificultades para probar y depurar modelos cuánticos, especialmente cuando los fallos pueden originarse tanto en la representación del software como en factores externos asociados con la ejecución [59].

Otro grupo de trabajos aborda la verificación formal y el análisis estático. En esta categoría se ubican estudios orientados a verificar equivalencia de circuitos, transformaciones de compilación o propiedades de programas cuánticos mediante técnicas formales, como el cálculo ZX o esquemas especializados para flujos de compilación [77], [78]. De manera complementaria, se identifican herramientas que trasladan prácticas de análisis estático al dominio cuántico, por ejemplo, mediante la detección de errores en programas cuánticos o el análisis de propiedades de entrelazamiento [79], [80].

Además de la corrección funcional, la literatura revisada incorpora preocupaciones asociadas con fidelidad, reproducibilidad y evaluación comparativa. Algunos estudios buscan estimar la fidelidad esperada de una ejecución, conservar paquetes reproducibles de experimentos o comparar procesos de transformación bajo criterios de desempeño y compatibilidad [67], [81], [82]. Estos aportes evidencian que la calidad del software cuántico depende no sólo del código fuente, sino también de las transformaciones aplicadas al circuito, los supuestos experimentales y la posibilidad de repetir o contrastar resultados.

En relación con la RQ3, la evidencia ubica la calidad en ISQ como una dimensión transversal que involucra programa, modelo, circuito, compilación y evaluación. Los enfoques de pruebas, validación basada en modelos, verificación formal, análisis estático, estimación de fidelidad, reproducibilidad y evaluación comparativa funcionan como estrategias complementarias frente a problemas que no aparecen con la misma intensidad en el software clásico, como el comportamiento probabilístico, la dependencia del hardware, las transformaciones de compilación y la dificultad de establecer oráculos de prueba directos.

4.2.5. Desarrollo de software en sistemas híbridos clásico-cuánticos

La literatura revisada sobre sistemas híbridos enfatiza que las soluciones cuánticas actuales dependen de la coordinación entre componentes clásicos, circuitos cuánticos, infraestructura de ejecución y restricciones del hardware NISQ. Desde esta evidencia, el desarrollo de software cuántico aparece como una actividad condicionada por factores técnicos que exceden al programa en sí mismo.

La evolución hacia programas híbridos refuerza la necesidad de analizar el software cuántico no como un artefacto aislado, sino como parte de soluciones que articulan componentes clásicos, recursos cuánticos, infraestructura de ejecución y decisiones de integración [83]. Esta lectura permite ubicar los sistemas híbridos como una dimensión central para la ISQ, ya que el comportamiento de una solución no depende únicamente del circuito implementado, sino también de la forma en que se prepara, ejecuta, coordina y evalúa.

En el plano del hardware, los estudios revisados reportan variabilidad entre dispositivos, cambios de calibración, errores en compuertas, errores de lectura y limitaciones de conectividad, aspectos que afectan la estabilidad de las ejecuciones y la posibilidad de anticipar el comportamiento de una solución [20]. También se identifican restricciones de escalabilidad asociadas con técnicas como el corte de circuitos, la compilación basada en restricciones y el mapeo de qubits. Estas condiciones obligan a establecer compromisos entre profundidad, fidelidad, conectividad y uso de recursos [21], [84].

Desde la perspectiva de integración, la literatura documenta fricciones relacionadas con la gestión de múltiples proveedores y plataformas de ejecución, la coordinación entre recursos clásicos y cuánticos, las colas de ejecución, la interoperabilidad, la dependencia de plataforma y la orquestación de flujos híbridos [85], [86]. En este contexto, algunos trabajos abordan la integración desde enfoques de pila completa, operación continua, mantenimiento o patrones híbridos orientados a organizar la interacción entre componentes clásicos y cuánticos [16], [27], [68], [87].

Estas restricciones inciden directamente en el desempeño esperado de las soluciones. Algunos estudios señalan que la profundidad y anchura de los circuitos pueden afectar la calidad del resultado, mientras que la variación temporal de las condiciones de calibración introduce inestabilidad en el rendimiento [88], [89]. Aunque las estrategias de optimización y mitigación de errores pueden mejorar ciertos resultados, la literatura

revisada muestra que no eliminan por completo las limitaciones físicas y operativas propias de los dispositivos NISQ.

Desde esta perspectiva, la RQ4 y la RQ4a se atienden al mostrar que los sistemas híbridos no constituyen sólo un contexto de despliegue, sino una condición estructural del software cuántico actual. Las restricciones del hardware, la variabilidad de plataformas, la interoperabilidad y las condiciones de ejecución inciden en la calidad, confiabilidad, rendimiento y operación de las soluciones. Por ello, comprender el software cuántico exige analizarlo como parte de un entorno híbrido en el que las decisiones de diseño, integración, compilación y ejecución se condicionan mutuamente.

4.2.6. Qiskit y ecosistema tecnológico

Los resultados relacionados con Qiskit y el ecosistema tecnológico muestran que el desarrollo de software cuántico se apoya en un conjunto diverso de entornos de desarrollo, lenguajes, simuladores, plataformas y servicios de ejecución. Dentro de este entorno, Qiskit aparece como una referencia importante por su uso en programación, simulación, transpilación, experimentación y acceso a infraestructura cuántica de IBM. Sin embargo, la literatura revisada también muestra que la ISQ no debe reducirse a una sola herramienta, ya que las decisiones tecnológicas dependen del tipo de problema, del flujo de desarrollo y de las condiciones de ejecución disponibles.

Qiskit se utiliza con frecuencia como base experimental para comparar propuestas de compilación, transpilación, preparación de estados y optimización de circuitos. En distintos estudios, sus componentes o niveles de optimización funcionan como punto de referencia para evaluar mejoras en desempeño, reducción de compuertas, disminución de error o adecuación a restricciones de ejecución [90]–[92]. Esta función como entorno de referencia refuerza su presencia dentro del campo, pero también exige reportar con claridad versiones, configuraciones y condiciones experimentales.

Además de su uso como entorno experimental, Qiskit se documenta como un puente entre el diseño de circuitos y su procesamiento técnico posterior. La literatura lo vincula con actividades de descomposición, enrutamiento, transpilación, simulación y análisis de resultados [20], [73], [89]. También se reporta como uno de los entornos de desarrollo más adoptados, asociado con su integración con Python, su ecosistema de extensiones y su utilidad para experimentación, síntesis, control y optimización [68], [93], [94].

Al mismo tiempo, los estudios revisados identifican limitaciones que impiden asumirlo como solución única. Entre ellas se encuentran la heterogeneidad entre versiones, la disponibilidad incompleta de ciertas compuertas, restricciones prácticas asociadas con el entorno de ejecución de Python, diferencias de rendimiento frente a simuladores o herramientas especializadas, y dependencia de plataformas o proveedores específicos [82], [95], [96]. Por ello, la selección de herramientas en ISQ requiere considerar compatibilidad, desempeño, portabilidad, reproducibilidad y adecuación al contexto de uso.

En respuesta a la RQ5, Qiskit se identifica como una herramienta relevante para programación, simulación, transpilación y experimentación, pero su importancia debe interpretarse dentro de un ecosistema tecnológico más amplio. Su uso como entorno de referencia convive con limitaciones de versión, compatibilidad, desempeño, portabilidad y dependencia de plataforma. Por tanto, la selección de herramientas en ISQ requiere una valoración contextual y comparativa, no la adopción de una solución única.

4.2.7. Enseñanza y formación en ingeniería de software cuántico

Los resultados relacionados con enseñanza y formación muestran que la literatura educativa se concentra con mayor frecuencia en CQ general y programación cuántica que en trayectorias específicas para el desarrollo de software cuántico desde una perspectiva de IS. En este apartado se reportan las evidencias de la RSL sin repetir la discusión conceptual desarrollada en el marco teórico.

En el ámbito educativo se identifican experiencias apoyadas en entornos reproducibles, laboratorios, kits de desarrollo de software y herramientas como Qiskit, PennyLane y Ocean SDK [97]. También se reportan comparaciones entre kits de desarrollo como Qiskit, ProjectQ, Cirq y Forest, útiles para reconocer dificultades de instalación, ejecución y visualización en cursos introductorios [98]. En estos casos, las herramientas funcionan como medios para reducir la barrera de entrada y facilitar la experimentación formativa.

Desde una perspectiva curricular y de competencias, la literatura señala una brecha entre las capacidades deseables para la ISQ y la oferta formativa disponible. Algunos estudios analizan la educación en computación clásica y cuántica desde un enfoque centrado en competencias [38], mientras que otros examinan la relación entre oferta y demanda en la formación de fuerza laboral para ISQ [35]. De manera complementaria, se identifican propuestas orientadas a programación, depuración, estimación de recursos, ejecución y evaluación automatizada, así como experiencias didácticas apoyadas en laboratorios, Python, Qiskit, Jupyter, instrucciones programadas o recursos asistidos por modelos de lenguaje a gran escala [36], [41], [42], [99].

La lectura conjunta de estos trabajos permite precisar una diferencia importante: la disponibilidad de recursos, cursos, laboratorios y experiencias educativas sobre CQ o programación cuántica no equivale por sí misma a una formación específica en ISQ. Una trayectoria orientada a ISQ requiere articular fundamentos cuánticos con procesos de software, arquitectura, integración, calidad, pruebas, documentación, mantenimiento, trazabilidad, reproducibilidad y evaluación sistemática. Esta articulación es necesaria para que el aprendizaje no se limite al uso de herramientas o a la ejecución de circuitos, sino que incorpore criterios propios de la producción, evolución y evaluación de software en entornos cuánticos e híbridos.

En consecuencia, la evidencia revisada confirma que la formación específicamente orientada a ISQ sigue siendo limitada y dispersa. Este hallazgo respaldó la necesidad de elaborar QSEAK_v0 como una propuesta inicial de organización de conocimientos, capaz de reunir fundamentos, herramientas, competencias técnicas y dimensiones profesionales

bajo una lógica de IS. Así, la RQ6 se responde al evidenciar una brecha formativa que justifica estructurar una preparación inicial más ordenada para perfiles vinculados con el desarrollo de software cuántico.

4.2.8. Aporte de la revisión sistemática de la literatura a la investigación

La RSL aportó una base documental especializada para comprender el estado actual de la ISQ más allá de los metadatos bibliométricos. Su análisis permitió examinar estudios relacionados con metodologías, ciclo de vida, calidad, verificación, validación, pruebas, sistemas híbridos, herramientas y formación.

A partir de esa evidencia se identificaron dimensiones técnicas, metodológicas y formativas relevantes para la construcción posterior del marco. En particular, la RSL permitió reconocer qué líneas del campo cuentan con mayor desarrollo documental, qué aspectos aparecen todavía fragmentados y qué necesidades se repiten en relación con la formación de perfiles capaces de desarrollar software cuántico o híbrido.

El aporte de esta fase fue servir como puente entre el diagnóstico panorámico del AB y la elaboración de QSEAK_v0. Las categorías derivadas de la RSL no fueron trasladadas de manera automática al marco; se reinterpretaron en función de su pertinencia para organizar fundamentos, conocimientos técnicos especializados y dimensiones transversales de la ISQ.

De esta manera, la RSL complementó al AB: mientras el AB permitió reconocer cómo se comporta el campo en términos de producción científica y relaciones temáticas, la RSL permitió examinar con mayor profundidad qué contenidos, prácticas y desafíos podían sustentar una propuesta referencial para la formación inicial.

4.3. Versión inicial del marco referencial

QSEAK_v0 constituye uno de los resultados centrales de la investigación, al presentar una organización inicial de conocimientos orientada a la formación en ISQ, como primera versión del marco de fundamentos referenciales QSEAK. Su función es reunir y estructurar contenidos relevantes para comprender este campo desde una perspectiva de IS y preparar la delimitación que se desarrolla en el apartado siguiente.

El marco se organiza en tres áreas de conocimiento: Fundamentos, Conocimientos técnicos especializados y Conocimientos transversales y profesionales. Esta estructura articula una base conceptual inicial, una dimensión técnica relacionada con la creación, integración y evaluación de soluciones clásico-cuánticas, y una dimensión transversal asociada con aspectos profesionales, colaborativos, organizacionales y de actualización continua.

Los apartados siguientes presentan la versión inicial del marco de manera progresiva. Primero se expone su propósito y delimitación; después se describe su estructura general mediante áreas, componentes y tópicos; posteriormente se desarrollan las tres áreas principales, y al final se sintetiza su aporte dentro de la investigación.

4.3.1. Propósito y delimitación del marco referencial

El propósito de QSEAK_v0 es organizar un conjunto de conocimientos relevantes para la formación inicial en ISQ, a partir de una estructura referencial compuesta por niveles de organización del conocimiento. La propuesta surge ante la necesidad de articular fundamentos, conocimientos técnicos especializados y dimensiones transversales o profesionales vinculadas con el desarrollo de sistemas con componentes cuánticos. En este sentido, busca aportar a la identificación sobre qué elementos pueden resultar pertinentes en la preparación introductoria de perfiles asociados con este campo, especialmente desde una perspectiva de IS.

El alcance del marco es formativo y referencial. Por ello, no define una secuencia curricular única, un plan de estudios completo, un estándar profesional ni un cuerpo de conocimiento validado de manera definitiva. Su función es más acotada: organizar conocimientos que puedan servir como punto de partida para futuras guías, discusiones o adaptaciones formativas en ISQ, sin establecer todavía asignaturas, cargas horarias, niveles de dominio, instrumentos de evaluación o resultados de aprendizaje formalmente validados.

Esta delimitación permite ubicar el aporte de la propuesta dentro del alcance real de la investigación. El marco no busca resolver por completo la formación de ingenieros de software cuántico, sino ofrecer una primera organización documentada de conocimientos que pueda ser discutida, revisada y refinada posteriormente. En consecuencia, su valor se encuentra en la articulación inicial de contenidos dispersos en la literatura y en su organización bajo una lógica formativa.

En esta etapa, la propuesta se orienta principalmente a la formación inicial en educación superior, con posible adaptación a nivel licenciatura o a cursos introductorios relacionados con ISQ. Sin embargo, su traducción a trayectorias curriculares, perfiles de ingreso y egreso, precondiciones, poscondiciones y resultados de aprendizaje queda fuera del alcance inmediato de esta versión y se reconoce como una línea de trabajo futuro.

La denominación QSEAK corresponde a *Quantum Software Engineering Areas of Knowledge*. Por su parte, la marca v0 enfatiza que se trata de una versión inicial, preliminar y abierta a revisión. Esta precisión resulta importante para distinguir el marco desarrollado en esta investigación de versiones posteriores que podrían incorporar mayor contraste académico, validación empírica, adaptación curricular o mecanismos más amplios de participación comunitaria.

La elección del nombre fue el resultado de una revisión preliminar de alternativas terminológicas. Se consideraron opciones como *QSERF*, *QSERA*, *QSEBOK* y *QSEEK*; sin embargo, estas fueron descartadas por posibles problemas de ambigüedad, uso previo en otros dominios o por sugerir un alcance más definitivo del que realmente tiene la propuesta. En particular, denominaciones asociadas con *Reference Framework*, *Reference Architecture* o *Body of Knowledge* podían interpretarse como una arquitectura de referencia, un marco más consolidado o un cuerpo de conocimiento formalmente

establecido. En contraste, QSEAK resultó más adecuado por ser pronunciable, representar de manera clara la organización por áreas de conocimiento y mantener coherencia con el carácter inicial, referencial y revisable de la propuesta.

4.3.2. Estructura general del marco referencial

El QSEAK_v0 se organiza mediante una estructura compuesta por áreas, componentes y tópicos. Las áreas representan los grandes bloques de conocimiento del marco; los componentes agrupan contenidos relacionados dentro de cada área; y los tópicos funcionan como unidades temáticas de referencia. Esta organización permite mantener una relación clara entre conocimientos de base, conocimientos técnicos especializados y dimensiones transversales vinculadas con la formación inicial en ISQ.

La estructura general del marco está integrada por tres áreas principales: Fundamentos, Conocimientos técnicos especializados y Conocimientos transversales y profesionales. Esta distribución articula una base conceptual inicial, una dimensión técnica asociada con la creación, integración y evaluación de software cuántico, y una dimensión transversal relacionada con gestión, colaboración, comunicación, reproducibilidad, observabilidad y actualización continua.

La Figura 9 presenta la estructura general del marco de QSEAK_v0. En ella se sintetiza la relación entre las áreas principales y sus componentes, con el propósito de ofrecer una visión panorámica antes de desarrollar cada área.

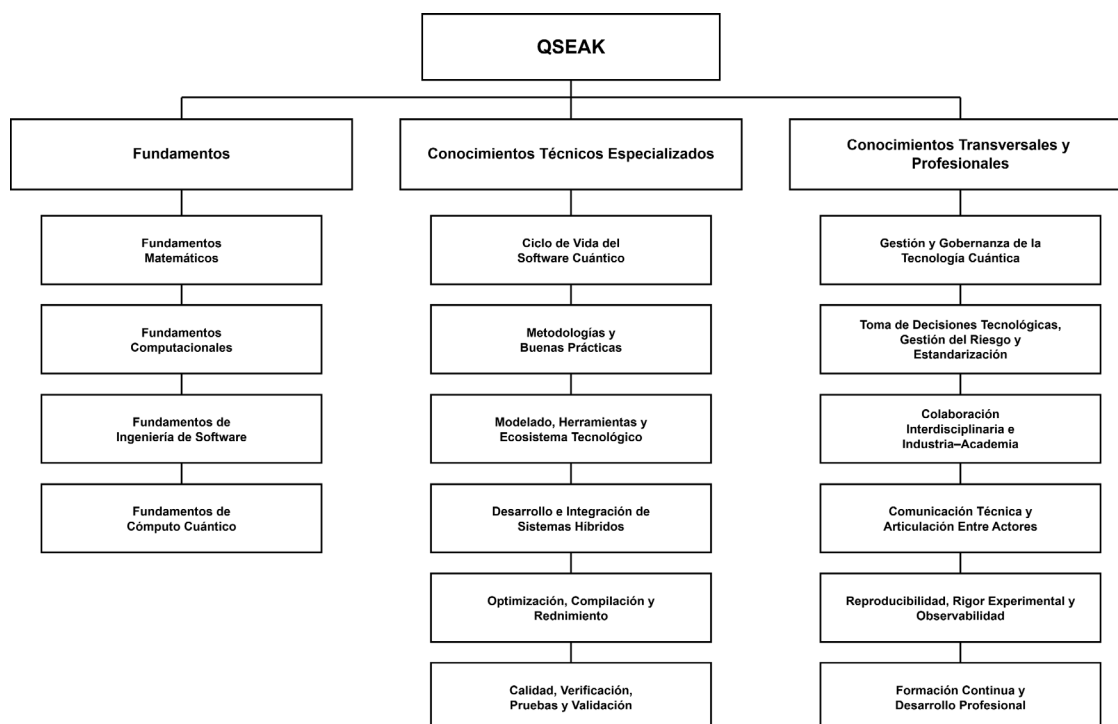


Figura 9. Estructura general de la versión inicial del marco referencial.

En el nivel de componentes, el Área 1 agrupa fundamentos matemáticos, computacionales, de IS y de CQ. El Área 2 concentra componentes relacionados con ciclo de vida, metodologías y buenas prácticas, modelado, herramientas, ecosistema tecnológico, desarrollo e integración de sistemas híbridos, optimización, compilación, rendimiento, calidad, verificación, pruebas y validación. El Área 3 incorpora componentes asociados con gestión, gobernanza, toma de decisiones, riesgo, estandarización, colaboración, comunicación técnica, reproducibilidad, rigor experimental, observabilidad y formación continua.

Además de estas áreas, la propuesta reconoce un panorama educativo y formativo complementario. Este elemento no constituye una cuarta área del marco, sino un criterio de contextualización que permite relacionar QSEAK_v0 con cursos, laboratorios, tutoriales, plataformas, recursos educativos y experiencias de enseñanza vinculadas con CQ, programación cuántica e ISQ.

La inclusión de este panorama es relevante porque la existencia de recursos para enseñar CQ o programación cuántica no implica, por sí misma, una formación específica en ISQ. Una preparación orientada a ISQ requiere articular fundamentos cuánticos con procesos de desarrollo, arquitectura, integración, calidad, pruebas, documentación, mantenimiento, trazabilidad y evaluación sistemática. Por ello, el marco busca evitar que la formación inicial se confunda con una colección de herramientas o ejercicios de programación.

La estructura general del marco ofrece una visión panorámica de la propuesta y prepara el desarrollo de las tres áreas principales. Su valor está en ordenar conocimientos interdependientes sin presentarlos como compartimentos aislados ni como una trayectoria curricular cerrada, manteniendo abierta la posibilidad de futuras adaptaciones educativas.

4.3.3. Área 1: Fundamentos

El Área 1 corresponde a los fundamentos requeridos para establecer una base común de comprensión en ISQ. Su función no es desarrollar de manera exhaustiva todos los contenidos de matemáticas, computación, IS o CQ, sino identificar conocimientos iniciales que permitan comprender los conceptos, restricciones y formas de razonamiento que intervienen en el desarrollo de software cuántico o clásico-cuánticas. Por ello, esta área se ubica como punto de partida del marco y cumple una función de soporte para las áreas posteriores.

Esta área se organiza en cuatro componentes: fundamentos matemáticos, fundamentos computacionales, fundamentos de IS y fundamentos de CQ. La inclusión de estos componentes responde a la naturaleza interdisciplinaria de la ISQ, donde convergen conocimientos que suelen estudiarse de manera separada, pero que requieren articularse cuando se analizan problemas relacionados con software cuántico. En este sentido, el Área 1 busca conectar el lenguaje formal del CQ, las capacidades computacionales, los principios de la IS y los conceptos propios del dominio cuántico.

La Figura 10 sintetiza los cuatro componentes del Área 1 y muestra su ubicación general dentro de QSEAK_v0.

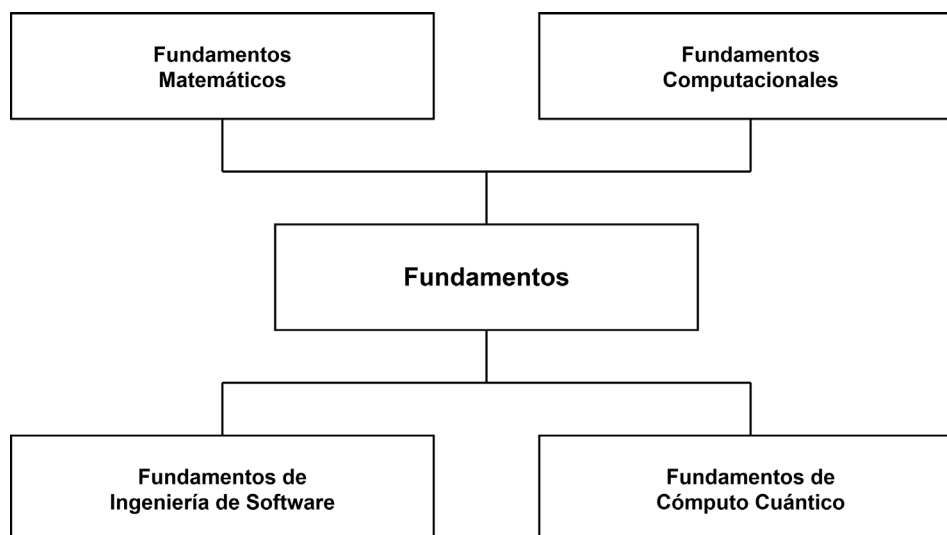


Figura 10. Componentes del Área 1: Fundamentos en la versión inicial del marco referencial.

En el caso de los fundamentos matemáticos, el énfasis se coloca en el lenguaje formal que permite representar y manipular información cuántica. Este componente recupera bases relacionadas con lógica, notación formal, álgebra lineal, números complejos, espacios vectoriales, operaciones matriciales, producto interno y tensorial, operadores, valores y vectores propios, así como nociones de probabilidad. Estos conocimientos permiten comprender la representación de estados cuánticos, la acción de las compuertas, la composición de sistemas y la naturaleza probabilística de la medición.

Los fundamentos computacionales complementan esta base formal al aportar conocimientos para analizar problemas, formular soluciones y comprender modelos de cómputo. En este componente se consideran elementos como pensamiento algorítmico, programación, estructuras de datos, lenguajes de programación, arquitectura de computadoras, modelos de computación, análisis de algoritmos, complejidad y paradigmas de programación. Con ello, el marco reconoce que la formación en ISQ no depende únicamente del conocimiento cuántico, sino también de capacidades computacionales que permiten distinguir continuidades y diferencias entre la computación clásica y la cuántica.

Desde la perspectiva disciplinar de la IS, el Área 1 incorpora conocimientos vinculados con procesos de software, gestión de proyectos, requerimientos, análisis del dominio, diseño, arquitectura, documentación, calidad, pruebas, métricas, mantenimiento, control de versiones y gestión de configuración. Esta inclusión es necesaria porque la ISQ no debe entenderse sólo como programación de circuitos o uso de herramientas cuánticas, sino como una actividad de ingeniería que requiere organizar, evaluar, documentar, mantener y evolucionar soluciones de software.

Por su parte, los fundamentos de CQ introducen los conceptos de base para comprender el dominio tecnológico al que se orienta la ISQ. Entre ellos se consideran qubits, superposición, medición, sistemas compuestos, interferencia, entrelazamiento, reversibilidad, compuertas, circuitos, algoritmos introductorios, hardware cuántico, ruido y decoherencia. La finalidad no es sustituir una formación especializada completa en CQ, sino ofrecer una base conceptual suficiente para entender por qué el software cuántico presenta restricciones distintas al software clásico.

Así, el Área 1 establece una base común para articular IS y CQ dentro de una misma propuesta referencial. Su función es equilibrar fundamentos matemáticos, computacionales, ingenieriles y cuánticos, evitando que la formación inicial en ISQ se reduzca únicamente al aprendizaje del paradigma cuántico o, en sentido contrario, a la aplicación directa de principios de IS sin atender las restricciones propias del dominio cuántico.

4.3.4. Área 2: Conocimientos técnicos especializados

El Área 2 concentra los conocimientos técnicos especializados que permiten pasar de la comprensión conceptual del dominio cuántico a la construcción, integración y evaluación de soluciones de software cuántico e híbrido. Su inclusión responde a que la formación en ISQ no puede limitarse al aprendizaje de compuertas, circuitos o plataformas de programación, sino que requiere comprender cómo dichos elementos se insertan dentro de procesos de desarrollo, decisiones de diseño, restricciones tecnológicas y criterios de calidad propios de la IS.

Desde esta perspectiva, el área articula conocimientos relacionados con el ciclo de vida, las metodologías y buenas prácticas, el modelado, las herramientas, el ecosistema tecnológico, la integración híbrida, la optimización, la compilación, el rendimiento, la verificación, las pruebas y la validación. Estos contenidos no se presentan como una secuencia rígida de actividades, sino como dimensiones técnicas interdependientes que permiten comprender el desarrollo de software cuántico como una práctica de ingeniería. La intención es desplazar la atención desde la programación aislada de circuitos hacia una visión más amplia del software cuántico como artefacto que debe ser diseñado, documentado, ejecutado, evaluado, mantenido y eventualmente integrado en sistemas mayores.

La Figura 11 organiza visualmente los componentes del Área 2 en QSEAK_v0, centrados en conocimientos técnicos especializados para la ISQ.

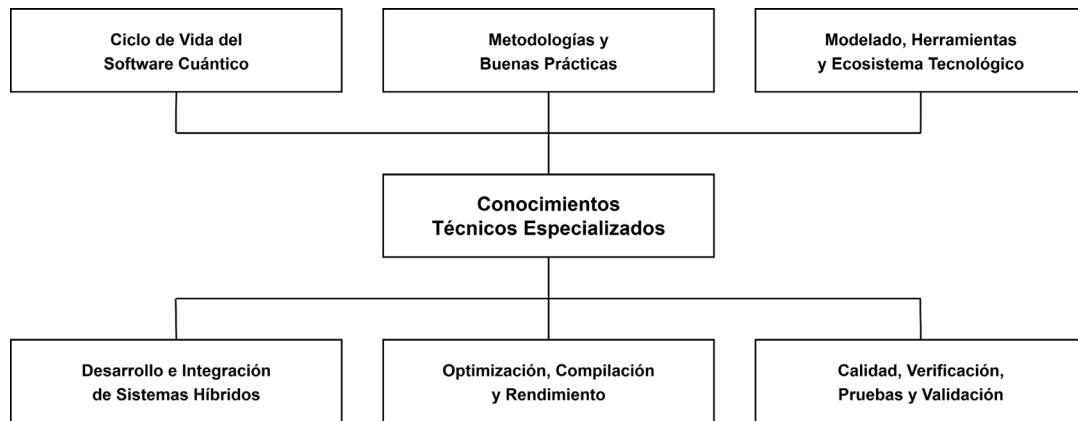


Figura 11. Componentes del Área 2: Conocimientos técnicos especializados en la versión inicial del marco referencial.

Uno de los aspectos centrales de esta área es reconocer que el software cuántico se desarrolla bajo condiciones distintas a las del software clásico, aunque no queda desvinculado de sus principios de ingeniería. Las actividades de análisis, diseño, implementación, ejecución y evaluación continúan siendo relevantes; sin embargo, deben reinterpretarse frente a factores como la dependencia de plataformas, la disponibilidad limitada de hardware, la presencia de ruido, la variabilidad de resultados, las restricciones de conectividad, la profundidad de los circuitos y la interacción constante entre procesamiento clásico y cuántico. Por ello, el área recupera conocimientos técnicos que permiten razonar sobre la viabilidad de una solución, no sólo sobre su formulación algorítmica.

En este sentido, las herramientas, lenguajes, bibliotecas, simuladores, servicios en la nube y plataformas de ejecución no se entienden únicamente como medios de implementación, sino como elementos que condicionan el diseño y la evaluación de las soluciones. La selección de una plataforma, la representación de un circuito, la forma en que se ejecuta un experimento o la manera en que se comparan resultados pueden afectar la interpretación técnica de una solución. Por esta razón, la formación en ISQ requiere que el estudiante comprenda tanto el uso de herramientas como sus limitaciones, supuestos y efectos sobre el desarrollo de software cuántico.

La integración híbrida constituye otro eje relevante del área, debido a que muchas soluciones cuánticas actuales no operan como sistemas autónomos, sino como componentes dentro de flujos computacionales más amplios. Esto implica analizar cómo se distribuyen responsabilidades entre partes clásicas y cuánticas, cómo se comunican los distintos componentes, qué tareas conviene delegar al procesamiento cuántico y cómo se evalúa el resultado dentro de una arquitectura completa. Así, el componente cuántico deja de verse como un circuito aislado y pasa a entenderse como parte de una solución de software que debe interactuar con datos, servicios, infraestructura y procesos clásicos.

El área también destaca la importancia de la optimización, la compilación y el rendimiento, ya que la ejecución de soluciones cuánticas depende de recursos tecnológicos todavía limitados. La profundidad de los circuitos, el número de compuertas, la conectividad del

dispositivo, la selección de la plataforma de ejecución, los tiempos de ejecución y la sensibilidad al ruido influyen directamente en la factibilidad de una solución. En consecuencia, la formación técnica en ISQ debe incluir criterios para analizar no sólo si una solución es conceptualmente correcta, sino también si puede ejecutarse de manera razonable bajo las condiciones disponibles.

Finalmente, el Área 2 incorpora la calidad, verificación, pruebas y validación como dimensiones indispensables del desarrollo de software cuántico. La naturaleza probabilística de los resultados, la presencia de ruido y la dificultad para observar directamente ciertos estados hacen que la evaluación de soluciones cuánticas requiera estrategias cuidadosas de comparación, depuración, control experimental y análisis de resultados. En este punto, la ISQ demanda adaptar prácticas de la IS a un dominio donde la corrección, la reproducibilidad y la confiabilidad no siempre pueden evaluarse mediante los mismos criterios utilizados en sistemas clásicos.

De este modo, el Área 2 organiza dimensiones técnicas necesarias para comprender la producción de soluciones de software en entornos cuánticos e híbridos. Su aporte dentro del marco consiste en vincular procesos, herramientas, restricciones de ejecución, integración arquitectónica y criterios de calidad, evitando que la formación inicial en ISQ se reduzca al aprendizaje operativo de plataformas o a la implementación aislada de algoritmos cuánticos.

4.3.5. Área 3: Conocimientos transversales y profesionales

El Área 3 incorpora los conocimientos transversales y profesionales necesarios para situar la ISQ más allá de sus fundamentos conceptuales y de su dimensión técnica. Su inclusión responde a que la construcción de soluciones cuánticas y clásico-cuánticas no ocurre en condiciones aisladas, sino dentro de contextos académicos, científicos, tecnológicos y organizacionales que influyen en la manera en que las soluciones se justifican, comunican, evalúan, adoptan y sostienen. Por ello, esta área complementa las dos anteriores al reconocer que la preparación introductoria en ISQ también requiere criterios para actuar en escenarios marcados por incertidumbre tecnológica, colaboración interdisciplinaria y evolución constante del campo.

Desde esta perspectiva, el Área 3 articula aspectos relacionados con gestión y gobernanza, toma de decisiones tecnológicas, gestión del riesgo, estandarización, colaboración entre industria y academia, comunicación técnica, reproducibilidad, rigor experimental, observabilidad, formación continua y desarrollo profesional. Estos contenidos no se entienden como elementos externos al desarrollo de software, sino como condiciones que influyen directamente en la viabilidad, confiabilidad y transferencia de las soluciones cuánticas o híbridas. En un campo emergente, donde las plataformas, herramientas y prácticas todavía se encuentran en consolidación, la capacidad de documentar decisiones, justificar elecciones técnicas y comunicar limitaciones resulta tan importante como la capacidad de implementar soluciones.

La Figura 12 resume los componentes del Área 3 en QSEAK_v0, vinculados con conocimientos transversales y profesionales.

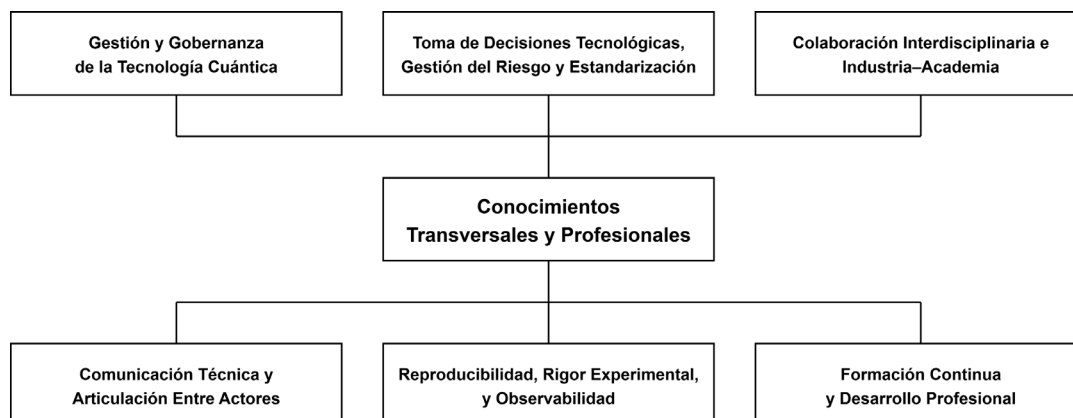


Figura 12. Componentes del Área 3: Conocimientos transversales y profesionales en la versión inicial del marco referencial.

Uno de los aportes de esta área es reconocer que la adopción de tecnologías cuánticas requiere procesos de gestión, coordinación y toma de decisiones que permitan valorar su pertinencia en función de problemas, recursos, capacidades disponibles y riesgos asociados. La selección de plataformas, herramientas, proveedores, enfoques de desarrollo o estrategias de integración no puede realizarse únicamente desde criterios técnicos inmediatos, ya que también intervienen factores como madurez tecnológica, dependencia del ecosistema, sostenibilidad de las soluciones, costos de experimentación, disponibilidad de talento y posibles cambios en estándares o prácticas del campo.

Asimismo, el Área 3 destaca la importancia de la colaboración interdisciplinaria. La ISQ se construye en la intersección de la computación, la física, las matemáticas, la IS y distintos dominios de aplicación, por lo que requiere perfiles capaces de dialogar con actores que poseen lenguajes, prioridades y formas de validación diferentes. Esta colaboración no sólo tiene valor académico, sino también práctico, porque muchas soluciones cuánticas o híbridas demandan la participación de especialistas en algoritmos, infraestructura, dominio del problema, IS, análisis de datos y evaluación experimental.

En este contexto, la comunicación técnica adquiere una función central. La documentación de alcances, restricciones, configuraciones, supuestos, resultados y condiciones de ejecución permite hacer explícitas las decisiones tomadas durante el desarrollo y facilita la revisión del trabajo por parte de otros actores. Esta dimensión es especialmente relevante en ISQ, debido a que las expectativas sobre el potencial del CQ pueden conducir a interpretaciones imprecisas o exageradas. Comunicar con claridad qué se hizo, bajo qué condiciones, con qué limitaciones y con qué nivel de evidencia contribuye a una práctica más responsable y verificable.

La reproducibilidad, el rigor experimental y la observabilidad también resultan esenciales para fortalecer la confiabilidad de las soluciones. La creación de software cuántico suele depender de simuladores, plataformas de ejecución, versiones de herramientas, parámetros

de ejecución, semillas, métricas, condiciones de ruido y configuraciones que pueden modificar los resultados obtenidos. Por ello, la formación en ISQ debe considerar la necesidad de registrar condiciones experimentales, controlar configuraciones, documentar decisiones y establecer mecanismos que permitan analizar el comportamiento de las soluciones durante su ejecución y evaluación.

Finalmente, esta área incorpora la formación continua y el desarrollo profesional como respuesta al carácter dinámico de la ISQ. Debido a que el campo evoluciona con rapidez, los conocimientos, herramientas, plataformas, prácticas y estándares asociados pueden cambiar conforme maduren las tecnologías cuánticas y sus aplicaciones. En consecuencia, una formación inicial no debería limitarse a transmitir contenidos estáticos, sino también promover capacidades de actualización, seguimiento crítico de avances, aprendizaje autónomo y adaptación profesional.

Esta área amplía la comprensión de la ISQ al incorporar condiciones profesionales y transversales necesarias para el desarrollo responsable, comunicable y sostenible de software cuántico e híbrido. Su aporte dentro del marco consiste en mostrar que la formación inicial no sólo requiere fundamentos y conocimientos técnicos, sino también criterios para gestionar decisiones, colaborar con otros actores, documentar evidencia, evaluar resultados y sostener el aprendizaje en un campo todavía emergente.

4.3.6. Síntesis del aporte del marco referencial

QSEAK_v0 constituye el resultado integrador de la investigación al traducir los hallazgos del AB, la RSL y la literatura complementaria en una organización referencial para la formación inicial en ISQ. Su aporte no reside en cerrar el campo ni en proponer una ruta curricular definitiva, sino en ordenar conocimientos que se encontraban distribuidos entre estudios conceptuales, técnicos, metodológicos y formativos.

El valor del marco se encuentra en conectar el dominio cuántico con preocupaciones centrales de la IS. La propuesta reconoce la importancia de comprender qubits, circuitos, medición, algoritmos, hardware, ruido y herramientas, pero sitúa esos elementos en relación con procesos, arquitectura, integración, pruebas, validación, reproducibilidad, documentación, gestión y colaboración interdisciplinaria.

Esta articulación permite diferenciar entre formación general en CQ, aprendizaje de programación cuántica y formación inicial en ISQ. La primera introduce principios y fenómenos del paradigma cuántico; la segunda desarrolla habilidades operativas para construir circuitos o utilizar plataformas; la tercera requiere comprender cómo se produce, evalúa, integra, documenta y mantiene software con componentes cuánticos desde una perspectiva ingenieril.

En consecuencia, QSEAK_v0 aporta a la discusión sobre la preparación introductoria en ISQ desde una perspectiva de IS. Su carácter inicial y revisable permite reconocerlo como punto de partida para contrastes académicos, adaptaciones formativas, refinamientos conceptuales y versiones posteriores con mayor trazabilidad y validación.

4.4. Resultados de la revisión académica inicial

Una vez elaborada la versión inicial del marco de fundamentos referenciales, se realizó una revisión académica externa para obtener retroalimentación especializada sobre su claridad, alcance, profundidad, secuenciación y pertinencia para la formación inicial en ISQ.

Los resultados de esta revisión deben interpretarse como un contraste académico preliminar y no como una validación definitiva del marco. Su valor principal está en identificar observaciones de mejora, puntos de claridad, posibles vacíos y aspectos que conviene ajustar antes de avanzar hacia versiones posteriores con mayor participación de especialistas.

A diferencia del Capítulo 3, donde se describió el procedimiento de contacto y tratamiento de observaciones, esta sección presenta los resultados obtenidos: el alcance efectivo de la revisión, la retroalimentación recibida por revisor y las oportunidades de mejora derivadas del proceso.

Esta distinción permite conservar la coherencia narrativa del documento: la metodología explica cómo se realizó la revisión, mientras que este apartado muestra qué produjo esa revisión y cómo sus resultados ayudan a interpretar el estado actual de QSEAK_v0 como una propuesta inicial, perfectible y abierta a refinamiento.

4.4.1. Alcance y desarrollo de la revisión académica inicial

Este apartado reporta el alcance efectivo del proceso de revisión académica inicial. Su propósito es presentar los datos de contacto, respuesta y recepción de comentarios al corte definido para la investigación, evitando repetir la descripción metodológica del Capítulo 3.

Con corte al 5 de junio de 2026, se habían considerado 78 investigadores para participar en la revisión académica inicial. De este total, cinco envíos presentaron error, 49 no tuvieron respuesta, seis investigadores declinaron participar, cinco manifestaron interés inicial o solicitaron aclaraciones, y 13 recibieron el documento para revisión. A partir de los materiales enviados, se recibieron cinco retroalimentaciones académicas. La Tabla 9 sintetiza el seguimiento del contacto con especialistas realizado para la revisión académica inicial de QSEAK_v0.

Tabla 9. Seguimiento del contacto con especialistas para la revisión académica inicial.

Etapas	Categoría	Cantidad	Descripción
Base de contacto	Investigadores considerados	78	Investigadores identificados por su relación con ISQ, CQ, IS o áreas afines.
Depuración del contacto	Correos no entregados	5	Invitaciones que no pudieron entregarse correctamente.

Resultado del contacto	Sin respuesta	49	Invitaciones sin respuesta al corte del 5 de junio de 2026.
Resultado del contacto	Declinación	6	Respuestas negativas asociadas con disponibilidad, compromisos académicos, falta de correspondencia temática o posibles conflictos de interés.
Resultado del contacto	Interés inicial o solicitud de aclaraciones	5	Investigadores que solicitaron precisiones o manifestaron interés inicial, sin concretar revisión dentro del periodo establecido.
Revisión académica	Documento enviado para revisión	13	Investigadores que recibieron la versión inicial del marco para revisión académica inicial.
Revisión académica	Retroalimentación recibida	5 de 13	Comentarios académicos recibidos por parte de los investigadores a quienes se envió el documento.

Nota. Las categorías de resultado del contacto se calculan respecto de los correos entregados; la retroalimentación recibida corresponde al subconjunto de investigadores a quienes se envió el documento para revisión.

Las cinco retroalimentaciones recibidas permitieron obtener un contraste especializado útil sobre la claridad, pertinencia y posibles mejoras de QSEAK_v0. No obstante, la participación efectiva fue limitada respecto del conjunto de investigadores contactados; por ello, sus resultados deben entenderse como observaciones cualitativas iniciales y no como consenso académico ni validación formal del marco.

4.4.2. Retroalimentación recibida por revisor

La retroalimentación recibida durante la revisión académica inicial permitió identificar valoraciones favorables, observaciones críticas y recomendaciones de mejora sobre la versión inicial del marco. Debido al carácter interdisciplinario de la ISQ, cada revisión aportó una perspectiva particular sobre la propuesta. En conjunto, los comentarios abordaron aspectos relacionados con arquitectura y diseño de software, trazabilidad metodológica, evolución comunitaria, orientación formativa, precisión conceptual de los fundamentos y presentación visual del documento.

En el caso de Peng Liang, profesor de IS en la Escuela de Ciencias de la Computación de la Universidad de Wuhan, especialista en arquitectura de software e IS empírica, la revisión se orientó precisamente hacia la dimensión arquitectónica del marco. Sus observaciones reconocieron el valor de la propuesta como esfuerzo amplio de organización de conocimientos para la ISQ, pero también señalaron la necesidad de fortalecer la presencia de contenidos relacionados con arquitectura de software, diseño arquitectónico y patrones arquitectónicos aplicables a sistemas de software cuántico. Esta observación resulta relevante porque el marco ya contempla elementos asociados con diseño, arquitectura e integración de sistemas híbridos; sin embargo, la retroalimentación sugiere

que dichos contenidos podrían diferenciarse con mayor precisión. Además, se señaló la conveniencia de mejorar la legibilidad de algunas figuras, especialmente aquellas que concentran una cantidad amplia de información.

La revisión de Ricardo Pérez del Castillo, profesor titular de la Facultad de Ciencias Sociales y Tecnologías de la Información de Talavera de la Reina, perteneciente a la Universidad de Castilla-La Mancha, especialista en ISQ, modernización de software y reingeniería de sistemas clásico-cuánticos, se centró en la fundamentación metodológica y la trazabilidad de la propuesta. Si bien reconoció que el marco refleja una comprensión amplia del estado del arte y constituye un esfuerzo valioso por construir un mapa conceptual de la ISQ, también advirtió que su estructura podría percibirse como arbitraria si no se explicita con suficiente claridad cómo fueron derivados sus bloques, agrupaciones y contenidos específicos a partir de la literatura y de referentes disciplinares. En este sentido, recomendó fortalecer la relación entre los resultados de la RSL, los fundamentos de la IS y la estructura final del marco. Sus comentarios también apuntaron hacia la conveniencia de hacer más visible la alineación con referentes de IS, planes curriculares, procesos de ciclo de vida y estándares relacionados. En cuanto al contenido, sugirió revisar la presencia de temas como arquitectura de software para sistemas híbridos, ingeniería de servicios, operación de software cuántico o híbrido, fundamentos de hardware con impacto en el desarrollo de software y algoritmos híbridos como solucionador cuántico variacional de valores propios (VQE, por sus siglas en inglés) y algoritmo cuántico aproximado de optimización (QAOA, por sus siglas en inglés).

Samuel Eduardo Sepúlveda Cuevas, profesor asociado del Departamento de Ciencias de la Computación e Informática de la Universidad de La Frontera, con líneas de trabajo relacionadas con ingeniería de requisitos, líneas de productos de software e ISQ, orientó su retroalimentación hacia la evolución comunitaria y la evaluación posterior del marco. A diferencia de observaciones centradas en contenidos específicos, sus comentarios destacaron la importancia de establecer mecanismos que permitan discutir, refinar y ampliar la propuesta de manera colaborativa. En particular, sugirió habilitar un repositorio o espacio compartido en el que investigadores interesados pudieran revisar el marco, aportar observaciones y documentar las decisiones tomadas durante su evolución. También propuso considerar mecanismos de retroalimentación más amplios, como encuestas o instrumentos similares diseñados con mayor rigor. Estas observaciones resaltan la necesidad de que el marco pueda evolucionar mediante procesos participativos, trazables y abiertos a la comunidad académica.

La revisión de Luis Mariano Bibbó, investigador del Laboratorio de Investigación y Formación en Informática Avanzada de la Facultad de Informática de la Universidad Nacional de La Plata, especializado en IS, modelado, métodos formales y CQ, valoró positivamente el esfuerzo de síntesis y estructuración de la propuesta. Destacó como acierto la organización del área de fundamentos en componentes matemáticos, computacionales, de IS y de CQ, ya que esta división contribuye a construir una base multidisciplinaria y evita reducir la ISQ a una visión centrada únicamente en circuitos. También reconoció la orientación del marco hacia una comprensión integral del ciclo de vida del software cuántico, incluyendo requerimientos, partición clásico-cuántica,

arquitectura, implementación, integración, validación, despliegue y mejora iterativa. Su principal observación se relacionó con la necesidad de precisar con mayor claridad el propósito explícito de la propuesta y el tipo de uso académico o formativo al que pretende contribuir. Además, sugirió considerar referentes complementarios, recursos educativos y marcos prácticos, así como valorar el impacto de la inteligencia artificial generativa y los modelos de lenguaje a gran escala en la formación en ISQ. Finalmente, recomendó revisar aspectos editoriales, como la consistencia en el uso de siglas y la comunicación visual del documento.

Por su parte, GuoHua Sun, investigadora del Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional y jefa del Laboratorio de Ciencias de la Información Cuántica, especializada en CQ, información cuántica, matemáticas aplicadas y computación científica, aportó una revisión enfocada principalmente en la precisión conceptual de los fundamentos matemáticos y cuánticos. En el componente de fundamentos matemáticos, sugirió incorporar de forma explícita la noción de transformación unitaria, debido a su importancia para comprender la evolución de los estados cuánticos y la acción de las compuertas. También recomendó distinguir con mayor claridad entre probabilidad clásica y probabilidad cuántica, con el fin de evitar una presentación demasiado general del componente probabilístico. En el componente de fundamentos de CQ, observó que el teorema de no clonación podría corresponder con mayor precisión al ámbito de comunicación cuántica, por lo que convendría reconsiderar su ubicación o tratamiento dentro del marco. Asimismo, sus comentarios permitieron identificar ajustes de orden conceptual y editorial relacionados con la secuencia de algunos tópicos y la claridad de ciertas descripciones.

En conjunto, las cinco revisiones recibidas permiten observar que el marco fue considerado pertinente como esfuerzo inicial de organización de conocimientos para la ISQ, pero también evidencian aspectos que requieren refinamiento. Las observaciones no invalidan el alcance de la versión desarrollada en esta investigación, sino que ayudan a precisar sus límites, fortalecer su trazabilidad, mejorar su claridad conceptual y proyectar posibles líneas de evolución. En el apartado siguiente, estas observaciones se reorganizan en oportunidades de mejora para una versión posterior del marco referencial.

4.4.3. Oportunidades de mejora para una versión posterior del marco referencial

La retroalimentación recibida permitió identificar oportunidades de mejora relacionadas con el alcance académico, la trazabilidad metodológica, la precisión de contenidos y la comunicación de la propuesta. Estos aspectos no se interpretan como una agenda completa de trabajo futuro, sino como líneas de refinamiento derivadas del contraste inicial con especialistas.

En primer lugar, los comentarios sugieren la necesidad de precisar con mayor claridad el propósito y el uso académico esperado del marco. Una versión posterior podría distinguir mejor si QSEAK_v0.1 funcionaría como referencia para diseñar asignaturas, estructurar

cursos introductorios, orientar trayectorias de autoaprendizaje, revisar cobertura temática o apoyar adaptaciones institucionales. Esta delimitación permitiría evitar interpretaciones excesivamente amplias de la propuesta y ubicar con mayor precisión su utilidad formativa.

Otro aspecto relevante se relaciona con la trazabilidad metodológica. Las observaciones recibidas muestran la conveniencia de hacer más explícita la relación entre los resultados de la RSL, los referentes de IS, la literatura complementaria y la organización final del marco en áreas, componentes y tópicos. Fortalecer esta conexión ayudaría a justificar con mayor claridad por qué ciertos contenidos fueron incluidos, agrupados o ubicados en una parte específica de QSEAK_v0, reduciendo la posibilidad de que su estructura se perciba como arbitraria.

La revisión también permitió reconocer ajustes de contenido que convendría valorar en una versión posterior. Entre ellos se encuentran la arquitectura de software para sistemas híbridos, el diseño y los patrones arquitectónicos, la operación de software cuántico o híbrido, los fundamentos de hardware con impacto en el desarrollo, los algoritmos híbridos como VQE y QAOA, la transformación unitaria, la diferencia entre probabilidad clásica y probabilidad cuántica, y la ubicación del teorema de no clonación. Estos elementos no implican ampliar el marco de manera indiscriminada, sino revisar su visibilidad, ubicación o progresión conceptual dentro de la estructura existente.

Finalmente, las observaciones apuntan a mejorar la comunicación y evolución de la propuesta. En una versión posterior convendría revisar la legibilidad de algunas figuras, homogeneizar siglas y términos, cuidar la correspondencia entre las versiones en español e inglés, y valorar mecanismos de participación académica más amplios, como repositorios colaborativos, encuestas estructuradas o juicio de expertos. Con ello, la revisión académica inicial se cierra como un primer ejercicio de contraste especializado y prepara la transición hacia las líneas de continuidad desarrolladas en el Capítulo 5.

4.5. Discusión de los resultados

Los resultados permiten discutir la ISQ como un campo emergente cuya consolidación no avanza de manera uniforme. El AB muestra crecimiento de la producción científica, diversificación temática y presencia de comunidades académicas activas; sin embargo, ese aumento de visibilidad no demuestra por sí solo madurez disciplinar. La RSL matiza esta lectura al mostrar que algunas líneas cuentan con mayor desarrollo documental, como herramientas, sistemas híbridos, calidad y pruebas, mientras que otras, como formación especializada, ciclo de vida y metodologías integrales, permanecen menos formalizadas. Por tanto, la expansión bibliométrica debe interpretarse como una señal de actividad científica creciente, no como evidencia suficiente de estabilización conceptual, metodológica o educativa.

Esta diferencia entre crecimiento y madurez ayuda a comprender una tensión central de esta investigación: el avance técnico del CQ no se traduce automáticamente en una organización formativa para la ISQ. La literatura revisada aporta herramientas, plataformas, estrategias de compilación, mecanismos de prueba, entornos como Qiskit,

sistemas híbridos y propuestas de evaluación. No obstante, estos elementos aparecen distribuidos en estudios con objetivos distintos y no siempre se articulan como parte de una preparación integral. El problema identificado no es la ausencia absoluta de conocimiento, sino su dispersión y la dificultad de conectarlo desde una perspectiva de IS orientada a procesos, calidad, mantenimiento, integración y toma de decisiones técnicas. Esta condición explica por qué resultados técnicos valiosos requieren una estructura que los vuelva comparables, enseñables y discutibles desde criterios formativos.

En ese sentido, la ISQ ocupa una posición intermedia que impide leerla sólo como programación cuántica o como simple extensión de la IS tradicional. El dominio cuántico introduce restricciones de medición, ruido, dependencia de hardware, compilación, variabilidad de resultados e interacción con infraestructura especializada. Al mismo tiempo, el desarrollo de software exige prácticas sistemáticas de análisis, diseño, arquitectura, documentación, trazabilidad, pruebas, operación y evolución. La discusión conjunta de los resultados muestra que una formación inicial en ISQ necesita reconocer ambos planos y explicar cómo se condicionan mutuamente en el desarrollo de soluciones cuánticas e híbridas.

Desde esta lectura, QSEAK_v0 cumple una función referencial concreta. No busca resolver de manera definitiva la formación en ISQ ni cerrar la discusión sobre el cuerpo de conocimiento del campo. Su valor consiste en transformar una literatura fragmentada en una estructura discutible, trazable y revisable, organizada alrededor de fundamentos, conocimientos técnicos especializados y dimensiones transversales o profesionales. La aportación no está en presentar una lista exhaustiva de temas, sino en proponer una forma de relación entre ellos para que puedan ser analizados desde una lógica de IS y no únicamente desde el uso instrumental de tecnologías cuánticas.

La revisión académica inicial refuerza esta interpretación con un alcance prudente. Las observaciones recibidas no validan formalmente el marco, pero sí muestran que la propuesta puede funcionar como punto de partida para discusión especializada. En particular, los comentarios sobre arquitectura, trazabilidad, fundamentos, evolución comunitaria y comunicación del marco confirman que QSEAK_v0 requiere refinamiento, pero también que la organización propuesta atiende una necesidad reconocible: hacer más explícita la relación entre literatura científica, referentes de IS y formación inicial en un campo todavía inestable.

En conjunto, este trabajo no se limita a describir el panorama actual de la ISQ. La caracterización bibliométrica permitió ubicar la actividad y evolución del campo; la RSL profundizó en sus contenidos técnicos, metodológicos y formativos; y QSEAK_v0 articuló esa evidencia en una propuesta inicial de organización de conocimientos. Esta secuencia explica la aportación principal del trabajo y prepara la lectura de sus límites: los resultados son útiles para ordenar el campo desde una perspectiva académica, siempre que se reconozca su carácter situado, revisable y dependiente de actualización conforme evolucione la ISQ.

4.6. Amenazas a la validez

Los resultados de esta investigación deben interpretarse en relación con las decisiones metodológicas y analíticas que guiaron el desarrollo del estudio. Al articular un AB, una RSL, la elaboración de una versión inicial del marco de fundamentos referenciales y una revisión académica inicial, la investigación estuvo condicionada por aspectos como las fuentes consultadas, los periodos de búsqueda, los criterios de selección, la depuración de información, la clasificación temática, la interpretación de los hallazgos y la integración de la evidencia en una propuesta referencial. Reconocer estas limitaciones no invalida los resultados obtenidos, pero permite delimitar su alcance y precisar las condiciones bajo las cuales deben ser comprendidos.

Para ordenar esta reflexión, las amenazas a la validez se agrupan en internas y externas. Las amenazas internas se relacionan con decisiones tomadas durante el desarrollo de la investigación, especialmente aquellas vinculadas con la conformación de los corpus documentales, la normalización y clasificación de la información, la síntesis de resultados y la trazabilidad entre la evidencia revisada y la estructura propuesta. Las amenazas externas, por su parte, se refieren a las condiciones que pueden afectar la transferencia o generalización de los resultados, considerando el carácter dinámico de la ISQ, la rápida evolución de herramientas y tecnologías, la dependencia de literatura reciente y el alcance inicial del marco. Esta distinción permite ubicar los resultados como una aportación situada, derivada de un proceso metodológico explícito, pero abierta a revisión, actualización y contraste posterior.

4.6.1. Amenazas internas

Las amenazas internas de esta investigación se relacionan con las decisiones metodológicas e interpretativas que pudieron influir en la conformación, análisis e integración de los resultados. Dado que el estudio articuló un AB, una RSL, la construcción de la versión inicial del marco y una revisión académica inicial, fue necesario tomar decisiones sobre búsqueda, depuración, clasificación, selección, síntesis y organización de información. Estas decisiones permitieron abordar un campo emergente y disperso, pero también pudieron incidir en la forma en que se representaron las tendencias del área y en la estructura final de la propuesta.

En relación con los corpus documentales, debe reconocerse que la cobertura de los resultados dependió de las bases de datos consultadas, de las cadenas de búsqueda, de los periodos definidos y de las condiciones de indexación de cada fuente. En el AB, el uso de Scopus y Web of Science permitió construir una base amplia para caracterizar el campo; sin embargo, como en todo estudio bibliométrico, la recuperación documental estuvo condicionada por los registros disponibles en dichas bases. En la RSL, la pérdida de acceso a Scopus obligó a trabajar con Web of Science, IEEE Xplore y ACM Digital Library, lo que pudo modificar la cobertura de estudios disponibles para la revisión. Aunque se aplicaron criterios explícitos de búsqueda, selección y depuración, esta condición debe considerarse al interpretar la composición de los corpus analizados.

También existen amenazas asociadas con la depuración, normalización y clasificación de la información. En el AB, decisiones como la eliminación de duplicados, la normalización de autores, la depuración de palabras clave y la configuración de herramientas como SciMAT y VOSviewer pudieron influir en la visibilidad de temas, autores, redes de colaboración y clústeres temáticos. En la RSL, la clasificación de estudios en categorías temáticas y la selección final de documentos para análisis completo requirieron QA, pertinencia y relación con la ISQ. Aunque dichos criterios fueron definidos para dar consistencia al proceso, su aplicación implicó juicio académico, especialmente al valorar la contribución de cada estudio a la comprensión del campo y a la construcción posterior del marco referencial.

La derivación del marco constituye otra fuente de amenaza interna, ya que su estructura no surgió como una transposición directa de las categorías obtenidas en el AB o en la RSL. Su construcción implicó reorganizar los hallazgos en niveles de organización del conocimiento con sentido formativo, integrando además literatura base sobre CQ e IS, referentes disciplinares y retroalimentación académica inicial. Esta reorganización permitió articular conocimientos dispersos, pero también introdujo decisiones interpretativas sobre qué contenidos incluir, cómo agruparlos y qué nivel de importancia otorgarles dentro de la propuesta. En este sentido, la trazabilidad general del proceso permite comprender la lógica de construcción de la versión inicial, aunque no todas las relaciones entre estudios, categorías y componentes quedaron formalizadas mediante una matriz explícita de derivación.

Otra limitación interna se relaciona con el alcance formativo de la propuesta. El marco organiza áreas y componentes de conocimiento, pero todavía no define una secuencia de aprendizaje sustentada en precondiciones y poscondiciones. En términos curriculares, esto puede entenderse como la ausencia de una delimitación explícita de perfiles de ingreso y egreso para una trayectoria formativa específica. Esta condición no contradice el carácter referencial inicial de la versión desarrollada en esta investigación, pero sí delimita su alcance: la organización de conocimientos propuesta no equivale todavía a un plan curricular completo ni a una progresión didáctica validada.

Finalmente, la revisión académica inicial aportó un contraste valioso para identificar fortalezas y aspectos de mejora del marco, pero su alcance fue limitado. El número de retroalimentaciones recibidas fue reducido en comparación con la cantidad de investigadores contactados, y el proceso no tuvo el propósito de validar formalmente la propuesta. Por ello, sus resultados deben interpretarse como un primer ejercicio de contraste especializado, útil para orientar refinamientos posteriores, pero insuficiente para confirmar la completitud, secuenciación o validez general del marco. En conjunto, estas amenazas internas sugieren que los resultados deben leerse considerando las decisiones de selección, síntesis y organización realizadas durante el estudio, así como el carácter inicial y en evolución de la propuesta.

4.6.2. Amenazas externas

Las amenazas externas se relacionan con el alcance de transferencia y generalización de los resultados obtenidos. En esta investigación, dichas amenazas son relevantes porque la ISQ se desarrolla en un campo de rápida evolución, condicionado por avances en hardware cuántico, herramientas de desarrollo, servicios en la nube, entornos de desarrollo, lenguajes, metodologías y propuestas formativas. Por ello, los resultados del AB, la RSL y la organización propuesta en el marco deben interpretarse como una caracterización situada en los periodos, fuentes y condiciones analizadas, no como una representación definitiva ni universal del campo.

El carácter dinámico de la ISQ constituye una limitación importante para la permanencia de los resultados. Nuevas publicaciones, plataformas de ejecución, estrategias de mitigación de errores, enfoques de integración híbrida o propuestas metodológicas pueden modificar en poco tiempo la lectura del estado del arte. En este sentido, los resultados obtenidos son pertinentes para comprender el panorama revisado, pero requieren actualización conforme evolucionen la tecnología cuántica y la literatura especializada. Esta investigación ofrece, por tanto, una aproximación válida para el periodo estudiado, aunque no debe asumirse como una descripción permanente de un campo todavía inestable.

También debe considerarse que la investigación se apoyó principalmente en literatura académica indexada. Esta decisión fortalece el rigor documental del estudio, porque permite trabajar con fuentes académicas revisadas y trazables; sin embargo, también delimita el tipo de conocimiento incluido en el análisis. En un campo emergente como el CQ y la ISQ, parte del conocimiento aplicado puede circular primero en repositorios de software, documentación técnica, informes industriales, tutoriales, cursos, comunidades de desarrollo o experiencias profesionales, antes de consolidarse como literatura científica indexada. Esta condición es relevante porque estudios empíricos sobre la adopción actual de la programación cuántica han mostrado que el uso de entornos de desarrollo cuánticos también se expresa en repositorios orientados a ejercicios, enseñanza, investigación, herramientas, librerías y proyectos exploratorios [100]. Por tanto, la adopción de herramientas, flujos de trabajo, buenas prácticas, arquitecturas híbridas y soluciones técnicas puede avanzar en la práctica antes de ser reportada formalmente en publicaciones académicas [101]. En consecuencia, los resultados de esta investigación representan una lectura académica del campo, pero no agotan todas sus expresiones técnicas, educativas, comunitarias o industriales.

La aplicación del marco en contextos formativos concretos constituye otra amenaza externa. Aunque la propuesta se plantea como una aportación para la formación inicial en educación superior, su transferencia a programas, cursos o instituciones específicas requiere adecuaciones según el nivel académico, el perfil de los estudiantes, la duración del trayecto formativo, la infraestructura disponible, las competencias docentes y los objetivos curriculares. En consecuencia, la versión desarrollada en esta investigación no debe asumirse como directamente aplicable a cualquier escenario educativo sin un proceso previo de contextualización, adaptación y ajuste.

Finalmente, la diversidad disciplinar de la ISQ y el alcance todavía inicial del contraste académico realizado limitan la generalización externa de la propuesta. El campo integra aportes provenientes del CQ, la IS, las ciencias computacionales, la arquitectura de software, las pruebas, la compilación, los sistemas híbridos, la educación y la gestión tecnológica. Por ello, distintos programas, instituciones o comunidades académicas podrían priorizar componentes diferentes según sus necesidades, recursos y objetivos formativos. Asimismo, la revisión académica inicial no representa todavía una evaluación amplia por parte de una comunidad extensa ni una aplicación empírica del marco en escenarios educativos reales. En conjunto, estas amenazas externas muestran que los resultados de esta investigación son útiles para caracterizar y organizar el panorama actual de la ISQ desde una perspectiva académica, siempre que se reconozca su dependencia del periodo analizado, de las fuentes consultadas y de los contextos en los que eventualmente pudiera aplicarse.

4.7. Productos obtenidos

A partir del desarrollo de la investigación se obtuvieron productos académicos, metodológicos y documentales asociados con las tres fases del estudio. Esta sección presenta dichos productos como resultados concretos de esta investigación; los anexos funcionan como soporte y despliegue documental, pero no sustituyen la explicación de su papel dentro del proceso de investigación.

Un primer producto corresponde al trabajo *“Exploring the Current State of Quantum Computing Towards Quantum Software Engineering”*, derivado de la etapa inicial de exploración temática. Este documento, aceptado para su inclusión en el libro *Advances in Software Engineering* de la serie *Studies in Computational Intelligence* de Springer, funcionó como antecedente para reconocer la fragmentación del campo y justificar la necesidad de avanzar hacia una organización más estructurada de conocimientos relacionados con la ISQ. Se integra como Anexo A.

Como resultado del AB, se obtuvo un artículo académico centrado en la caracterización de la evolución científica del campo durante el periodo entre 2020 y el primer trimestre de 2025. Este producto desarrolla con mayor amplitud el procedimiento de búsqueda, depuración, normalización y análisis del corpus, así como los resultados sobre producción científica, evolución temática y redes de colaboración. El artículo se presenta en el Anexo B, mientras que el material complementario del AB, como tablas, diagramas, mapas temáticos y redes, se integra en el Anexo C.

La RSL generó un borrador de artículo académico y un conjunto de instrumentos metodológicos de apoyo. El borrador, incluido como Anexo D, desarrolla de forma más amplia el proceso y los resultados de la revisión. Los instrumentos asociados, integrados en el Anexo E, incluyen elementos del protocolo, criterios de inclusión y exclusión, normas de calidad, extracción de datos y clasificación temática. Estos materiales respaldan la trazabilidad de la revisión y documentan las decisiones empleadas para conformar el corpus final de estudios analizados.

Otro producto central corresponde a la matriz de trazabilidad utilizada para elaborar QSEAK_v0, integrada en el Anexo F. Esta matriz relaciona insumos documentales, temas identificados y su incorporación en áreas, componentes y tópicos. Su función es mostrar cómo los resultados del AB, la RSL y la literatura complementaria fueron articulados durante la construcción de la propuesta, reduciendo la posible percepción de arbitrariedad en la organización del marco.

También se obtuvieron las versiones documentadas del marco de fundamentos referenciales en español e inglés. La versión en español se integra como Anexo G y funcionó como documento principal de trabajo dentro de esta investigación. La versión en inglés, presentada en el Anexo H, permitió ampliar la comunicabilidad académica de la propuesta y facilitar su revisión por especialistas no hispanohablantes. Ambas versiones conservan la misma estructura general y se reconocen como productos derivados de la tercera fase.

Finalmente, se obtuvo evidencia documental de la revisión académica inicial, presentada en el Anexo I y en el archivo digital correspondiente. Esta evidencia reúne registros asociados con el contacto de especialistas, el envío de la propuesta y la recepción de retroalimentación sobre claridad, alcance, profundidad, secuenciación y pertinencia. Aunque no constituye una validación amplia o definitiva, representa un primer contraste especializado que permitió reconocer fortalezas, límites y oportunidades de mejora para una versión posterior.

En conjunto, estos productos documentan la trayectoria seguida desde la exploración inicial del campo hasta la elaboración y contraste preliminar de QSEAK_v0. Además de respaldar el cumplimiento de los objetivos, muestran que esta investigación produjo resultados académicos y metodológicos concretos que pueden servir como base para publicaciones, refinamientos del marco y continuidad de la investigación.

4.8. Cumplimiento de los objetivos de la investigación

Como cierre del capítulo de resultados, esta sección sintetiza el cumplimiento de los objetivos de la investigación, relacionando cada uno con la evidencia generada: el AB, la RSL, la elaboración de QSEAK_v0, la revisión académica inicial y los productos documentales integrados en los anexos A–I.

La Tabla 10 presenta la relación entre los objetivos, su estado de cumplimiento y la evidencia principal que respalda dicho cumplimiento, permitiendo observar cómo fueron atendidos mediante los productos desarrollados en las distintas fases del estudio.

Tabla 10. Síntesis del cumplimiento de los objetivos de la investigación.

Objetivo evaluado	Cumplimiento	Evidencia de cumplimiento
Objetivo general	Cumplido	Se organizó una base inicial de conocimientos sobre el panorama actual del CQ en las propuestas de ISQ, mediante la articulación del AB, la RSL y la elaboración de QSEAK_v0 como primera versión del marco de fundamentos referenciales. La evidencia se desarrolla en los capítulos 3 y 4, así como en los anexos correspondientes.
Objetivo específico asociado al AB	Cumplido	Se realizó un AB a partir de un corpus depurado de 385 documentos. Este análisis permitió caracterizar la evolución reciente del campo, sus tendencias temáticas, redes bibliométricas y estructura de colaboración. La evidencia se presenta en la sección 4.1 y en los productos asociados a esta fase.
Objetivo específico asociado a la RSL	Cumplido	Se desarrolló una RSL a partir de 1,571 registros iniciales; tras la depuración, selección, clasificación y evaluación de calidad, se analizaron 67 estudios finales. Estos permitieron identificar enfoques, herramientas, metodologías, desafíos y elementos formativos vinculados con la ISQ. La evidencia se presenta en la sección 4.2 y en los productos asociados a esta fase.
Objetivo específico asociado a la propuesta referencial	Cumplido en versión inicial	Se elaboró el QSEAK_v0 como primera versión del marco de fundamentos referenciales, organizado en tres áreas: fundamentos, conocimientos técnicos especializados y conocimientos transversales y profesionales. La propuesta fue documentada, presentada como resultado de la tercera fase y sometida a revisión académica inicial. La evidencia se presenta en las secciones 4.3, 4.4 y 4.7.

La evidencia sintetizada muestra que los objetivos fueron atendidos conforme al alcance definido: el AB caracterizó el campo, la RSL profundizó en la literatura especializada y QSEAK_v0 articuló ambos insumos en una propuesta inicial y revisable.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros

Este capítulo presenta las conclusiones derivadas del desarrollo de la investigación y plantea las principales líneas de trabajo futuro. En primer lugar, se sintetizan los hallazgos obtenidos a partir del AB, la RSL, la elaboración de la versión inicial del marco y la revisión académica inicial. Posteriormente, se proponen líneas de continuidad orientadas al refinamiento, contraste y posible evolución del marco referencial.

5.1. Conclusiones

Este trabajo permite concluir que la ISQ ha avanzado como campo de investigación, pero aún no dispone de una organización formativa suficientemente integrada para orientar la preparación inicial de perfiles vinculados con el desarrollo de software cuántico. La literatura muestra aportes relevantes en herramientas, métodos, pruebas, calidad, integración híbrida y entornos tecnológicos, aunque estos permanecen distribuidos entre líneas con distintos niveles de madurez, profundidad y articulación.

La combinación entre AB y RSL fue determinante para sostener esta conclusión. El AB ofreció una lectura panorámica del campo, al mostrar la evolución reciente de la producción científica, los clústeres temáticos y las relaciones generales entre actores académicos. La RSL permitió pasar de esa caracterización general a una lectura especializada de contenidos técnicos, metodológicos y formativos. Esta complementariedad evitó depender sólo de tendencias cuantitativas o sólo de una revisión temática aislada.

A partir de esa doble lectura, QSEAK_v0 aporta una respuesta inicial a la dispersión observada. La contribución de este trabajo no consiste en validar de manera definitiva un cuerpo de conocimiento, sino en construir una base referencial trazable y revisable para discutir la formación inicial en ISQ desde una perspectiva de IS. Su estructura diferencia una base conceptual, una dimensión técnico-especializada y un plano transversal de actuación profesional, lo que permite ordenar elementos que la literatura presenta de manera fragmentada.

El alcance de QSEAK_v0 debe entenderse con precisión. La propuesta no constituye un currículo cerrado, un estándar profesional ni un modelo validado por consenso comunitario. Su valor se encuentra en documentar una primera organización de conocimientos, identificar brechas de articulación y ofrecer un punto de partida para discusiones académicas o formativas posteriores. Esta delimitación es importante porque evita sobreestimar el resultado y, al mismo tiempo, permite reconocer su utilidad como producto integrador de la investigación.

Una conclusión sustantiva del trabajo es que la formación en ISQ requiere más que cursos de CQ o ejercicios de programación cuántica. Preparar perfiles capaces de participar en el desarrollo de software cuántico implica relacionar fundamentos del dominio cuántico con prácticas de IS, arquitectura, ciclo de vida, integración, calidad, pruebas, reproducibilidad,

mantenimiento, comunicación técnica y criterios profesionales de decisión. Esta articulación constituye una de las brechas principales observadas en la literatura revisada.

El contraste académico inicial permitió reconocer que la propuesta es pertinente como esfuerzo de organización, pero también mostró límites que deben atenderse en versiones posteriores. Entre ellos destacan la necesidad de fortalecer la trazabilidad entre evidencia y estructura, revisar la ubicación de contenidos específicos, precisar el uso formativo del marco y ampliar los mecanismos de evaluación académica. Por ello, las conclusiones no presentan QSEAK_v0 como cierre del campo, sino como resultado inicial sujeto a refinamiento.

Por lo que, la investigación cumplió su propósito al pasar de una caracterización dispersa del panorama de la ISQ a una organización referencial documentada. La continuidad natural del trabajo se orienta a ampliar la trazabilidad, contrastar el marco con referentes externos, adaptarlo a niveles formativos específicos, definir perfiles de ingreso y egreso, y actualizarlo conforme evolucionen la literatura, las herramientas y las necesidades de formación en ISQ.

5.2. Trabajos futuros

Los trabajos futuros se derivan de las amenazas a la validez identificadas, de la revisión académica inicial, del carácter preliminar de QSEAK_v0 y de la necesidad de fortalecer la trazabilidad, el contraste académico y la adaptación formativa del marco. Por ello, estas líneas no se plantean como tareas personales aisladas, sino como continuidad académica de los resultados alcanzados por este trabajo.

Como refinamiento inmediato, QSEAK_v0.1 debería incorporar de manera justificada las observaciones recibidas, fortalecer la trazabilidad entre resultados de la RSL, referentes de IS, literatura complementaria y estructura del marco, y revisar la ubicación o visibilidad de contenidos específicos señalados durante el contraste académico. El objetivo sería producir una versión más clara, defendible y explícita en sus decisiones de organización.

Después de esa estabilización inicial, convendría formalizar perfiles y niveles formativos. En particular, sería necesario precisar qué conocimientos corresponden a una formación inicial en ISQ, qué profundidad debería tener cada área y qué precondiciones y poscondiciones podrían orientar una trayectoria formativa. Esta línea puede desarrollarse en términos de perfiles de ingreso, perfiles de egreso y resultados de aprendizaje, con especial atención a una posible adaptación para nivel licenciatura sin asumir que QSEAK_v0 ya constituye un currículo cerrado para dicho nivel.

El marco también requiere contrastarse con referentes externos, como la guía del cuerpo de conocimientos de ingeniería de software (SWEBOK, por sus siglas en inglés), currículos de computación, estándares de ciclo de vida, modelos de calidad y propuestas educativas en tecnologías cuánticas. Este contraste permitiría identificar correspondencias, vacíos, solapamientos y ajustes necesarios para fortalecer la estructura del marco y delimitar con

mayor precisión qué elementos provienen de la IS, cuáles del CQ y cuáles emergen de su articulación en la ISQ.

Otra continuidad necesaria es ampliar la evaluación académica mediante mecanismos más sistemáticos, como juicio de expertos, encuestas estructuradas, rondas Delphi o espacios colaborativos de discusión. Esta línea busca superar el alcance limitado de la revisión inicial y generar evidencia más amplia sobre la pertinencia, claridad, completitud y utilidad del marco. También permitiría documentar desacuerdos, prioridades y criterios de mejora con mayor rigor metodológico.

En un plano de mayor alcance, podría avanzarse hacia una arquitectura de referencia académica para trayectorias formativas en ISQ. Esta posibilidad no debe entenderse como el paso inmediato posterior, ya que requeriría un nivel de formalización superior al de QSEAK_v0. Para desarrollarla sería necesario integrar perfiles, niveles de profundidad, secuencias de aprendizaje, recursos educativos, mecanismos de evaluación y criterios de adaptación institucional, además de un contraste más amplio con especialistas y contextos formativos reales.

Finalmente, se mantiene como línea transversal la comunicación académica de los productos derivados, incluyendo el refinamiento del marco y la preparación o mejora de publicaciones asociadas al AB y a la RSL. Esta continuidad contribuiría a ampliar el diálogo especializado sobre la ISQ y a someter la propuesta a revisión, discusión y actualización dentro de la comunidad académica correspondiente.

Bibliografía

- [1] G. Bisicchia, J. Garcia-Alonso, J. M. Murillo, y A. Brogi, “From Quantum Mechanics to Quantum Software Engineering: A Historical Review”, el 8 de mayo de 2024, arXiv: arXiv:2404.19428. doi: 10.48550/arXiv.2404.19428.
- [2] S. Ali, T. Yue, y R. Abreu, “When software engineering meets quantum computing”, *Commun. ACM*, vol. 65, núm. 4, pp. 84–88, abr. 2022, doi: 10.1145/3512340.
- [3] S. S. Gill et al., “Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions”, *Softw. Pract. Exp.*, vol. 52, núm. 1, pp. 66–114, sep. 2021, doi: 10.1002/spe.3039.
- [4] M. Piattini et al., “The Talavera Manifesto for Quantum Software Engineering and Programming”, presentado en First International Workshop on Quantum Software Engineering & Programming (QuANSWER), Talavera de la Reina, España: Publicado por los autores bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0), 2020.
- [5] A. Arismendi y S. Pombo Mott, “Retos a los que se enfrenta la Ingeniería del Software Cuántico”, *Mem. Investig. En Ing.*, núm. 25, pp. 90–106, dic. 2023, doi: 10.36561/ING.25.7.
- [6] H. A. Bhat, F. A. Khanday, B. K. Kaushik, F. Bashir, y K. A. Shah, “Quantum Computing: Fundamentals, Implementations and Applications”, *IEEE Open J. Nanotechnol.*, vol. 3, pp. 61–77, 2022, doi: 10.1109/OJNANO.2022.3178545.
- [7] M. De Stefano, F. Pecorelli, F. Palomba, D. Taibi, D. Di Nucci, y A. De Lucia, “Quantum Software Engineering Issues and Challenges: Insights from Practitioners”, en *Quantum Software*, I. Exman, R. Pérez-Castillo, M. Piattini, y M. Felderer, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 337–355. doi: 10.1007/978-3-031-64136-7_13.
- [8] M. Haghparast, T. Mikkonen, J. K. Nurminen, y V. Stirbu, “Quantum Software Engineering Challenges from Developers’ Perspective: Mapping Research Challenges to the Proposed Workflow Model”, en *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, Jyväskylä, Finlandia, sep. 2023, pp. 173–176. doi: 10.1109/QCE57702.2023.10204.
- [9] M. Fingerhuth, T. Babej, y P. Wittek, “Open source software in quantum computing”, *PLOS ONE*, vol. 13, núm. 12, p. e0208561, dic. 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0208561.
- [10] C. R. Cartiere, “Formal Quantum Software Engineering: Introducing the Formal Methods of Software Engineering to Quantum Computing.”, 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.26157.10725/2.
- [11] R. Juárez-Ramírez et al., “A Taxonomic View of the Fundamental Concepts of Quantum Computing—A Software Engineering Perspective”, *Program. Comput. Softw.*, vol. 49, núm. 8, pp. 682–704, dic. 2023, doi: 10.1134/S0361768823080108.

- [12] S. Sepúlveda, A. Cravero, G. Fonseca, y L. Antonelli, “Systematic Review on Requirements Engineering in Quantum Computing: Insights and Future Directions”, *Electronics*, vol. 13, núm. 15, p. 2989, jul. 2024, doi: 10.3390/electronics13152989.
- [13] J. M. Murillo et al., “Challenges of Quantum Software Engineering for the Next Decade: The Road Ahead”, el 10 de abril de 2024, arXiv: arXiv:2404.06825. doi: 10.48550/arXiv.2404.06825.
- [14] E. Moguel, J. Berrocal, J. García-Alonso, y J. M. Murillo, “A Roadmap for Quantum Software Engineering: applying the lessons learned from the classics”, *Q-SETQCE*, 2020.
- [15] Á. M. Aparicio-Morales, E. Moguel, L. M. Bibbo, A. Fernandez, J. Garcia-Alonso, y J. M. Murillo, “An overview of quantum software engineering in Latin America”, *Quantum Inf. Process.*, vol. 23, núm. 11, p. 380, nov. 2024, doi: 10.1007/s11128-024-04586-5.
- [16] A. Khan, D. Taibi, C. M. Perrault, y M. A. Akbar, “Advancing Quantum Software Engineering: A Vision of Hybrid Full-Stack Iterative Model”, en *Proceedings of the 40th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*, Catania International Airport Catania Italy: ACM, mar. 2025, pp. 1444–1448. doi: 10.1145/3672608.3707725.
- [17] M. A. Nielsen y I. L. Chuang, *Quantum computation and quantum information*, 10th anniversary edition. Cambridge: Cambridge university press, 2010.
- [18] J. D. Hidary, *Quantum Computing: An Applied Approach*. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23922-0>
- [19] R. Juárez-Ramírez et al., “The Foundations of Quantum Computing and Their Relation to Software Engineering”, *Proc. Inst. Syst. Program. RAS*, vol. 36, núm. 1, pp. 73–104, 2024, doi: 10.15514/ISPRAS-2024-36(1)-6.
- [20] T. Patel, A. Potharaju, B. Li, R. B. Roy, y D. Tiwari, “Experimental Evaluation of NISQ Quantum Computers: Error Measurement, Characterization, and Implications”, en *SC20: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, Atlanta, GA, USA: IEEE, nov. 2020, pp. 1–15. doi: 10.1109/SC41405.2020.00050.
- [21] P. Murali, J. M. Baker, A. Javadi-Abhari, F. T. Chong, y M. Martonosi, “Noise-Adaptive Compiler Mappings for Noisy Intermediate-Scale Quantum Computers”, en *Proceedings of the Twenty-Fourth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, Providence RI USA: ACM, abr. 2019, pp. 1015–1029. doi: 10.1145/3297858.3304075.
- [22] R. S. Pressman, *Ingeniería del software: Un enfoque práctico*, Séptima edición. México; Bogotá; Buenos Aires; Caracas; Guatemala; Madrid: McGraw-Hill Education, 2010.

- [23] H. Washizaki, Ed., *Guide to the Software Engineering Body of Knowledge v4.0, Version 4.0*. Piscataway, NJ, EE. UU.: IEEE Computer Society, 2024.
- [24] M. Piattini, G. Peterssen, y R. Pérez-Castillo, “Quantum Computing: A New Software Engineering Golden Age”, *ACM SIGSOFT Softw. Eng. Notes*, vol. 45, núm. 3, pp. 12–14, jul. 2020, doi: 10.1145/3402127.3402131.
- [25] M. Piattini, M. Serrano, R. Perez-Castillo, G. Petersen, y J. L. Hevia, “Toward a Quantum Software Engineering”, *IT Prof.*, vol. 23, núm. 1, pp. 62–66, ene. 2021, doi: 10.1109/MITP.2020.3019522.
- [26] J. Zhao, “Quantum Software Engineering: Landscapes and Horizons”, el 31 de diciembre de 2021, arXiv: arXiv:2007.07047. doi: 10.48550/arXiv.2007.07047.
- [27] K. Dwivedi, M. Haghparast, y T. Mikkonen, “Quantum software engineering and quantum software development lifecycle: a survey”, *Clust. Comput.*, vol. 27, núm. 6, pp. 7127–7145, sep. 2024, doi: 10.1007/s10586-024-04362-1.
- [28] M. A. Serrano, R. Pérez-Castillo, y M. Piattini, Eds., *Quantum Software Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2022. doi: 10.1007/978-3-031-05324-5.
- [29] M. A. Akbar, A. A. Khan, S. Mahmood, y S. Rafi, “Quantum Software Engineering: A New Genre of Computing”, en *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Quantum Software Engineering: The Next Evolution*, Porto de Galinhas Brazil: ACM, jul. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1145/3663531.3664750.
- [30] M. De Stefano, F. Pecorelli, D. Di Nucci, F. Palomba, y A. De Lucia, “The quantum frontier of software engineering: A systematic mapping study”, *Inf. Softw. Technol.*, vol. 175, p. 107525, nov. 2024, doi: 10.1016/j.infsof.2024.107525.
- [31] B. Weder, J. Barzen, F. Leymann, M. Salm, y D. Vietz, “The Quantum software lifecycle”, en *Proceedings of the 1st ACM SIGSOFT International Workshop on Architectures and Paradigms for Engineering Quantum Software*, Virtual USA: ACM, nov. 2020, pp. 2–9. doi: 10.1145/3412451.3428497.
- [32] A. A. Khan et al., “Software architecture for quantum computing systems — A systematic review”, *J. Syst. Softw.*, vol. 201, p. 111682, mar. 2023, doi: 10.1016/j.jss.2023.111682.
- [33] S. Sepúlveda, M. Piattini, y R. Pérez Del Castillo, “Developing hybrid quantum-classical software: a software product line approach”, en *Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Workshop on Quantum Software Engineering*, Lisbon Portugal: ACM, abr. 2024, pp. 37–40. doi: 10.1145/3643667.3648224.
- [34] I.-D. Gheorghe-Pop, N. Tcholtchev, T. Ritter, y M. Hauswirth, “Quantum DevOps: Towards Reliable and Applicable NISQ Quantum Computing”, en *2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Taipei, Taiwan: IEEE, dic. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/GCWkshps50303.2020.9367411.

- [35] Á. M. Aparicio-Morales, E. Moguel, J. Garcia-Alonso, A. Fernandez, L. M. Bibbo, y J. M. Murillo, “Supply and Demand in the Training of Quantum Software Engineering Workforce”, *Mem. Investig. En Ing.*, núm. 27, pp. 248–256, dic. 2024, doi: 10.36561/ING.27.16.
- [36] F. Galetto, H. H. López, M. Rahmati, J. Sang, y C. Yu, “Experience in teaching quantum computing with hands-on programming labs”, *J. Supercomput.*, vol. 80, núm. 10, pp. 14029–14056, jul. 2024, doi: 10.1007/s11227-024-06001-3.
- [37] M. Mykhailova y K. M. Svore, “Teaching Quantum Computing through a Practical Software-driven Approach: Experience Report”, en *Proceedings of the 51st ACM Technical Symposium on Computer Science Education*, Portland OR USA: ACM, feb. 2020, pp. 1019–1025. doi: 10.1145/3328778.3366952.
- [38] N. Kiefl y G. Hagel, “Software Engineering Education of Classical Computing vs. Quantum Computing: A Competency-Centric Approach”, en *Proceedings of the 4th European Conference on Software Engineering Education*, Seon/Bavaria Germany: ACM, jun. 2020, pp. 27–31. doi: 10.1145/3396802.3396816.
- [39] Z. Liang y H. Wang, “QuCS: A Lecture Series on Quantum Computer Software and System”, en *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, Bellevue, WA, USA: IEEE, sep. 2023, pp. 40–48. doi: 10.1109/QCE57702.2023.20323.
- [40] J. T. Guerin, “Creating a Quantum Programming Course from Scratch: A Computer Science Professor’s Journey”, en *Proceedings of the 56th ACM Technical Symposium on Computer Science Education V. 1*, Pittsburgh PA USA: ACM, feb. 2025, pp. 409–415. doi: 10.1145/3641554.3701876.
- [41] M. Mykhailova, “Developing Programming Assignments for Teaching Quantum Computing and Quantum Programming”, en *2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, sep. 2022, pp. 688–692. doi: 10.1109/QCE53715.2022.00092.
- [42] R. A. Wolf y S. Araiba, “A brief overview of programmed instructions for quantum software education”, en *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, sep. 2023, pp. 78–86. doi: 10.1109/QCE57702.2023.20327.
- [43] E. Dimitrov et al., “QPCC: A Quantum Programming Course for Inhomogeneous Cohorts of Professional Learners”, en *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, Bellevue, WA, USA: IEEE, sep. 2023, pp. 101–111. doi: 10.1109/QCE57702.2023.20330.
- [44] N. Donthu, S. Kumar, D. Mukherjee, N. Pandey, y W. M. Lim, “How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines”, *J. Bus. Res.*, vol. 133, pp. 285–296, sep. 2021, doi: 10.1016/j.jbusres.2021.04.070.
- [45] R. Prancutè, “Web of Science (WoS) and Scopus: The Titans of Bibliographic Information in Today’s Academic World”, *Publications*, vol. 9, núm. 1, p. 12, mar. 2021, doi: 10.3390/publications9010012.

- [46] M. Visser, N. J. Van Eck, y L. Waltman, “Large-scale comparison of bibliographic data sources: Scopus, Web of Science, Dimensions, Crossref, and Microsoft Academic”, *Quant. Sci. Stud.*, vol. 2, núm. 1, pp. 20–41, abr. 2021, doi: 10.1162/qss_a_00112.
- [47] J. Baas, M. Schotten, A. Plume, G. Côté, y R. Karimi, “Scopus as a curated, high-quality bibliometric data source for academic research in quantitative science studies”, *Quant. Sci. Stud.*, vol. 1, núm. 1, pp. 377–386, feb. 2020, doi: 10.1162/qss_a_00019.
- [48] M. J. Cobo, A. G. López-Herrera, E. Herrera-Viedma, y F. Herrera, “SciMAT: A new science mapping analysis software tool”, *J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.*, vol. 63, núm. 8, pp. 1609–1630, ago. 2012, doi: 10.1002/asi.22688.
- [49] N. J. Van Eck y L. Waltman, “Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping”, *Scientometrics*, vol. 84, núm. 2, pp. 523–538, ago. 2010, doi: 10.1007/s11192-009-0146-3.
- [50] B. Kitchenham y S. Charters, “Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering”, vol. 2, ene. 2007.
- [51] M. J. Page et al., “The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews”, *BMJ*, p. n71, mar. 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.
- [52] P. B. Upama et al., “Evolution of Quantum Computing: A Systematic Survey on the Use of Quantum Computing Tools”, en *2022 IEEE 46th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*, Los Alamitos, CA, USA: IEEE, jun. 2022, pp. 520–529. doi: 10.1109/COMPSAC54236.2022.00096.
- [53] R. Juárez-Ramírez et al., “Skills Required for Quantum Computing: A Comprehensive Review of Recent Studies”, *Program. Comput. Softw.*, vol. 50, núm. 8, pp. 844–874, dic. 2024, doi: 10.1134/S0361768824700804.
- [54] S. S. Gill et al., “Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions”, *Softw. Pract. Exp.*, vol. 52, núm. 1, pp. 66–114, ene. 2022, doi: 10.1002/spe.3039.
- [55] L. S. Woody, *Essential Mathematics for Quantum Computing: A Beginner’s Guide to Just the Math You Need Without Needless Complexities*. Birmingham: Packt Publishing, Limited, 2022.
- [56] R. S. Sutor, *Dancing with qubits: from qubits to algorithms, embark on the quantum computing journey shaping our future*, Second edition. Birmingham Mumbai: Packt, 2024.
- [57] H. Deng, Y. Peng, M. Hicks, y X. Wu, “Automating NISQ Application Design with Meta Quantum Circuits with Constraints (MQCC)”, *ACM Trans. Quantum Comput.*, vol. 4, núm. 3, pp. 1–29, sep. 2023, doi: 10.1145/3579369.
- [58] S. Ali y T. Yue, “Modeling Quantum programs: challenges, initial results, and research directions”, en *Proceedings of the 1st ACM SIGSOFT International Workshop on Architectures and Paradigms for Engineering Quantum Software*, Virtual USA: ACM, nov. 2020, pp. 14–21. doi: 10.1145/3412451.3428499.

- [59] F. Gemeinhardt, A. Garmendia, y M. Wimmer, “Towards Model-Driven Quantum Software Engineering”, en 2021 IEEE/ACM 2nd International Workshop on Quantum Software Engineering (Q-SE), Madrid, Spain: IEEE, jun. 2021, pp. 13–15. doi: 10.1109/Q-SE52541.2021.00010.
- [60] M. Polo, I. García-Rodríguez, M. Serrano, y M. Piattini, “Generation of Quantum Software From Truth Tables”, *Softw. Pract. Exp.*, vol. 55, núm. 8, pp. 1389–1407, ago. 2025, doi: 10.1002/spe.3426.
- [61] R. Perez-Castillo, L. Jimenez-Navajas, y M. Piattini, “Modelling Quantum Circuits with UML”, en 2021 IEEE/ACM 2nd International Workshop on Quantum Software Engineering (Q-SE), Madrid, Spain: IEEE, jun. 2021, pp. 7–12. doi: 10.1109/Q-SE52541.2021.00009.
- [62] X. Guo, S. Saito, y J. Zhao, “QuanUML: Towards A Modeling Language for Model-Driven Quantum Software Development”, en 2025 IEEE 49th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC), Toronto, ON, Canada: IEEE, jul. 2025, pp. 1344–1349. doi: 10.1109/COMPSAC65507.2025.00168.
- [63] A. A. Khan et al., “Agile Practices for Quantum Software Development: Practitioners’ Perspectives”, en 2023 IEEE International Conference on Quantum Software (QSW), Chicago, IL, USA: IEEE, jul. 2023, pp. 9–20. doi: 10.1109/QSW59989.2023.00012.
- [64] A. A. Khan et al., “Agile meets quantum: a novel genetic algorithm model for predicting the success of quantum software development project”, *Autom. Softw. Eng.*, vol. 31, núm. 1, p. 34, may 2024, doi: 10.1007/s10515-024-00434-z.
- [65] M. Fernández-Osuna, R. Pérez-Castillo, J. A. Cruz-Lemus, M. Baczyk, y M. Piattini, “Exploring design patterns in quantum software: a case study”, *Computing*, vol. 107, núm. 5, p. 111, may 2025, doi: 10.1007/s00607-025-01467-2.
- [66] J. Shen, J. Ammermann, C. König, y I. Schaefer, “Quantum Pattern Detection: Accurate State- and Circuit-Based Analyses”, en 2025 IEEE/ACM International Workshop on Quantum Software Engineering (Q-SE), Ottawa, ON, Canada: IEEE, may 2025, pp. 9–16. doi: 10.1109/Q-SE66736.2025.00008.
- [67] W. Maurer y S. Scherzinger, “1-2-3 Reproducibility for Quantum Software Experiments”, en 2022 IEEE International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER), Honolulu, HI, USA: IEEE, mar. 2022, pp. 1247–1248. doi: 10.1109/SANER53432.2022.00148.
- [68] K. Upadhyay, V. Chhetri, A. B. Siddique, y U. Farooq, “Analyzing the Evolution and Maintenance of Quantum Software Repositories”, en 2025 IEEE International Conference on Quantum Software (QSW), jul. 2025, pp. 173–184. doi: 10.1109/QSW67625.2025.00029.
- [69] A. Ahmad, A. A. Khan, M. Waseem, M. Fahmideh, y T. Mikkonen, “Towards Process Centered Architecting for Quantum Software Systems”, en 2022 IEEE

International Conference on Quantum Software (QSW), Barcelona, Spain: IEEE, jul. 2022, pp. 26–31. doi: 10.1109/QSW55613.2022.00019.

[70] Y. Huang, X. Zhou, F. Meng, y S. Li, “Qubit mapping: the adaptive divide-and-conquer approach”, *Quantum Inf. Process.*, vol. 24, núm. 7, p. 202, jul. 2025, doi: 10.1007/s11128-025-04815-5.

[71] G. Uchegara, T. M. Aamodt, y O. Di Matteo, “Graph-Based Identification of Qubit Network (GidNET) for Qubit Reuse”, en 2024 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), Montreal, QC, Canada: IEEE, sep. 2024, pp. 1120–1131. doi: 10.1109/QCE60285.2024.00131.

[72] Y. Jin et al., “Tetris: A Compilation Framework for VQA Applications in Quantum Computing”, en 2024 ACM/IEEE 51st Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA), Buenos Aires, Argentina: IEEE, jun. 2024, pp. 277–292. doi: 10.1109/ISCA59077.2024.00029.

[73] L. Lao y D. E. Browne, “2QAN: a quantum compiler for 2-local qubit hamiltonian simulation algorithms”, en *Proceedings of the 49th Annual International Symposium on Computer Architecture*, New York New York: ACM, jun. 2022, pp. 351–365. doi: 10.1145/3470496.3527394.

[74] A. Neri, R. S. Barbosa, y J. N. Oliveira, “Compiling Quantamorphisms for the IBM Q Experience”, *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 48, núm. 11, pp. 4339–4356, nov. 2022, doi: 10.1109/TSE.2021.3117515.

[75] J. Wang, Q. Zhang, G. H. Xu, y M. Kim, “QDiff: Differential Testing of Quantum Software Stacks”, en 2021 36th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE), Melbourne, Australia: IEEE, nov. 2021, pp. 692–704. doi: 10.1109/ASE51524.2021.9678792.

[76] D. Alonso, P. Sánchez, y B. Álvarez, “A Graph-Based Approach for Modelling Quantum Circuits”, *Appl. Sci.*, vol. 13, núm. 21, p. 11794, oct. 2023, doi: 10.3390/app132111794.

[77] T. Peham, L. Burgholzer, y R. Wille, “Equivalence Checking of Parameterized Quantum Circuits: Verifying the Compilation of Variational Quantum Algorithms”, en *Proceedings of the 28th Asia and South Pacific Design Automation Conference*, Tokyo Japan: ACM, ene. 2023, pp. 702–708. doi: 10.1145/3566097.3567932.

[78] L. Burgholzer, R. Raymond, y R. Wille, “Verifying Results of the IBM Qiskit Quantum Circuit Compilation Flow”, en 2020 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), Denver, CO, USA: IEEE, oct. 2020, pp. 356–365. doi: 10.1109/QCE49297.2020.00051.

[79] M. Paltenghi y M. Pradel, “Analyzing Quantum Programs with LintQ: A Static Analysis Framework for Qiskit”, *Proc. ACM Softw. Eng.*, vol. 1, núm. FSE, pp. 2144–2166, jul. 2024, doi: 10.1145/3660802.

- [80] S. Xia y J. Zhao, “Static Entanglement Analysis of Quantum Programs”, en 2023 IEEE/ACM 4th International Workshop on Quantum Software Engineering (Q-SE), Melbourne, Australia: IEEE, may 2023, pp. 42–49. doi: 10.1109/Q-SE59154.2023.00013.
- [81] Y. Mao, S. Shresthamali, y M. Kondo, “Q-fid: Quantum Circuit Fidelity Improvement with LSTM Networks”, *Adv. Quantum Technol.*, vol. 8, núm. 10, p. 2500022, oct. 2025, doi: 10.1002/qute.202500022.
- [82] M. M. Louamri, N. E. Belaloui, A. Tounsi, y M. T. Rouabah, “Comparative Study of Quantum Transpilers: Evaluating the Performance of qiskit-braket-provider, qBraid-SDK, and Pytket Extensions”, en 2024 1st International Conference on Innovative and Intelligent Information Technologies (IC3IT), dic. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/IC3IT63743.2024.10869429.
- [83] V. De Maio, I. Brandic, E. Deelman, y J. Cito, “The Road to Hybrid Quantum Programs: Characterizing the Evolution from Classical to Hybrid Quantum Software”, en *Proceedings of the 33rd ACM International Conference on the Foundations of Software Engineering*, Clarion Hotel Trondheim Trondheim Norway: ACM, jun. 2025, pp. 1721–1731. doi: 10.1145/3696630.3731623.
- [84] V. Gheorghiu, J. Huang, S. M. Li, M. Mosca, y P. Mukhopadhyay, “Reducing the CNOT count for Clifford+T circuits on NISQ architectures”, *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 42, núm. 6, pp. 1873–1884, jun. 2023, doi: 10.1109/TCAD.2022.3213210.
- [85] N. Tornow, E. Giortamis, y P. Bhatotia, “QVM: Quantum Gate Virtualization Machine”, *Proc. ACM Program. Lang.*, vol. 9, núm. PLDI, pp. 993–1018, jun. 2025, doi: 10.1145/3729290.
- [86] J. Alvarado-Valiente, J. Romero-Álvarez, E. Moguel, J. García-Alonso, y J. M. Murillo, “Orchestration for quantum services: The power of load balancing across multiple service providers”, *Sci. Comput. Program.*, vol. 237, p. 103139, oct. 2024, doi: 10.1016/j.scico.2024.103139.
- [87] M. Weigold, J. Barzen, F. Leymann, y D. Vietz, “Patterns for Hybrid Quantum Algorithms”, en *Service-Oriented Computing*, vol. 1429, J. Barzen, Ed., en *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1429, Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 34–51. doi: 10.1007/978-3-030-87568-8_2.
- [88] A. Li, S. Stein, S. Krishnamoorthy, y J. Ang, “QASMBench: A Low-Level Quantum Benchmark Suite for NISQ Evaluation and Simulation”, *ACM Trans. Quantum Comput.*, vol. 4, núm. 2, pp. 1–26, jun. 2023, doi: 10.1145/3550488.
- [89] S. Nishio, Y. Pan, T. Satoh, H. Amano, y R. V. Meter, “Extracting Success from IBM’s 20-Qubit Machines Using Error-Aware Compilation”, *ACM J. Emerg. Technol. Comput. Syst.*, vol. 16, núm. 3, pp. 1–25, jul. 2020, doi: 10.1145/3386162.
- [90] S. Brandhofer, I. Polian, S. Barz, y D. Bhatti, “Hardware-efficient preparation of architecture-specific graph states on near-term quantum computers”, *Sci. Rep.*, vol. 15, núm. 1, p. 2095, ene. 2025, doi: 10.1038/s41598-024-82715-x.

- [91] F. M. Creevey, C. D. Hill, y L. C. L. Hollenberg, “GASP: a genetic algorithm for state preparation on quantum computers”, *Sci. Rep.*, vol. 13, núm. 1, p. 11956, jul. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-37767-w.
- [92] R. Iten, R. Moyard, T. Metger, D. Sutter, y S. Woerner, “Exact and practical pattern matching for quantum circuit optimization”, *ACM Trans. Quantum Comput.*, vol. 3, núm. 1, pp. 1–41, mar. 2022, doi: 10.1145/3498325.
- [93] A. S. Roy, K. Pack, N. Wittler, y S. Machnes, “Software tool-set for automated quantum system identification and device bring up”, en 2025 17th International Conference on COMMunication Systems and NETworks (COMSNETS), ene. 2025, pp. 1062–1067. doi: 10.1109/COMSNETS63942.2025.10885595.
- [94] J. Doi y H. Horii, “Cache Blocking Technique to Large Scale Quantum Computing Simulation on Supercomputers”, en 2020 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), Denver, CO, USA: IEEE, oct. 2020, pp. 212–222. doi: 10.1109/QCE49297.2020.00035.
- [95] Y. Lu, S. Liang, H. Fan, C. Guo, W. Luk, y P. H. J. Kelly, “Versatile Cross-platform Compilation Toolchain for Schrödinger-style Quantum Circuit Simulation”, en 2025 62nd ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC), San Francisco, CA, USA: IEEE, jun. 2025, pp. 1–7. doi: 10.1109/DAC63849.2025.11132539.
- [96] J. Ammermann, T. Bittner, D. Eichhorn, I. Schaefer, y C. Seidl, “Can Quantum Computing Improve Uniform Random Sampling of Large Configuration Spaces?”, en 2023 IEEE/ACM 4th International Workshop on Quantum Software Engineering (Q-SE), Melbourne, Australia: IEEE, may 2023, pp. 34–41. doi: 10.1109/Q-SE59154.2023.00012.
- [97] M. Haghparast, E. Moguel, J. Garcia-Alonso, T. Mikkonen, y J. M. Murillo, “Innovative Approaches to Teaching Quantum Computer Programming and Quantum Software Engineering”, en 2024 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), Montreal, QC, Canada: IEEE, sep. 2024, pp. 251–255. doi: 10.1109/QCE60285.2024.10287.
- [98] M. Šćekić y A. Yakaryilmaz, “Comparing Quantum Software Development Kits for Introductory Level Education”, *Balt. J. Mod. Comput.*, vol. 10, núm. 1, 2022, doi: 10.22364/bjmc.2022.10.1.06.
- [99] G. d’Aloisio et al., “Exploring LLM-Driven Explanations for Quantum Algorithms”, en Proceedings of the 18th ACM/IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement, Barcelona Spain: ACM, oct. 2024, pp. 475–481. doi: 10.1145/3674805.3690753.
- [100] M. De Stefano, “An empirical study on the current adoption of quantum programming”, en Proceedings of the ACM/IEEE 44th International Conference on Software Engineering: Companion Proceedings, Pittsburgh Pennsylvania: ACM, may 2022, pp. 310–312. doi: 10.1145/3510454.3522679.

- [101] M. Salam y M. Ilyas, “Quantum computing challenges and solutions in software industry—A multivocal literature review”, *IET Quantum Commun.*, vol. 5, núm. 4, pp. 462–485, dic. 2024, doi: 10.1049/qtc2.12096.

Anexos

Los anexos reúnen productos académicos, instrumentos metodológicos, materiales de soporte y evidencias complementarias derivados del desarrollo de la investigación. Su propósito es documentar con mayor detalle los insumos y productos utilizados durante la elaboración de QSEAK_v0, sin duplicar en el cuerpo principal de la tesis información que ya fue sintetizada en los capítulos correspondientes.

Algunos anexos se integran directamente en este documento por su relevancia metodológica y extensión manejable. Otros se entregan como archivos digitales independientes debido a su extensión, densidad visual o naturaleza documental.

Tabla A. Organización de anexos y modalidad de entrega.

Identificador	Título	Modalidad de entrega
Anexo A	Artículo académico derivado de la fase inicial de la investigación	Archivo digital independiente
Anexo B	Artículo académico derivado del análisis bibliométrico	Archivo digital independiente
Anexo C	Material complementario del análisis bibliométrico	Archivo digital independiente
Anexo D	Borrador del artículo académico derivado de la revisión sistemática de la literatura	Archivo digital independiente
Anexo E	Instrumentos de la revisión sistemática de la literatura	Integrado en la tesis
Anexo F	Matriz de trazabilidad para la elaboración de QSEAK_v0	Archivo digital independiente
Anexo G	QSEAK_v0 en español	Archivo digital independiente
Anexo H	QSEAK_v0 en inglés	Archivo digital independiente
Anexo I	Evidencia de la revisión académica inicial de QSEAK_v0	Mensajes base integrados en la tesis y evidencia documental en archivo digital independiente

Anexo A. Artículo académico derivado de la fase inicial de la investigación

Por su extensión, este anexo se entrega como archivo digital independiente. El documento corresponde al artículo académico derivado de la etapa exploratoria inicial de la investigación y funciona como antecedente del estudio, ya que contribuyó a reconocer el estado general del campo, delimitar el problema de investigación y orientar la necesidad de una organización referencial de conocimientos vinculada con la ingeniería de software cuántico.

Archivo asociado: Anexo_A_Articulo_Fase_Inicial.pdf.

Anexo B. Artículo académico derivado del análisis bibliométrico

Por su extensión, este anexo se entrega como archivo digital independiente. El documento presenta el producto académico asociado con el análisis bibliométrico, incluyendo la caracterización del campo, la identificación de tendencias recientes, la evolución temática y las redes bibliométricas consideradas durante la investigación.

Archivo asociado: Anexo_B_Articulo_AB.pdf.

Anexo C. Material complementario del análisis bibliométrico

Por su naturaleza documental y visual, este anexo se entrega como archivo digital independiente. Reúne material de soporte asociado con el análisis bibliométrico, incluyendo información metodológica, técnica o documental relacionada con la configuración del análisis y los resultados obtenidos.

Archivo asociado: Anexo_C_Material_Complementario_AB.pdf.

Anexo D. Borrador del artículo académico derivado de la revisión sistemática de la literatura

Por su extensión, este anexo se entrega como archivo digital independiente. El documento corresponde al borrador del artículo académico derivado de la revisión sistemática de la literatura y desarrolla con mayor detalle el proceso de identificación, selección, evaluación y análisis de estudios.

Archivo asociado: Anexo_D_Borrador_Articulo_RSL.pdf.

Anexo E. Instrumentos de la revisión sistemática de la literatura

Este anexo reúne los instrumentos utilizados para la ejecución de la revisión sistemática de la literatura. Incluye la cadena de búsqueda, los criterios de inclusión y exclusión, las notas metodológicas aplicadas durante el cribado, las categorías temáticas de clasificación y los criterios de calidad empleados para valorar los estudios seleccionados. Su propósito es documentar de forma trazable las decisiones metodológicas que sustentaron la selección, clasificación y análisis de la literatura.

Tabla B. Criterios de inclusión de la revisión sistemática de la literatura.

Identificador	Criterio	Descripción
CI1	Idioma	Artículos académicos escritos en inglés.
CI2	Periodo	Artículos académicos publicados entre 2019 y 2025 (incluyendo ambos años).

CI3	Revisión por pares	Artículos académicos publicados en conferencias, workshops o revistas académicas que cuenten con revisión por pares.
CI4	Enfoque explícito	Artículos académicos que indiquen una relación con la ISQ o el desarrollo de software cuántico.
CI5	Propuestas del ciclo de vida / flujos de trabajo	Artículos académicos que propongan, cubran o desarrollen completamente propuestas de ciclo de vida, flujos o secuencias de trabajo para el desarrollo del software cuántico, así como artículos que aborden únicamente una sección o etapa que aporte a organizar el proceso completo del desarrollo de software cuántico.
CI6	Procesos, calidad, pruebas y buenas prácticas	Artículos académicos relacionados con modelos de proceso del desarrollo de software cuántico, como pueden ser verificación, validación, pruebas, métricas, aseguramiento de calidad, buenas prácticas o actividades propuestas que formulen o aporten al ciclo de vida.
CI7	Desafíos de hardware con impacto en software	Artículos académicos que discutan problemas, restricciones o limitaciones físicas del hardware cuántico cuando estos afecten la implementación, ejecución, rendimiento o calidad del software cuántico.
CI8	Modelo del software cuántico	Artículos académicos que indiquen que fueron desarrollados en sistemas híbridos basados en el modelo de circuitos cuánticos, teniendo en cuenta la nota metodológica 1 (NM1).
CI9	Tecnología física de implementación	Artículos académicos que indiquen que fueron desarrollados en sistemas híbridos basados en la tecnología física de superconductores, teniendo en cuenta la nota metodológica 1 (NM1).
CI10	Qiskit como enfoque central	Artículos académicos cuyo enfoque principal sea Qiskit, así como trabajos comparativos donde Qiskit constituya uno de los elementos centrales respecto a otros entornos de desarrollo o lenguajes de programación cuánticos, considerando lo mencionado en la nota metodológica 2 (NM2).
CI11	Herramientas y entornos de desarrollo para software cuántico	Artículos académicos que presenten, evalúen o analicen herramientas, plataformas o entornos orientados al diseño, desarrollo, depuración, simulación, optimización o pruebas de software cuántico, siempre que no se trate de entornos de desarrollo ni lenguajes de programación, considerando la nota metodológica 2 (NM2).

CI12	Desafíos técnicos en entornos de desarrollo y ejecución del software cuántico	Artículos académicos que aborden limitaciones, problemas técnicos o desafíos derivados de entornos de desarrollo, kits de desarrollo de software, compiladores, transpiladores, entornos de ejecución, simuladores, cadenas de herramientas o <i>pipelines</i> que influyan en el desarrollo, ejecución o reproducibilidad del software cuántico.
CI13	Propuestas educativas o formativas	Artículos académicos que presenten propuestas educativas, enfoques pedagógicos, cursos, estrategias didácticas o contenidos formativos orientados a la enseñanza o aprendizaje de la ISQ o del desarrollo de software cuántico.
CI14	Enfoques formales o matemáticos aplicados	Artículos académicos teóricos o formales únicamente cuando indiquen explícitamente en su título o resumen su aplicación al diseño, análisis, validación, optimización, implementación o formación conceptual relevante para el desarrollo de software cuántico.
CI15	Desarrollos introductorios o panorámicos	Artículos académicos introductorios, panorámicos o de carácter conceptual siempre que contribuyan explícitamente a la comprensión, formación o fundamentación metodológica de la ISQ.

Tabla C. Criterios de exclusión de la revisión sistemática de la literatura.

Identificador	Criterio	Descripción
CE1	Idioma distinto al inglés	Artículos académicos escritos en idiomas distintos al inglés.
CE2	Fuera del periodo	Artículos académicos publicados antes de 2019 o después de 2025, salvo que representen antecedentes históricos esenciales.
CE3	Sin revisión por pares	Artículos académicos que no cuenten con arbitraje académico formal, tales como documentos técnicos no arbitrados, blogs, reportes industriales no validados, material divulgativo, presentaciones o literatura gris.
CE4	Sin acceso al texto completo	Artículos académicos cuyo contenido completo no esté disponible para su lectura.
CE5	Mención superficial de software cuántico	Artículos académicos que mencionen el software cuántico únicamente como ilustración, caso secundario o de manera superficial, sin aportar contenido metodológico, conceptual, técnico o formativo relevante para la ISQ.

CE6	Enfoque exclusivo en aprendizaje automático/aprendizaje automático cuántico	Artículos académicos cuyo aporte principal se limite al análisis, diseño o aplicación de técnicas de aprendizaje automático o aprendizaje automático cuántico sin una conexión explícita con actividades, procesos o herramientas del desarrollo de software cuántico.
CE7	Hardware sin relación con software cuántico	Artículos académicos dedicados exclusivamente a la caracterización, fabricación o medición de dispositivos cuánticos sin conexión explícita con actividades del desarrollo de software cuántico.
CE8	Desafíos físicos sin impacto en el software cuántico	Artículos académicos que analicen ruido, decoherencia, fidelidad, variabilidad u otros fenómenos físicos sin vincularlos explícitamente con la programación, validación, depuración, optimización, portabilidad o rendimiento del software cuántico.
CE9	Entornos de desarrollo/lenguajes sin Qiskit ni aporte comparativo	Artículos académicos cuyo foco principal sea Cirq, Braket, Q#, tket u otros entornos de desarrollo o lenguajes cuánticos sin incluir comparativas, análisis o aportaciones donde Qiskit desempeñe un papel central.
CE10	Entornos, herramientas o simuladores sin vínculo a ISQ	Artículos académicos que describan entornos, entornos de ejecución, cadenas de herramientas o simuladores sin conectarlos con actividades del desarrollo de software cuántico como depuración, transpilación, portabilidad, reproducibilidad, pruebas u optimización.
CE11	Enfoques puramente matemáticos, físicos o teóricos sin conexión ingenieril	Artículos académicos cuyo objetivo sea exclusivamente describir propiedades abstractas, estructuras matemáticas, fenómenos físicos o análisis teóricos sin implicaciones prácticas o formativas para la ISQ o el desarrollo de software cuántico.
CE12	Introducciones generales del QC sin aporte formativo relevante para ISQ	Artículos académicos cuyo contenido se limite a una introducción general, superficial o divulgativa al QC sin aportar fundamentos conceptuales, técnicos o formativos necesarios para la práctica o formación en ISQ.

Tabla D. Notas metodológicas aplicadas durante el cribado.

Identificador	Criterio	Descripción
NM1	Ambigüedad en contexto de implementación técnica	Dado que muchos estudios sobre ISQ no especifican explícitamente si emplean sistemas híbridos, el modelo de circuitos cuánticos o una tecnología física particular, durante el proceso de cribado no se excluirán artículos académicos por la ausencia de esta información en el título o resumen. Sólo se excluirán aquellos que indiquen de manera clara un paradigma o una tecnología física distinta y no pertinente al objetivo de la revisión. En casos de ambigüedad, los estudios serán retenidos provisionalmente y su clasificación final se determinará durante la lectura completa y la evaluación de calidad.
NM2	Distinción entre entornos de desarrollo/lenguajes y herramientas	Los entornos de desarrollo y lenguajes cuánticos (Qiskit, Cirq, Braket, Q#, tket, entre otros) se considerarán exclusivamente bajo el criterio CI10. Por su parte, CI11 se reserva a herramientas, plataformas y entornos que no constituyen entornos de desarrollo y/o lenguajes. La aparición incidental de un entorno de desarrollo en un estudio orientado a herramientas no implica su clasificación bajo CI10.
NM3	Ambigüedad en terminología técnica	Debido a que en la literatura científica se suelen usar términos de manera indistinta, no se excluirán Artículos académicos que utilicen el término “ <i>quantum circuit</i> ” cuando exista una posibilidad razonable de que el contexto se refiera al modelo computacional basado en circuitos cuánticos como equivalente funcional a un “ <i>quantum program</i> ”. La decisión de exclusión sólo deberá tomarse cuando el título y el resumen evidencien claramente un enfoque puramente formal o matemático sin conexión con actividades del desarrollo de software cuántico.

Consideraciones para clasificación temática:

No se excluye ningún artículo en la sección de cribado por no mencionar el tipo de modelo cuántico ni tecnología física utilizada, o si es una implementación híbrida, a menos que se mencione explícitamente que se centrará exclusivamente en algo diferente a sistemas híbridos basados en el modelo de circuitos cuánticos con la tecnología física de superconductores.

Solo se asigna tópico si hay contribución sustantiva, no por menciones superficiales.

Qiskit como enfoque central se clasifica en T5; comparativas o análisis donde Qiskit participa parcialmente se clasifican en T6.

Sólo se excluye cuando hay evidencia clara de no pertenecer a ISQ o cuando cumple CE.

Tabla E. Criterios de calidad aplicados a los estudios seleccionados.

Identificador	Criterio	Descripción
QA1	Contribución sustantiva	Evalúa si el artículo presenta una contribución clara, sustantiva y directamente relevante para la ISQ, ya sea en metodología, ciclo de vida, validación, pruebas, herramientas, implementación híbrida, desafíos técnicos, entornos de desarrollo o enseñanza.
QA2	Objetivo claro	Evalúa si el artículo declara explícitamente su propósito, pregunta de investigación u objetivo, y si estos son comprensibles, coherentes y verificables a lo largo del documento.
QA3	Definición del contexto cuántico	Evalúa si el estudio especifica claramente el paradigma cuántico utilizado, incluyendo tanto el modelo computacional como la implementación física empleada.
QA4	Adecuación del contexto cuántico	Evalúa si el enfoque del artículo es compatible y aplicable al desarrollo de software cuántico en sistemas basados en el modelo de circuitos cuánticos con implementación física de superconductores, ya sea de forma explícita o inferible tras la lectura completa.
QA5	Metodología	Evalúa si la metodología empleada está claramente descrita, es apropiada para el problema abordado y permite comprender con precisión cómo se obtuvo el conocimiento presentado.
QA6	Evidencia / validación	Evalúa si el artículo presenta evidencia verificable acorde al tipo de contribución (experimental, metodológica o conceptual), como experimentos, simulaciones, casos de estudio, validación conceptual, ejemplos ilustrativos o análisis razonados que respalden sus conclusiones.

QA7	Reproducibilidad	Evalúa si el artículo proporciona suficiente información para replicar o aproximar sus resultados, mediante descripciones técnicas, parámetros experimentales, modelos, pseudocódigo, configuraciones, repositorios, bases de datos, criterios de selección o documentación detallada.
QA8	Delimitación y claridad de la contribución	Evalúa si el artículo define de manera explícita y comprensible su contribución principal (por ejemplo: método, herramienta, modelo, artefacto o taxonomía) y delimita su alcance, supuestos, condiciones de aplicación y limitaciones, incluyendo amenazas a la validez cuando corresponda.
QA9	Calidad formal	Evalúa si el documento presenta redacción clara, estructura formal adecuada, terminología correcta y argumentación coherente desde la perspectiva tanto cuántica como ingenieril.

Anexo F. Matriz de trazabilidad para la elaboración de QSEAK_v0

Por su extensión y densidad tabular, este anexo se entrega como archivo digital independiente. La matriz de trazabilidad relaciona los componentes de QSEAK_v0 con los insumos derivados del análisis bibliométrico, la revisión sistemática de la literatura, la literatura base y la revisión académica inicial. Su propósito es documentar la correspondencia entre las evidencias utilizadas y las decisiones de organización del marco referencial.

Archivo asociado: Anexo_F_Matriz_Trazabilidad_QSEAK_v0.pdf.

Anexo G. QSEAK_v0 en español

Por su extensión, este anexo se entrega como archivo digital independiente. El documento presenta QSEAK_v0 en español, correspondiente a la primera versión del marco de fundamentos referenciales propuesto en esta investigación. Su estructura organiza los conocimientos en áreas vinculadas con fundamentos, conocimientos técnicos especializados y conocimientos transversales y profesionales.

Archivo asociado: Anexo_G_QSEAK_v0_ES.pdf.

Anexo H. QSEAK_v0 en inglés

Por su extensión, este anexo se entrega como archivo digital independiente. El documento presenta la versión en inglés de QSEAK_v0, elaborada para apoyar la comunicación académica, la revisión externa y la posible difusión del marco en contextos internacionales.

Archivo asociado: Anexo_H_QSEAK_v0_EN.pdf.

Anexo I. Evidencia de la revisión académica inicial de QSEAK_v0

Este anexo documenta la evidencia asociada con el proceso de revisión académica inicial de QSEAK_v0. La tabla de seguimiento del contacto con especialistas se presenta en el capítulo de resultados, por lo que no se duplica en este apartado. En este anexo se incluyen los mensajes base utilizados para la invitación inicial y para el envío posterior de la propuesta; la evidencia documental completa se entrega como archivo digital independiente.

El archivo asociado reúne registros documentales de correos vinculados con la invitación a especialistas, el envío de QSEAK_v0, respuestas recibidas y retroalimentación académica. Su propósito es respaldar el proceso reportado en la tesis sin incorporar capturas extensas dentro del documento principal.

Archivo asociado: Anexo_I_Evidencia_Revision_Academica_QSEAK_v0.pdf.

Mensaje base de invitación:

Estimado/a Dr./Dra.:

Espero que se encuentre muy bien.

Mi nombre es Jesús Alfonso Ocampo Mújica, estudiante de maestría en Ciencias de la Computación en el Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET), Campus Cuernavaca.

Mi línea de investigación se ubica en el área de Ingeniería de Software y, dentro de ella, mi tesis se centra en la Ingeniería de Software Cuántico. Actualmente desarrollo una propuesta denominada QSEAK: Quantum Software Engineering Areas of Knowledge, orientada a organizar conocimientos relevantes para la formación de ingenieros de software cuántico. Esta propuesta se sustenta en un análisis bibliométrico y una revisión sistemática de la literatura, y busca contribuir a futuras guías formativas en el área.

Mi directora de tesis es la Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles, doctora en Ciencias de la Computación y profesora-investigadora en el TecNM/CENIDET, Campus Cuernavaca. En conjunto, consideramos que su perfil, trayectoria y experiencia académica resultan especialmente relevantes para valorar la propuesta y aportar observaciones críticas desde una perspectiva especializada.

Por ello, me permito consultarle si estaría dispuesto/a a revisar la propuesta y compartir retroalimentación sobre su contenido y estructura general.

Quedo atento a su respuesta. Le agradecemos mucho el tiempo y la atención que pueda brindar a esta solicitud.

Atentamente,

Ing. Jesús Alfonso Ocampo Mújica

Estudiante de Maestría en Ciencias de la Computación

TecNM/CENIDET, Campus Cuernavaca

Mensaje base tras aceptación de invitación:

Estimado/a Dr./Dra.:

Muchas gracias por su respuesta y por su disposición para revisar la propuesta QSEAK.

Adjunto la versión preliminar de la propuesta QSEAK para revisión académica.

En términos generales, el documento se organiza en cuatro secciones: fundamentos, conocimientos técnicos especializados, conocimientos transversales y profesionales, y un panorama de propuestas educativas y formativas en Ingeniería de Software Cuántico.

Para facilitar la revisión, los tópicos propuestos para la formación de ingenieros de software cuántico se encuentran destacados en negritas al inicio de los apartados correspondientes. Posteriormente, cada sección desarrolla su justificación e incluye diagramas jerárquicos de síntesis destinados a apoyar la comprensión de la estructura propuesta.

La revisión puede realizarse libremente; no obstante, agradeceríamos especialmente comentarios sobre el enfoque y la estructura de la propuesta. En la medida de lo posible, también serían de gran valor observaciones sobre la profundidad del contenido, la secuenciación de los apartados, el alcance, la claridad conceptual, la pertinencia general y cualquier elemento que considere faltante, sobredimensionado o susceptible de reorganización.

Si le resulta posible, agradeceríamos mucho recibir su retroalimentación a más tardar el 3 de junio de 2026. No obstante, comprendemos plenamente sus compromisos de agenda, por lo que cualquier comentario que pudiera compartirnos después de esa fecha también será de gran valor para nuestra investigación.

Puede compartir sus observaciones en el formato que le resulte más conveniente, ya sea mediante comentarios directamente en el documento, un archivo aparte o una respuesta por correo electrónico.

Dado que aún se trata de un documento preliminar y no publicado, agradeceríamos mucho que pudiera utilizarse únicamente para fines de revisión y retroalimentación.

Nuevamente, muchas gracias por su disposición y por el tiempo que pueda dedicar a esta revisión.