

Indicador de Viabilidad para Adopción de Criptografía Cuántica: Análisis de Inversión Irreversible bajo Incerteza Regulatoria en Bancos de Mediano Porte

Andrea Camila*

AMLENTIA.org

13 de octubre de 2025

Resumen

La adopción de criptografía cuántica en el sector bancario representa una decisión estratégica compleja, particularmente para instituciones de mediano porte que enfrentan elevados costos de compliance y significativa incertidumbre regulatoria. Este artículo desarrolla un indicador de viabilidad económica basado en teoría de inversión irreversible que permite determinar el umbral crítico de costos de compliance a partir del cual resulta ventajosa la implementación de sistemas criptográficos cuánticos en transacciones internacionales. Mediante un modelo analítico que incorpora la irreversibilidad del capital invertido, la volatilidad regulatoria y los beneficios esperados en reducción de costos operativos, se deriva una condición de optimalidad que relaciona el valor presente neto ajustado con un factor de prima por espera. Los resultados muestran que el indicador propuesto depende críticamente de tres parámetros: la tasa de reducción esperada en multas regulatorias, el grado de volatilidad en el marco normativo futuro, y el costo de oportunidad del capital comprometido. Se concluye que bancos con volúmenes de transacciones internacionales superiores a determinado umbral y exposición regulatoria elevada obtienen beneficios netos positivos de la adopción temprana, mientras que instituciones más pequeñas deberían postergar la inversión hasta observar mayor claridad normativa.

*Correo electrónico: andrea.camila@AMLENTIA.org. Este trabajo fue desarrollado en colaboración con AMLENTIA.org, organización dedicada a la investigación en economía de tecnologías emergentes.

Palabras clave: Criptografía cuántica, inversión irreversible, incertidumbre regulatoria, costos de compliance, opciones reales

Códigos JEL: G21, G28, O33, D81

1. Introducción

La emergencia de tecnologías cuánticas aplicadas a la criptografía representa uno de los desafíos más significativos para el sector financiero contemporáneo. Los sistemas bancarios, especialmente aquellos dedicados a transacciones internacionales, enfrentan una paradoja estratégica: mientras que la computación cuántica amenaza con vulnerar los protocolos criptográficos tradicionales, la criptografía cuántica ofrece seguridad teóricamente incondicional fundamentada en principios de mecánica cuántica (de Wolf, 2017). Esta dualidad tecnológica genera presiones contradictorias sobre instituciones bancarias que deben evaluar cuándo y cómo migrar hacia nuevos estándares de seguridad informática.

Para bancos de mediano y pequeño porte, la decisión de adoptar criptografía cuántica durante la fase inicial de disponibilidad comercial involucra consideraciones económicas que trascienden el análisis técnico convencional. La inversión en infraestructura cuántica es sustancialmente irreversible debido a la especificidad de los activos involucrados, la ausencia de mercados secundarios desarrollados y los costos hundidos en capacitación de personal especializado. Simultáneamente, el entorno regulatorio internacional exhibe elevada incerteza respecto a estándares futuros de seguridad criptográfica, calendarios de migración obligatoria y potenciales penalizaciones por incumplimiento (Kop, 2023).

El sector financiero ha sido identificado como uno de los primeros en beneficiarse de computación cuántica en el corto, mediano y largo plazo (Herman et al., 2022). Aplicaciones específicas incluyen optimización de portafolio, gestión de riesgo, detección de fraude y procesamiento de transacciones seguras (Orús et al., 2019). Sin embargo, la adopción de estas tecnologías enfrenta desafíos sustanciales relacionados con alto costo inicial, limitaciones técnicas y particularmente incertidumbre regulatoria (Aljaafari, 2023).

Los costos de compliance asociados a transacciones internacionales constituyen una proporción creciente de los gastos operativos bancarios. La criptografía cuántica promete reducir algunos componentes de estos costos mediante seguridad mejorada que disminuye probabilidades de fraude y facilita auditorías regulatorias (Islam et al., 2024). Sin embargo, la inversión inicial requerida y la incertidumbre sobre reconocimiento regulatorio de estos sistemas crean un problema de timing óptimo

que no puede resolverse mediante análisis de valor presente neto tradicional.

Este artículo desarrolla un modelo analítico que aborda el problema de decisión de inversión en criptografía cuántica como un ejercicio de opción real bajo incertidumbre regulatoria. El objetivo central es derivar un indicador de viabilidad que determine el umbral crítico de costos de compliance a partir del cual resulta económicamente ventajoso adoptar tecnología criptográfica cuántica, considerando explícitamente la irreversibilidad del capital comprometido y la posibilidad de esperar para obtener información adicional sobre el ambiente regulatorio futuro. El análisis se concentra específicamente en bancos de mediano porte que operan transacciones internacionales, segmento que enfrenta restricciones presupuestarias más severas que grandes instituciones sistémicas pero mantiene exposición regulatoria suficiente para justificar inversiones en seguridad avanzada.

La contribución principal del trabajo consiste en formalizar matemáticamente el trade-off entre beneficios de adopción temprana y valor de la opción de espera en un contexto donde tanto costos de compliance como claridad regulatoria evolucionan estocásticamente. Se demuestra que el indicador óptimo no depende únicamente del valor presente neto esperado, sino que debe incorporar una prima por espera que refleja el valor informacional de postergar la decisión irreversible. Los resultados permiten a instituciones bancarias cuantificar el punto de indiferencia entre adopción inmediata y estrategia de espera, facilitando decisiones estratégicas fundamentadas en parámetros observables del mercado y ambiente regulatorio.

2. Revisión de Literatura y Fundamentos Teóricos

La literatura sobre adopción de tecnologías en instituciones financieras ha evolucionado considerablemente en años recientes. La computación cuántica representa una tecnología potencialmente disruptiva con impacto profundo en múltiples industrias, incluyendo el sector bancario (Saltan and Hyrynsalmi, 2022). Estudios recientes documentan que esta tecnología ofrece mejoras significativas en performance, eficiencia y seguridad, con capacidad de alterar fundamentalmente operaciones empresariales en sectores bancario, salud y logística (Gupta and Sharma, 2023).

En el contexto financiero específicamente, investigaciones identifican cuatro verticales industriales principales donde computación cuántica presenta aplicaciones comerciales en corto plazo: ciberseguridad, materiales y farmacéuticos, bancos y finanzas, y manufactura avanzada (Bova et al., 2021). Para el sector bancario, casos de uso documentados incluyen previsión de crashes financieros, optimización dinámica

de portafolio y detección de oportunidades de arbitraje (Mugel et al., 2020).

Sin embargo, la adopción de tecnologías cuánticas enfrenta desafíos sustanciales. Análisis de implementación práctica identifican seis áreas críticas: escalabilidad limitada, desafíos regulatorios, alto costo inicial, disponibilidad limitada de recursos cuánticos, necesidades de educación y entrenamiento, y cuestiones de seguridad (Aljaafari, 2023). Estos obstáculos son particularmente relevantes para instituciones de mediano y pequeño porte que carecen de economías de escala de grandes bancos sistémicos.

El tratamiento formal de incertidumbre regulatoria en modelos de inversión constituye un desarrollo importante en literatura económica. Trabajos recientes enfatizan que preparación para la era cuántica requiere atención específica a cinco dimensiones: desmistificación de percepciones irrealistas, contextualización a través de ambiente socio-técnico facilitador, engagement de stakeholders y sociedad civil, regulación con frameworks flexibles, y posicionamiento via diplomacia cuántica internacional (de Jong, 2022). Esta perspectiva multidimensional reconoce que adopción tecnológica no depende únicamente de factores técnicos o económicos, sino también de desarrollo institucional apropiado.

La emergencia de tecnologías cuánticas ha motivado análisis sobre sus implicaciones éticas, legales, sociales y de política pública, área denominada Quantum-ELSPI (Kop, 2023). Este marco analítico enfatiza necesidad de abordaje interdisciplinario para entender cómo tecnologías cuánticas serán desarrolladas y utilizadas en sociedad. Aplicaciones específicas abarcan desde computación y comunicación hasta criptografía y sensoriamiento, cada una con implicaciones distintas para diferentes sectores industriales.

Perspectivas sobre impacto social de computadores cuánticos identifican tres áreas específicas de transformación: capacidad de quebrar sistemas criptográficos actuales, potencial para resolver problemas complejos de optimización, y habilidades para simular sistemas cuánticos con aplicaciones en química y física (de Wolf, 2017). En contexto bancario, primera área presenta simultáneamente amenaza y oportunidad: mientras computación cuántica puede vulnerar protocolos de seguridad existentes, criptografía cuántica ofrece soluciones teóricamente inquebrantables.

Estudios sobre implicaciones societales enfatizan que transformaciones económicas incluyen adaptación de industrias y mercados de trabajo, además de necesidad de cooperación global en políticas y sistemas criptográficos resistentes a ataques cuánticos (Wheatley Research Consultancy, 2024). Esta dimensión internacional es particularmente relevante para bancos que operan transacciones transfronterizas, donde fragmentación regulatoria puede incrementar significativamente costos

de compliance.

Análisis de barreras a adopción empresarial destacan que, además de limitaciones técnicas, costo y accesibilidad representan desafíos principales (Mudhol, 2024). Para instituciones financieras, decisión de invertir en infraestructura cuántica debe considerar no solamente beneficios potenciales en procesamiento de datos y optimización, sino también requisitos de integración con sistemas existentes y disponibilidad de personal calificado.

Literatura sobre desarrollo de capacidades tecnológicas en contextos de recursos limitados sugiere que inversiones públicas y privadas deben coordinarse estratégicamente (López-Claros, 2011). En sector financiero, esto implica que políticas regulatorias pueden facilitar o inhibir adopción de tecnologías avanzadas dependiendo de claridad normativa, incentivos fiscales y programas de apoyo técnico disponibles para instituciones de menor tamaño.

El presente trabajo contribuye a esta literatura en desarrollo al formalizar el problema de decisión de adopción de criptografía cuántica mediante modelo económico que incorpora explícitamente irreversibilidad de inversión y incertidumbre regulatoria. Se diferencia de análisis previos al derivar condiciones cuantitativas específicas que permiten a instituciones bancarias determinar timing óptimo de inversión basado en parámetros observables.

3. Modelo Teórico de Inversión en Criptografía Cuántica

Consideremos un banco de mediano porte que opera transacciones internacionales y enfrenta la decisión de adoptar tecnología de criptografía cuántica para protección de comunicaciones sensibles. La institución puede invertir en el momento presente o diferir la decisión para obtener información adicional sobre desarrollo regulatorio futuro. Formalizamos esta situación mediante un modelo de inversión irreversible en tiempo continuo.

3.1. Estructura del Problema

Sea I el costo de inversión inicial en infraestructura de criptografía cuántica, que incluye adquisición de equipamiento, implementación de protocolos, integración con sistemas existentes y capacitación de personal. Este costo es sustancialmente irreversible debido a especificidad de activos y ausencia de mercados secundarios desarrollados, característica documentada en literatura sobre adopción de tecnologías

emergentes (Bova et al., 2021). Denotamos por $\theta \in [0, 1]$ el parámetro de irreversibilidad, donde $\theta = 0$ implica reversibilidad completa y $\theta = 1$ indica que ningún componente de la inversión puede recuperarse.

Los costos de compliance asociados a transacciones internacionales evolucionan estocásticamente según el proceso:

$$dC_t = \mu C_t dt + \sigma C_t dW_t \quad (1)$$

donde C_t representa el flujo de costos de compliance en el momento t , μ es la tasa de deriva que captura tendencia regulatoria esperada, σ mide volatilidad en cambios regulatorios, y W_t denota un movimiento Browniano estándar.

La adopción de criptografía cuántica genera reducción en costos de compliance mediante dos canales principales. Primero, seguridad mejorada disminuye probabilidad de eventos de fraude que resultan en multas regulatorias. Segundo, capacidades de auditoría facilitadas por protocolos cuánticos reducen gastos en monitoreo y reporte (Islam et al., 2024). Modelamos este beneficio mediante un factor de reducción $\alpha \in (0, 1)$ tal que costos post-adopción equivalen a $(1 - \alpha)C_t$. El beneficio neto por unidad de tiempo de operar con criptografía cuántica es entonces αC_t .

Sin embargo, existe incertidumbre respecto al reconocimiento regulatorio futuro de sistemas criptográficos cuánticos. Esta dimensión de incerteza ha sido identificada como uno de los principales desafíos para adopción empresarial (Aljaafari, 2023). Definimos λ como la tasa de arribo de resolución regulatoria, donde con probabilidad p los reguladores establecerán estándares que favorecen adopción cuántica, y con probabilidad $1 - p$ mantendrán neutralidad tecnológica.

3.2. Valor de la Opción de Inversión

El valor de la opción de invertir en criptografía cuántica en ausencia de ejercicio inmediato satisface la ecuación fundamental:

$$rF(C) = \lambda \mathbb{E}[F(C)|\text{resolución}] + \frac{1}{2} \sigma^2 C^2 F''(C) + \mu C F'(C) \quad (2)$$

donde r es la tasa de descuento apropiada y $F(C)$ representa el valor de la opción como función del nivel de costos de compliance.

La condición de frontera libre requiere que en el umbral óptimo de inversión C^* ,

se satisfagan simultáneamente value matching y smooth pasting:

$$F(C^*) = V(C^*) - I \quad (3)$$

$$F'(C^*) = V'(C^*) \quad (4)$$

donde $V(C)$ denota el valor presente de operar con criptografía cuántica.

Para derivar $V(C)$, consideramos que tras adopción, el banco recibe flujo perpetuo αC_t descontado a tasa $r - \mu$. El valor presente es:

$$V(C) = \frac{\alpha C}{r - \mu} \quad (5)$$

bajo la condición de transversalidad $r > \mu$ que asegura convergencia.

3.3. Derivación del Umbral Óptimo

Proponemos solución de la forma $F(C) = AC^\beta$ donde β es la raíz positiva de la ecuación característica:

$$\frac{1}{2}\sigma^2\beta(\beta - 1) + \mu\beta - (r + \lambda) = 0 \quad (6)$$

Esta ecuación cuadrática tiene raíces:

$$\beta = \frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2}\right)^2 + \frac{2(r + \lambda)}{\sigma^2}} \quad (7)$$

Seleccionamos la raíz positiva $\beta > 1$ que satisface condiciones de frontera apropiadas. Aplicando las condiciones de value matching y smooth pasting y resolviendo el sistema resultante, obtenemos:

Proposición 1 (Umbral de Inversión Óptima). *El umbral crítico de costos de compliance que justifica inversión inmediata en criptografía cuántica está dado por:*

$$C^* = \frac{\beta}{\beta - 1} \cdot \frac{(r - \mu)I}{\alpha} \quad (8)$$

donde $\beta > 1$ es la raíz positiva de la ecuación característica. La inversión es óptima si y solo si $C \geq C^*$.

El factor $\beta/(\beta - 1) > 1$ representa la prima por espera que surge de la irreversibilidad y valor de flexibilidad. Un análisis estándar de valor presente neto sugeriría invertir cuando $C \geq (r - \mu)I/\alpha$, pero la presencia de incertidumbre y opción de diferir eleva el umbral por un múltiplo endógeno.

3.4. Indicador de Viabilidad Económica

Definimos el Indicador de Viabilidad Cuántica (IVC) como el ratio:

$$\text{IVC} = \frac{C}{C^*} = \frac{C(\beta - 1)\alpha}{\beta(r - \mu)I} \quad (9)$$

Definición 1 (Criterio de Decisión). *La adopción de criptografía cuántica es económicamente viable si y solo si $\text{IVC} \geq 1$. Valores $\text{IVC} < 1$ indican que el banco debería postergar la inversión hasta que condiciones de mercado o regulatorias mejoren.*

Este indicador permite evaluación práctica sin resolver completamente el problema de optimización dinámica. Instituciones pueden calcular el IVC usando datos observables: costos de compliance actuales C , inversión requerida I , tasa de reducción esperada α , y parámetros de mercado r , μ , σ .

3.5. Efectos de Incertidumbre Regulatoria

La incorporación de incerteza regulatoria mediante la tasa de arribo λ modifica el valor de β . Mayores niveles de incerteza (menor λ) incrementan la raíz característica, elevando así el umbral crítico.

Lema 1 (Monotonía en Incerteza). *El umbral óptimo C^* es creciente en el grado de incerteza regulatoria, medido por $1/\lambda$. Mayor claridad regulatoria (mayor λ) reduce valor de espera y facilita adopción temprana.*

Este resultado tiene implicaciones importantes para política pública. Esfuerzos de autoridades regulatorias para reducir incerteza mediante señalización clara sobre trayectorias futuras de estándares criptográficos pueden facilitar inversión privada sin necesidad de subsidios directos (de Jong, 2022).

4. Análisis de Sensibilidad y Propiedades del Indicador

Examinamos cómo parámetros fundamentales del modelo afectan el umbral de adopción óptima y el indicador de viabilidad. Este análisis proporciona intuición económica sobre drivers principales de decisiones de inversión en criptografía cuántica.

El umbral crítico es linealmente creciente en el costo de inversión I . Instituciones que pueden negociar reducciones en costos de implementación mediante economías

de escala o alianzas estratégicas enfrentarán barreras menores a adopción. Esta relación sugiere que desarrollo de mercados más competitivos para provisión de infraestructura cuántica podría acelerar difusión tecnológica. La magnitud del efecto depende de la prima por espera $\beta/(\beta - 1)$, que a su vez refleja grado de volatilidad regulatoria y irreversibilidad de inversión.

El parámetro α captura la efectividad de criptografía cuántica en reducir costos de compliance. Mayores valores de α disminuyen el umbral crítico, facilitando justificación económica de inversión. La elasticidad del umbral respecto a eficiencia tecnológica es unitaria, implicando que mejoras proporcionales en eficiencia traducen en reducciones proporcionales en el umbral requerido. Instituciones que operan en jurisdicciones donde criptografía cuántica ofrece mayores ventajas regulatorias enfrentarán incentivos más fuertes para adopción temprana.

Cabe destacar que α no es puramente un parámetro tecnológico, sino que depende también de reconocimiento regulatorio. Estudios sobre preparación societaria para tecnologías cuánticas enfatizan importancia de frameworks regulatorios flexibles que reconozcan beneficios de nuevos protocolos criptográficos (Kop, 2023). En jurisdicciones donde autoridades competentes han establecido marcos favorables, el valor efectivo de α será superior, acelerando proceso de adopción.

La volatilidad σ ejerce efecto primordialmente mediante el parámetro β . Mayor volatilidad aumenta valor de opción de espera, elevando el umbral crítico. Este resultado sugiere que esfuerzos regulatorios para reducir incerteza sobre estándares futuros de criptografía facilitarían inversión privada. Instituciones que operan en múltiples jurisdicciones con marcos regulatorios divergentes enfrentan volatilidad efectiva mayor, incrementando sus umbrales de adopción. Coordinación internacional en estándares criptográficos podría generar externalidades positivas al reducir esta componente de incerteza (Wheatley Research Consultancy, 2024).

La tasa de descuento r refleja costo de oportunidad del capital y prima de riesgo asociada a inversiones en tecnología emergente. Mayores valores de r elevan el umbral crítico mediante dos canales: reducen valor presente de beneficios futuros y aumentan el costo de oportunidad de ejercer la opción de inversión. Bancos con acceso a financiamiento de menor costo o menor percepción de riesgo tecnológico adoptarán más tempranamente.

La tasa de deriva μ captura tendencia esperada en evolución de costos de compliance. Si reguladores señalan endurecimiento futuro de requisitos, el denominador $r - \mu$ disminuye, reduciendo el umbral y acelerando adopción. Comunicación clara de autoridades sobre trayectoria regulatoria reduce incerteza tipo σ pero puede simultáneamente modificar expectativas de deriva μ , generando efectos complejos

sobre timing óptimo de inversión.

5. **Discusión: Implicaciones para Estrategia Bancaria y Política Regulatoria**

Los resultados del modelo tienen consecuencias significativas tanto para decisiones estratégicas de instituciones financieras como para diseño de política regulatoria en materia de ciberseguridad y tecnologías cuánticas.

El indicador de viabilidad desarrollado proporciona herramienta práctica para evaluación de inversiones en criptografía cuántica. Bancos de mediano porte deben considerar no solamente costos y beneficios directos, sino también el valor de flexibilidad estratégica. La estructura del modelo sugiere que instituciones deberían monitorear activamente tres dimensiones: evolución de costos de compliance observados, señales sobre trayectoria regulatoria futura, y desarrollo de mercados para tecnología cuántica que podría reducir costos de inversión.

Literatura sobre aplicaciones comerciales de computación cuántica documenta que, además de beneficios en ciberseguridad, estas tecnologías ofrecen ventajas en optimización de portafolio y gestión de riesgo (Herman et al., 2022). Para bancos medianos, decisión de invertir debería considerar complementariedades entre diferentes aplicaciones cuánticas. Institución que adopta criptografía cuántica desarrolla simultáneamente capacidades organizacionales que facilitan futura adopción de algoritmos cuánticos para otras funciones bancarias.

La irreversibilidad de la inversión implica que errores en timing tienen consecuencias asimétricas. Adopción prematura resulta en costos hundidos si tecnología no alcanza madurez esperada, mientras que adopción tardía genera costos de oportunidad mediante exposición continuada a riesgos de seguridad. Evidencia sobre estado actual de tecnología sugiere que computadores cuánticos aún no alcanzan nivel de maduración para producción en problemas industriales de larga escala (Scholten et al., 2024), lo que justifica cautela en inversiones de bancos pequeños con recursos limitados.

Desde perspectiva de política pública, los resultados sugieren que reguladores enfrentan tensión entre promover adopción temprana de tecnologías de seguridad avanzada y preservar flexibilidad para ajustes normativos futuros. El modelo identifica tres instrumentos de política que autoridades pueden emplear: subsidios directos a costos de inversión, reconocimiento formal de beneficios de compliance asociados a criptografía cuántica, y señalización clara sobre trayectoria regulatoria futura.

Análisis de implicaciones societales de tecnologías cuánticas enfatiza necesidad

de abordaje multidimensional que incluya desmistificación de percepciones, contextualización socio-técnica, engagement de stakeholders, regulación flexible y coordinación internacional (de Jong, 2022). Para criptografía cuántica específicamente, esto implica que políticas efectivas deben ir más allá de aspectos puramente técnicos, abordando también desarrollo de fuerza laboral calificada, estándares de interoperabilidad y marcos legales apropiados.

Reconocimiento regulatorio de beneficios cuánticos puede implementarse mediante ajustes en requisitos de capital, reducciones en frecuencia de auditorías, o tratamiento preferencial en evaluaciones de riesgo operacional. Este enfoque alinea incentivos privados con objetivos de política sin transferencias fiscales directas. Experiencias en otros sectores sugieren que políticas basadas en performance son más efectivas que mandatos tecnológicos específicos para promover innovación (Zilberman et al., 2018).

Reducción de incerteza regulatoria mediante comunicación transparente sobre planes de actualización de estándares criptográficos representa instrumento de menor costo. Publicación de roadmaps tecnológicos y procesos de consulta pública amplios pueden reducir significativamente componentes de volatilidad. Literatura sobre impacto social de tecnologías cuánticas subraya importancia de involucrar stakeholders diversos en diseño de frameworks regulatorios (Vermaas, 2017).

El análisis también revela que heterogeneidad entre instituciones implica que política óptima probablemente requiere diferenciación. Bancos grandes con volúmenes de transacciones suficientes superarán umbrales de viabilidad independientemente de intervención regulatoria, mientras que instituciones pequeñas podrían necesitar apoyo específico. Criterios de elegibilidad basados en tamaño, exposición internacional y capacidades técnicas previas permitirían focalizar recursos públicos eficientemente.

Coordinación internacional emerge como dimensión crítica dado que transacciones bancarias transfronterizas requieren interoperabilidad de sistemas de seguridad. Fragmentación regulatoria aumenta volatilidad efectiva y puede inhibir adopción incluso cuando beneficios técnicos son claros (Wheatley Research Consultancy, 2024). Esfuerzos multilaterales para armonización de estándares cuánticos generarían beneficios que exceden suma de acciones unilaterales.

6. Conclusiones

Este artículo desarrolló un modelo analítico para evaluación de inversiones en criptografía cuántica por parte de bancos de mediano porte que operan transac-

ciones internacionales. Mediante aplicación de teoría de inversión irreversible bajo incerteza regulatoria, derivamos un indicador de viabilidad económica que determina cuándo resulta óptimo adoptar tecnología criptográfica cuántica considerando trade-offs entre beneficios de reducción en costos de compliance y valor de flexibilidad estratégica.

El indicador propuesto, función de costos de compliance actuales, inversión requerida, eficiencia tecnológica esperada y parámetros de incerteza, proporciona criterio decisorio práctico que trasciende análisis estándares de valor presente neto. La existencia de una prima por espera endógena, derivada de irreversibilidad y volatilidad regulatoria, implica que umbrales de adopción óptima superan significativamente aquellos sugeridos por valoración tradicional.

Los resultados demuestran que tres factores determinan críticamente decisiones de inversión: magnitud de costos de compliance asociados a transacciones internacionales, grado de incerteza sobre marcos regulatorios futuros, y eficiencia esperada de criptografía cuántica en reducir exposición a multas y gastos de monitoreo. Instituciones con elevados volúmenes de transacciones, operación en jurisdicciones con señalización clara sobre estándares futuros, y acceso a tecnología cuántica de costo moderado exhiben mayores probabilidades de adopción temprana.

Desde perspectiva de política regulatoria, el análisis sugiere que reducción de incerteza normativa mediante comunicación transparente sobre trayectorias de actualización de estándares criptográficos puede facilitar inversión privada sin requerir subsidios directos. Reconocimiento formal de beneficios de compliance asociados a protocolos cuánticos, implementado mediante ajustes en requisitos de capital o tratamiento preferencial en evaluaciones de riesgo, alinea incentivos privados con objetivos de seguridad sistémica.

La heterogeneidad entre instituciones implica que políticas de promoción de tecnologías cuánticas deberían incorporar diferenciación basada en tamaño, exposición internacional y capacidades técnicas previas. Bancos grandes superarán umbrales de viabilidad mediante dinámicas de mercado, mientras que instituciones medianas y pequeñas podrían beneficiarse de programas focalizados de apoyo técnico y financiero.

Extensiones futuras del modelo podrían incorporar dinámicas de aprendizaje organizacional, competencia estratégica entre instituciones, y endogeneización de resolución regulatoria en función de masa crítica de adopción en la industria. Análisis empíricos calibrando parámetros del modelo con datos de costos de compliance observados y encuestas sobre percepciones de incerteza regulatoria permitirían cuantificar magnitudes específicas de umbrales óptimos y primas por espera.

Referencias

- Aljaafari, M. (2023). Quantum computing for social business optimization: a practitioner's perspective. *Soft Computing*.
- Bova, F., Goldfarb, A., and Melko, R. G. (2021). Commercial applications of quantum computing. *EPJ Quantum Technology*, 8(1).
- de Jong, E. (2022). Own the unknown: An anticipatory approach to prepare society for the quantum age. *Digital Society*, 1(2).
- de Wolf, R. (2017). The potential impact of quantum computers on society. *Ethics and Information Technology*, 19(4):271–276.
- Gupta, S. and Sharma, V. (2023). Effects of quantum computing on businesses. In *2023 4th International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM)*, pages 1–6. IEEE.
- Herman, D., Googin, C., Liu, X., Galda, A., Safro, I., Sun, Y., Pistoia, M., and Alexeev, Y. (2022). A survey of quantum computing for finance.
- Islam, M. A., Hasan, S. K., Priya, S. A., Asha, A. I., and Islam, N. M. (2024). The impact of quantum computing on financial risk management: A business perspective. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 6(5).
- Kop, M. (2023). Quantum-elspi: A novel field of research. *Digital Society*, 2(2).
- López-Claros, A. (2011). *The Innovation for Development Report 2010–2011*. Palgrave Macmillan UK.
- Mudhol, A. C. (2024). Integrating quantum computing into business analytics: Opportunities and challenges. *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*, pages 2451–2463.
- Mugel, S., Lizaso, E., and Orús, R. (2020). Use cases of quantum optimization for finance.
- Orús, R., Mugel, S., and Lizaso, E. (2019). Quantum computing for finance: Overview and prospects. *Reviews in Physics*, 4:100028.
- Saltan, A. and Hyrynsalmi, S. (2022). The business perspective of quantum computing: An overview. In *ICSOB Companion*.

- Scholten, T. L., Williams, C. J., Moody, D., Mosca, M., Hurley, W., Zeng, W. J., Troyer, M., and Gambetta, J. (2024). Assessing the benefits and risks of quantum computers.
- Vermaas, P. E. (2017). The societal impact of the emerging quantum technologies: a renewed urgency to make quantum theory understandable. *Ethics and Information Technology*, 19(4):241–246.
- Wheatley Research Consultancy (2024). Quantum shifts: The societal implications of quantum computing on security, privacy, and the economy.
- Zilberman, D., Gordon, B., Hochman, G., and Wesseler, J. (2018). Economics of sustainable development and the bioeconomy. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 40(1):22–37.