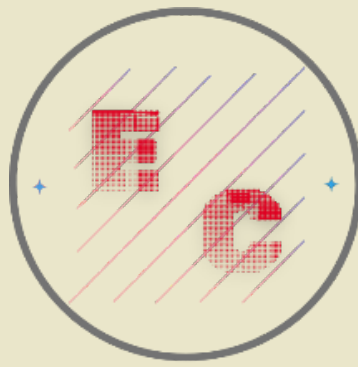




REVISTA MULTIDISCIPLINAR EPISTEMOLOGÍA DE LAS CIENCIAS

Volumen 3, Número 3
Julio-Septiembre 2026

Edición Trimestral

CROSSREF PREFIX DOI: 10.71112

ISSN: 3061-7812, www.omniscens.com

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 3, Número 3
julio-septiembre 2026

Publicación trimestral
Hecho en México

La Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias acepta publicaciones de cualquier área del conocimiento, promoviendo una plataforma inclusiva para la discusión y análisis de los fundamentos epistemológicos en diversas disciplinas. La revista invita a investigadores y profesionales de campos como las ciencias naturales, sociales, humanísticas, tecnológicas y de la salud, entre otros, a contribuir con artículos originales, revisiones, estudios de caso y ensayos teóricos. Con su enfoque multidisciplinario, busca fomentar el diálogo y la reflexión sobre las metodologías, teorías y prácticas que sustentan el avance del conocimiento científico en todas las áreas.

Contacto principal: admin@omniscens.com

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación

Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido de la publicación sin previa autorización de la Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.



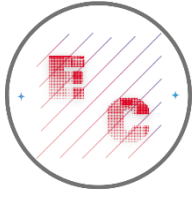
Copyright © 2026: Los autores



9773061781003

Cintillo legal

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias Vol. 3, Núm. 3, julio-septiembre 2026, es una publicación trimestral editada por el Dr. Moises Ake Uc, C. 51 #221 x 16B , Las Brisas, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97144 , Tel. 9993556027, Web: <https://www.omniscens.com>, admin@omniscens.com, Editor responsable: Dr. Moises Ake Uc. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-121717181700-102, ISSN: 3061-7812, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Dr. Moises Ake Uc, fecha de última modificación, 1 julio 2026.



Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 3, Número 3, 2026, julio-septiembre

DOI: <https://doi.org/10.71112/nankke17>

**PROCESAMIENTO MORFOLÓGICO DE IMÁGENES BINARIAS MEDIANTE
CIRCUITOS CUÁNTICOS: UNA IMPLEMENTACIÓN EN QISKIT**

**MORPHOLOGICAL PROCESSING OF BINARY IMAGES USING QUANTUM
CIRCUITS: A QISKIT IMPLEMENTATION**

Emily Andrea Franco Escudero

Leonardi Hernández Sánchez

Roberto Arceo Reyes

México

Procesamiento morfológico de imágenes binarias mediante circuitos cuánticos: una implementación en qiskit

Morphological processing of binary images using quantum circuits: a qiskit implementation

Emily Andrea Franco Escudero^{a,+}

eaf.escudero@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0000-9678-6498>

Leonardi Hernández Sánchez^b

leonardi1469@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-2648-4353>

Roberto Arceo Reyes^a

roberto.arceo@unach.com

<https://orcid.org/0000-0002-2558-2882>

*Autor de correspondencia: leonardi1469@gmail.com, ^aBenemérita Universidad Autónoma de Chiapas, ^bInstituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, México

RESUMEN

La erosión y la dilatación son operaciones fundamentales de la morfología matemática para modificar la forma de objetos en imágenes binarias. En este trabajo se evaluó su implementación mediante un circuito cuántico simulado en Qiskit, utilizando como referencia el procesamiento clásico realizado con OpenCV. Se empleó la imagen Baboon en resoluciones de 102×102, 128×128 y 256×256 píxeles, con 16, 160, 1600, 16000 y 160000 ejecuciones del circuito. La comparación incluyó una revisión visual, el cálculo de MSE, PSNR y SSIM, y el registro de los tiempos de simulación. El circuito reprodujo el efecto esperado de ambas operaciones, aunque las imágenes no coincidieron completamente con las obtenidas en OpenCV. La dilatación mostró una similitud más estable que la erosión. Además, aumentar las

ejecuciones no mejoró monotónicamente las métricas y sí incrementó considerablemente el tiempo de cómputo.

Palabras clave: procesamiento cuántico de imágenes; morfología matemática; erosión; dilatación; Qiskit; OpenCV.

ABSTRACT

Erosion and dilation are fundamental mathematical morphology operations used to modify the shape of objects in binary images. This study evaluated their implementation through a quantum circuit simulated in Qiskit, using classical processing in OpenCV as the reference. The Baboon image was analyzed at resolutions of 102×102 , 128×128 , and 256×256 pixels, with 16, 160, 1600, 16000, and 160000 circuit executions. The comparison included visual inspection, calculation of MSE, PSNR, and SSIM, and measurement of simulation times. The circuit reproduced the expected effect of both operations, although the reconstructed images did not fully match those obtained with OpenCV. Dilation showed more stable similarity than erosion. In addition, increasing the number of executions did not improve the metrics monotonically and substantially increased computation time.

Keywords: quantum image processing; mathematical morphology; erosion; dilation; Qiskit; OpenCV.

Recibido: 8 agosto 2026 | Aceptado: 26 agosto 2026 | Publicado: 27 agosto 2026

INTRODUCCIÓN

La morfología matemática analiza la forma de los objetos a partir de operaciones definidas sobre conjuntos de píxeles y un elemento estructurante. Entre sus transformaciones más conocidas se encuentran la erosión y la dilatación. La primera contrae las regiones del primer plano y puede suprimir componentes pequeños; la segunda expande esas regiones y favorece la conexión de zonas próximas. Aunque ambas operaciones parten de reglas locales sencillas, su efecto depende de la geometría de la imagen y del elemento estructurante utilizado (González & Woods, 2018; Haralick et al., 1987; Vincent, 1993).

En el enfoque clásico, la imagen se representa como una matriz de píxeles, la cual se convierte a escala de grises o binario. Para esto se fija un umbral que permite asignar a cada píxel uno de dos valores posibles, 0 o 1. A partir de esta representación se analizan las vecindades definidas alrededor de cada posición y se aplican las transformaciones. OpenCV incluye herramientas específicas para realizar este proceso de manera optimizada, por lo que resulta útil como referencia al evaluar otros métodos de procesamiento (Otsu, 1979; Pulli et al., 2012).

En el enfoque de la computación cuántica el tratamiento de la información es diferente. Su unidad básica es el qubit y las operaciones se realizan mediante compuertas reversibles, y los resultados se obtienen a través de mediciones probabilísticas. El desarrollo del campo comenzó con trabajos sobre simulación de sistemas físicos y modelos universales de cómputo cuántico, y posteriormente dio lugar a algoritmos como los propuestos por Shor y Grover. En la actualidad, herramientas como Qiskit permiten implementar y simular circuitos cuánticos desde entornos de programación convencionales, lo que facilita su estudio sin disponer necesariamente de un dispositivo cuántico físico (Deutsch, 1985; Feynman, 1982; Grover, 1996; Preskill, 2018; Qiskit Community, 2019; Shor, 1994).

Una de las líneas que se ha desarrollado a partir de estos avances es el procesamiento cuántico de imágenes. Las investigaciones en esta área han planteado distintas maneras de codificar en estados cuánticos la posición de los píxeles, sus intensidades y, en algunos casos, la información de color. Sobre estas representaciones se han propuesto procedimientos para modificar el tamaño de las imágenes, comprimirlas o aplicar transformaciones específicas (Haque et al., 2023; Jiang & Wang, 2015; Le et al., 2011; Nasr et al., 2021; Wang et al., 2022; Yan et al., 2014, 2016; Yan & Venegas-Andraca, 2025; Zhang et al., 2013). También se han estudiado aplicaciones más concretas, como la segmentación, la detección de bordes y las operaciones morfológicas. Entre ellas se encuentran diversas propuestas de circuitos para erosión y dilatación, así como implementaciones diseñadas para las limitaciones de los sistemas cuánticos de la era NISQ (Caraiman & Manta, 2014; Geng et al., 2022; Li et al., 2019; Liu et al., 2022; Ma et al., 2020; Yao et al., 2017; Yuan et al., 2015, 2016). Estas investigaciones muestran que es posible trasladar operaciones de vecindad al modelo de circuitos, aunque su costo y su comportamiento dependen de la representación elegida y del entorno de ejecución (Leymann & Barzen, 2020).

Una imagen visualmente reconocible no basta para comparar la cercanía entre dos procedimientos. En una simulación basada en mediciones, el número de ejecuciones o shots determina cuántas veces se repite el circuito para estimar sus resultados. Además, al aumentar la resolución crece el número de posiciones que deben procesarse. Por ello, en este estudio se consideraron tanto la calidad de las imágenes reconstruidas como el tiempo necesario para obtenerlas.

La comparación cuantitativa se realizó con tres métricas que describen aspectos diferentes del error. El MSE mide la diferencia promedio entre los valores de los píxeles; el PSNR expresa esa diferencia en relación con el rango máximo de intensidad; y el SSIM compara la estructura, el contraste y la luminancia de las imágenes. Su uso conjunto evita

basar la evaluación en un único indicador (Horé & Ziou, 2010; Huynh-Thu & Ghanbari, 2008; Wang & Bovik, 2002; Wang et al., 2004).

A partir de estas consideraciones, comparamos las operaciones de erosión y dilatación obtenidas con OpenCV y con un circuito cuántico simulado en Qiskit. Se trabajó con la imagen binaria Baboon en resoluciones de 102×102 , 128×128 y 256×256 píxeles, y con cinco cantidades de ejecuciones. El objetivo fue identificar la similitud entre las salidas de ambos procedimientos y examinar cómo cambia la reconstrucción y el tiempo de simulación al variar la resolución y el número de *shots*. Es importante señalar que el análisis se plantea como una evaluación funcional del circuito, no como una demostración de ventaja cuántica.

Marco teórico

Imágenes binarias y morfología matemática

Una imagen digital puede representarse como una matriz cuyos elementos corresponden a los valores de intensidad de sus píxeles, cada píxel solo puede tomar uno de dos valores: 0 o 1, el valor 0 suele asignarse al fondo, mientras que el valor 1 corresponde a los objetos o contornos que se desean analizar. Al reducir la imagen a estas dos posibilidades, resulta más sencillo estudiar cambios en la forma, el tamaño y la conexión entre ellas. (Gonzalez & Woods, 2018; Haralick et al., 1987).

La morfología matemática se encarga de analizar esas características geométricas. Para ello emplea un elemento estructurante, es decir, una pequeña matriz binaria que se desplaza sobre la imagen y define qué píxeles vecinos se toman en cuenta en cada posición. El resultado de la operación depende de las dimensiones y de la forma elegida para este elemento.

Qubits y base computacional

La unidad básica de información es el qubit, el estado de un qubit puede escribirse como una combinación lineal de los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$:

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$

donde α y β son amplitudes complejas que satisfacen, $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$

Los siguientes estados forman la base computacional:

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Al medir un qubit en esta base, se obtiene 0 con probabilidad $|\alpha|^2$ o 1 con probabilidad $|\beta|^2$ (Nielsen & Chuang, 2010).

En este trabajo, los valores de los píxeles de la imagen binaria se introducen mediante estados de la base computacional respectivamente. Un píxel con valor 0 se asocia con $|0\rangle$, mientras que un píxel con valor 1 se prepara aplicando una compuerta X al qubit correspondiente. De esta forma, los datos clásicos de la imagen se incorporan al circuito antes de ejecutar la secuencia de compuertas y las mediciones (Qiskit Community, 2019).

Compuertas utilizadas en el circuito

La compuerta X, también denominada compuerta de Pauli X, intercambia los estados de la base computacional:

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad X|0\rangle = |1\rangle, \quad X|1\rangle = |0\rangle$$

La compuerta Hadamard transforma un estado de la base computacional en una superposición:

$$H|0\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$H|1\rangle = \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

Esta compuerta permite que un qubit participe en la evolución del circuito mediante una combinación de ambos estados de la base computacional.

La compuerta CNOT actúa sobre dos qubits: uno de control y otro objetivo. El qubit objetivo cambia de estado únicamente cuando el qubit de control se encuentra en $|1\rangle$. Su acción puede escribirse como:

$$|c, t\rangle = |c, t \oplus c\rangle$$

donde c representa el qubit de control, t el objetivo y $\oplus$ la suma módulo dos.

Finalmente, la compuerta Toffoli actúa sobre tres qubits: dos controles y un objetivo. El estado del qubit objetivo se modifica solamente cuando ambos controles están en $|1\rangle$:

$$|c_1, c_2, t\rangle = |c_1, c_2, t \oplus (c_1 c_2)\rangle$$

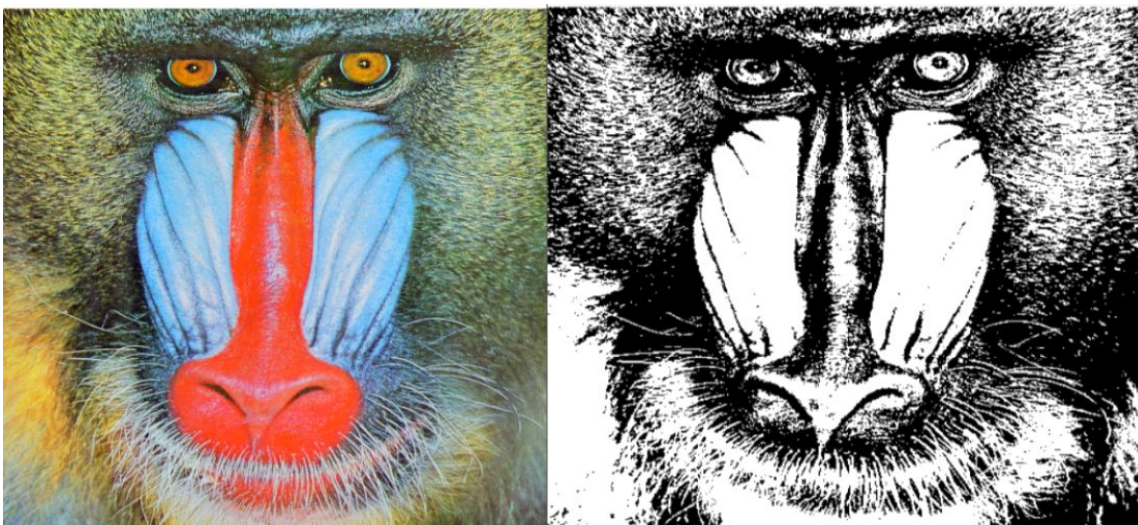
Las compuertas CNOT y Toffoli permiten establecer operaciones condicionadas y reversibles entre varios qubits. En el circuito de este trabajo se combinan con las compuertas X y Hadamard para relacionar los valores de los píxeles de entrada y generar los estados que posteriormente se miden para reconstruir las imágenes erosionada y dilatada (Barenco et al., 1995; Nielsen & Chuang, 2010; Qiskit Community, 2019).

METODOLOGÍA

El estudio se centró en la implementación y evaluación de un circuito cuántico para obtener las operaciones morfológicas de erosión y dilatación sobre la imagen binaria Baboon, como se muestra en la Figura 1. La metodología comprendió la generación de imágenes clásicas de referencia, la ejecución del circuito en Qiskit y la comparación de los resultados obtenidos mediante ambos procedimientos.

Figura 1.

Imagen original Baboon (izquierda), imagen binarizada de Baboon (derecha)



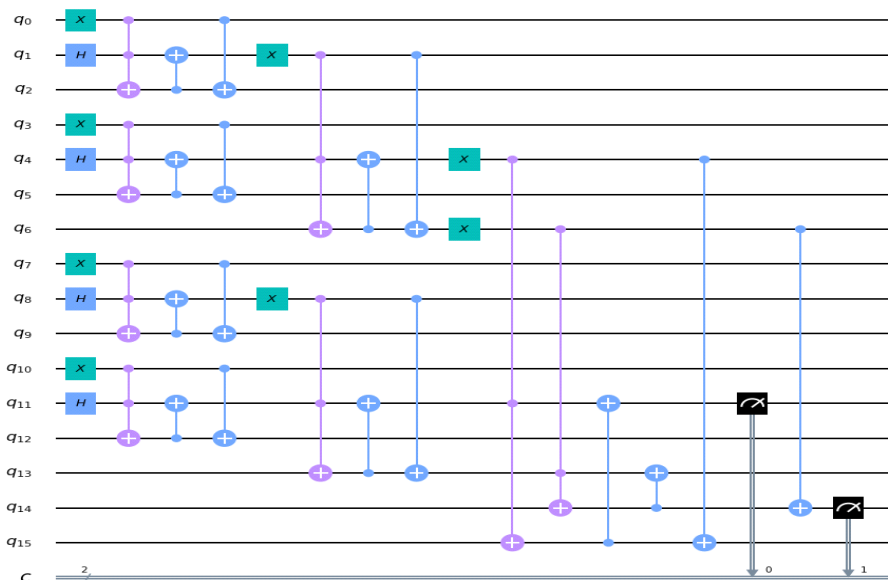
Se utilizaron versiones binarias de la imagen Baboon con resoluciones de 102×102 , 128×128 y 256×256 píxeles. El uso de estas tres dimensiones permitió estudiar el comportamiento de la implementación ante diferentes cantidades de píxeles de entrada.

Para cada resolución se aplicaron las operaciones de erosión y dilatación mediante OpenCV. Las imágenes obtenidas con este procedimiento se utilizaron como referencia para evaluar las salidas producidas por el circuito cuántico. Tanto la implementación clásica como la cuántica partieron de las mismas matrices binarias y conservaron las dimensiones correspondientes a cada configuración (Pulli et al., 2012).

El procesamiento cuántico se desarrolló en Qiskit y se ejecutó mediante el simulador qasm simulator de Qiskit Aer. El circuito empleado para obtener las operaciones de erosión y dilatación se construyó con 16 qubits y 2 bits clásicos, como se muestra en la Figura 2 (Qiskit Community, 2019).

Figura 2.

Circuito cuántico implementado en Qiskit para obtener las operaciones morfológicas de erosión y dilatación.



La información de la imagen se representó mediante estados de la base computacional. Los valores binarios iguales a cero se asociaron con el estado $|0\rangle$, mientras que los valores iguales a uno se prepararon mediante la aplicación de compuertas (X) sobre los qubits correspondientes (Qiskit Community, 2019).

La matriz de entrada se recorrió por filas y columnas. Para cada posición se construyó una instancia del circuito y se introdujeron los valores binarios de los píxeles considerados en el procesamiento. La arquitectura utilizó compuertas (X), Hadamard, CNOT y Toffoli para relacionar los estados de entrada y generar las dos salidas asociadas con las operaciones morfológicas.

Después de aplicar la secuencia de compuertas, se realizaron dos mediciones cuyos resultados se almacenaron en los bits clásicos. Los valores binarios obtenidos se incorporaron

en dos arreglos independientes, uno correspondiente a la erosión y otro a la dilatación. Al concluir el procesamiento de la matriz, cada arreglo se reorganizó de acuerdo con la resolución de entrada para reconstruir las imágenes resultantes.

Este procedimiento permitió obtener, durante una misma ejecución del circuito, la información necesaria para formar las salidas de erosión y dilatación de la imagen procesada. El circuito se evaluó con 16, 160, 1600, 16000 y 160000 ejecuciones por cada posición procesada. Estos valores corresponden al parámetro shots del simulador, es decir, al número de veces que el circuito se ejecutó y midió para obtener los resultados asociados con cada posición de la imagen (Qiskit Community, 2019).

Cada operación morfológica se obtuvo a partir de las salidas del circuito, mientras que el número de shots determinó la cantidad de mediciones realizadas en cada configuración. Para cada resolución y número de ejecuciones se reconstruyeron por separado las imágenes erosionada y dilatada. Las configuraciones de 16, 160 y 1600 ejecuciones se utilizaron para la comparación cuantitativa. Las configuraciones de 16000 y 160000 ejecuciones se incluyeron en la comparación visual y en el análisis de los tiempos de cómputo.

Las imágenes obtenidas mediante el circuito cuántico se compararon con las imágenes de referencia generadas en OpenCV. La evaluación se realizó por separado para la erosión y la dilatación y consideró las tres resoluciones de Baboon.

El análisis cualitativo consistió en comparar visualmente la estructura general de la imagen, la definición de sus detalles y los cambios producidos en las regiones claras y oscuras por cada operación morfológica.

La comparación cuantitativa se realizó mediante las siguientes métricas:

- Error cuadrático medio (MSE);
- Proporción máxima de señal a ruido (PSNR);
- Índice de similitud estructural (SSIM).

Estas métricas se calcularon entre las imágenes obtenidas mediante Qiskit y sus correspondientes referencias clásicas para 16, 160 y 1600 ejecuciones. El MSE se empleó para cuantificar las diferencias entre los valores de los píxeles; el PSNR permitió evaluar la calidad de las imágenes con respecto a la referencia; y el SSIM se utilizó para analizar su similitud estructural (Horé & Ziou, 2010; Huynh-Thu & Ghanbari, 2008; Wang & Bovik, 2002; Wang et al., 2004).

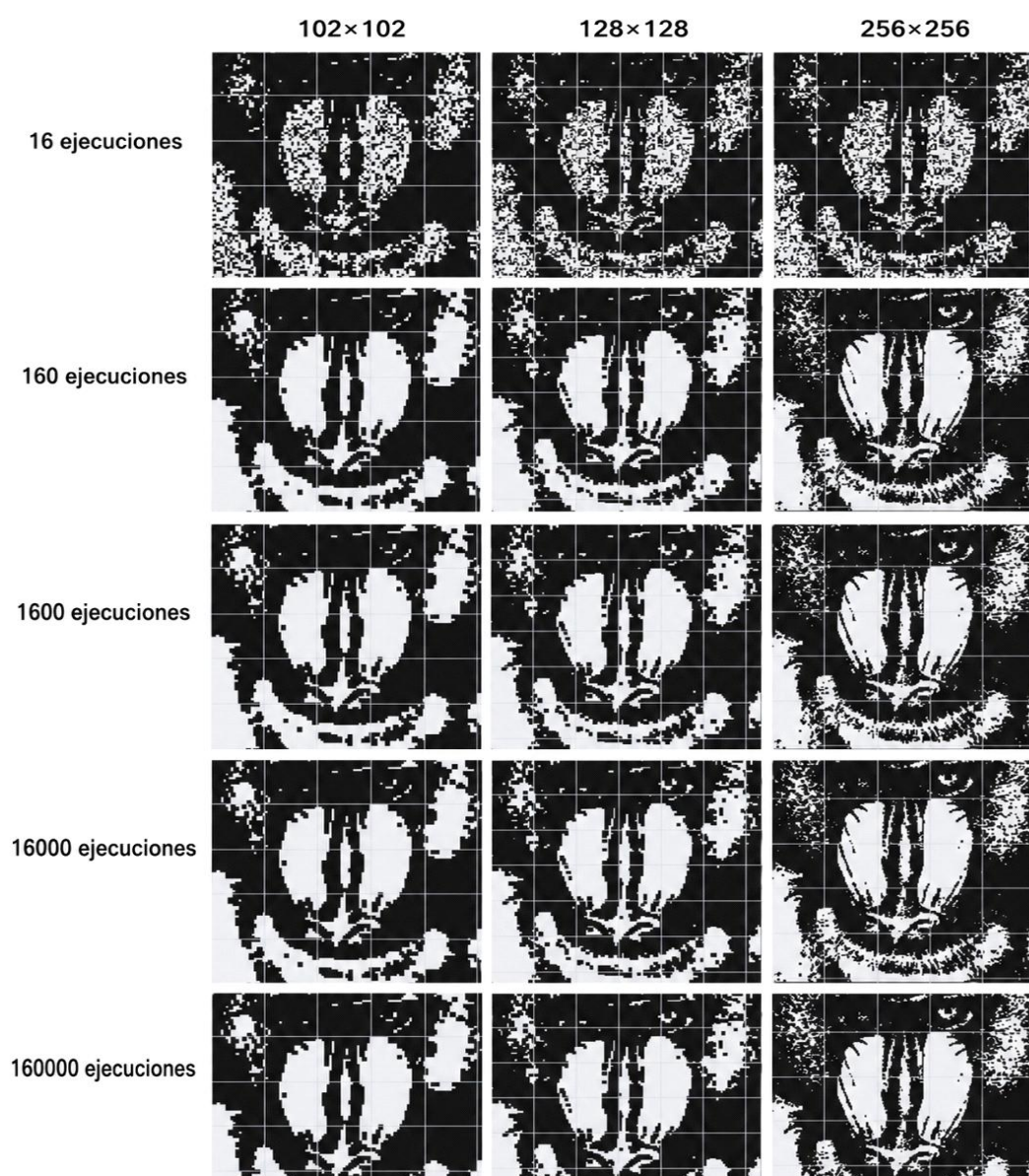
Adicionalmente, se registraron los tiempos de ejecución de las operaciones de erosión y dilatación para examinar su variación con respecto al tamaño de la imagen y al número de shots. La evaluación conjunta de las imágenes, las métricas de similitud y los tiempos de cómputo permitió caracterizar el funcionamiento del circuito cuántico sobre la imagen Baboon.

RESULTADOS

La erosión cuántica se evaluó con la imagen Baboon en resoluciones de 102×102 , 128×128 y 256×256 píxeles. Para cada tamaño se reconstruyeron cinco imágenes, correspondientes a 16, 160, 1600, 16000 y 160000 ejecuciones del circuito.

En la Figura 3 se observa el efecto esperado de la erosión: las regiones blancas se reducen y en consecuencia las zonas oscuras se agrandan. Con 16 ejecuciones todavía se distingue la estructura general de Baboon, mientras que en las configuraciones posteriores cambian la continuidad de los contornos y la cantidad de detalles conservados.

Las diferencias se observan con mayor claridad en 256×256 píxeles, porque esa resolución contiene más bordes y componentes pequeños. En las reconstrucciones con números altos de ejecuciones, la imagen se vuelve más oscura y algunos rasgos finos pierden definición. Estas observaciones describen el resultado de la configuración empleada y se contrastan más adelante con las métricas cuantitativas.

Figura 3.*Resultados de la erosión de la imagen Baboon*

Resultados de la dilatación

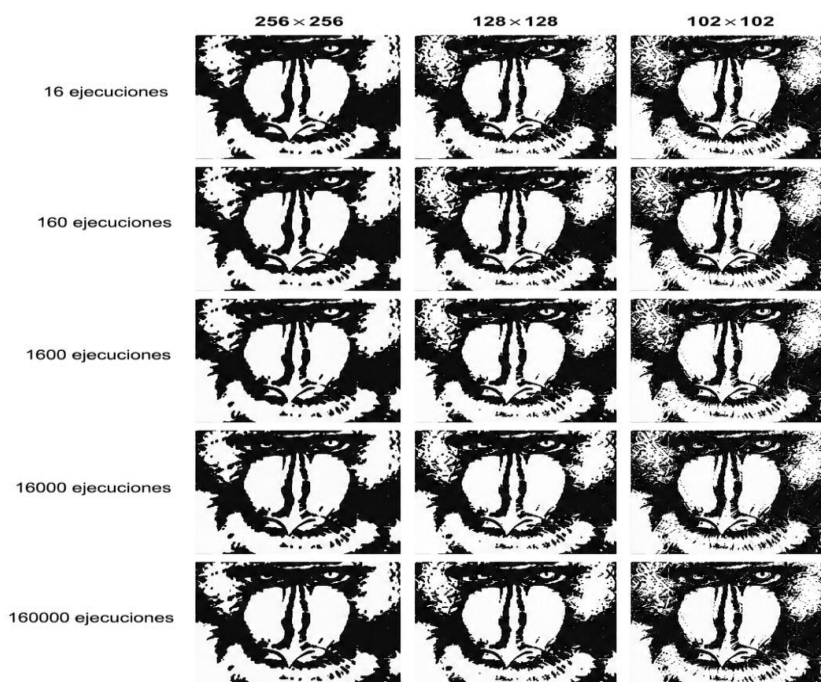
La Figura 4 reúne las salidas correspondientes a la dilatación para las mismas resoluciones y cantidades de ejecuciones. En este caso, las regiones blancas se extienden y ocupan una mayor parte de la imagen, de acuerdo con el efecto característico de la operación.

Las imágenes obtenidas con 16 y 160 ejecuciones conservan de manera reconocible los contornos principales de Baboon. La distribución de las áreas claras se mantiene próxima a la referencia y todavía es posible identificar los rasgos centrales de la imagen.

A medida que aumenta el número de ejecuciones, las regiones blancas se amplían y el contraste disminuye. El cambio es más evidente en 256×256 píxeles y en las configuraciones de 16000 y 160000 ejecuciones, donde parte de la estructura interna queda cubierta por la expansión de las zonas claras.

Figura 4.

Resultados de la dilatación de la imagen Baboon



Comparación entre OpenCV y Qiskit

Para comparar las salidas de Qiskit con las imágenes de referencia de OpenCV se calcularon PSNR, MSE y SSIM. El análisis cuantitativo se concentró en 16, 160 y 1600 ejecuciones, tanto para erosión como para dilatación.

Las configuraciones de 16 y 160 ejecuciones presentan, en conjunto, las menores diferencias entre los dos procedimientos. Esta tendencia aparece en la inspección visual y también en los valores de las tres métricas.

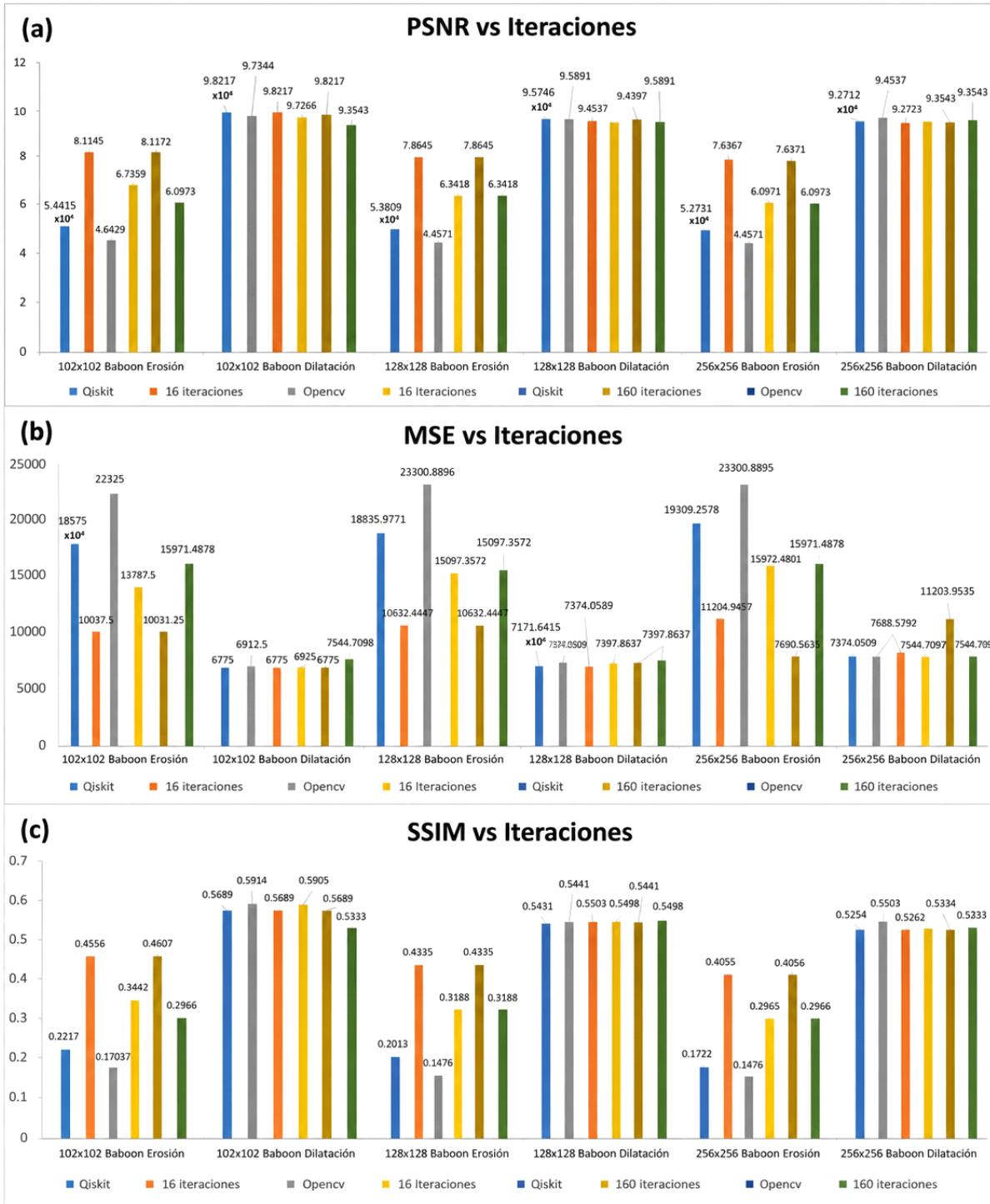
Con 1600 ejecuciones la separación entre las imágenes se hace más notoria. En los casos donde la similitud disminuye, el PSNR y el SSIM se reducen, mientras que el MSE aumenta, lo que indica una diferencia mayor entre los valores de los píxeles.

La resolución también modifica la comparación. Las discrepancias son menos visibles en 102×102 píxeles y se distinguen con mayor facilidad en 256×256 , donde se acumulan más variaciones locales y se conservan más detalles de la imagen de entrada.

En términos generales, la dilatación mantiene una correspondencia más uniforme con OpenCV que la erosión. La Figura 5 resume este comportamiento y permite observar, para cada resolución y operación, cómo cambian las métricas con el número de ejecuciones considerado.

Figura 5.

Comparación cuantitativa entre los resultados obtenidos mediante OpenCV y Qiskit para la imagen Baboon: (a) PSNR, (b) MSE y (c) SSIM en las operaciones de erosión y dilatación



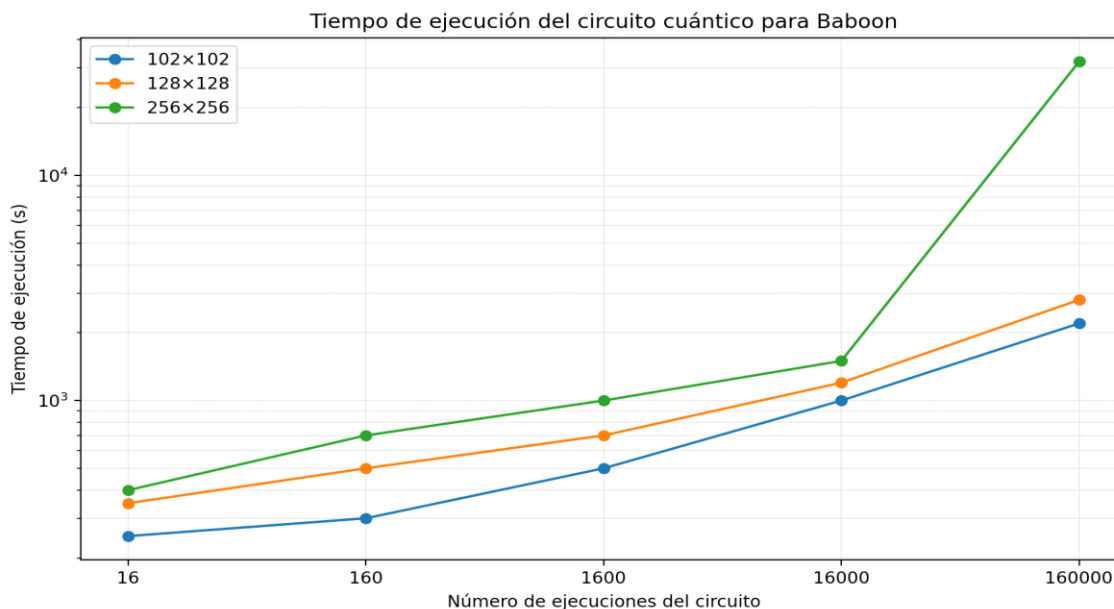
Tiempos de ejecución

Los tiempos de simulación aumentaron al incrementar tanto la resolución como el número de ejecuciones. Las configuraciones de 102×102 píxeles fueron las menos costosas, mientras que las de 256×256 requirieron los tiempos más altos.

El crecimiento se vuelve especialmente marcado en 16000 y 160000 ejecuciones. El caso de 256×256 píxeles con 160000 ejecuciones alcanzaron aproximadamente 32000 segundos. Dado que el circuito produce las dos salidas en el mismo procesamiento, estos valores corresponden al procedimiento conjunto utilizado para reconstruir erosión y dilatación, y no a tiempos independientes para cada operación.

Figura 6.

Tiempos de ejecución de las operaciones de erosión y dilatación en función de la resolución de Baboon y del número de ejecuciones del circuito



DISCUSIÓN

Las imágenes obtenidas confirman que el circuito reproduce la acción básica de las dos operaciones morfológicas: la erosión contrae las regiones claras y la dilatación las expande. Esto permite reconocer una correspondencia funcional con OpenCV. Sin embargo, las diferencias visibles y las métricas muestran que la equivalencia no es exacta. El resultado depende de la operación, de la resolución y de la cantidad de mediciones utilizada para reconstruir cada píxel, como también se ha señalado en propuestas de morfología y procesamiento cuántico de imágenes (Li et al., 2019; Ma et al., 2020; Yuan et al., 2015, 2016).

Para Baboon, la dilatación fue más estable que la erosión. Una explicación posible está en la propia estructura de la imagen: abundan bordes, zonas estrechas y detalles pequeños en la erosión, un cambio localizado puede hacer que desaparezca una parte del borde o incluso una estructura delgada. En la dilatación, en cambio, esa misma variación puede quedar absorbida dentro de una región blanca de mayor tamaño y resultar menos visible. Esto ayuda a explicar por qué las diferencias entre Qiskit y OpenCV no afectan de la misma manera a ambas operaciones. Aunque este comportamiento es compatible con la sensibilidad a las vecindades locales señalada en otros trabajos de procesamiento cuántico de imágenes, no puede considerarse general sin evaluar un conjunto más amplio de imágenes (Caraiman & Manta, 2014; Geng et al., 2022; Yao et al., 2017).

También resulta importante analizar lo ocurrido al aumentar el número de shots. Repetir la medición más veces debería permitir una estimación más precisa de la distribución de salida. Sin embargo, en este estudio el incremento de las ejecuciones no produjo una mejora continua en PSNR, MSE o SSIM. Esto sugiere que las diferencias observadas no dependen solamente del muestreo. También pueden estar relacionadas con la manera en que se introduce la información de la vecindad, se selecciona el resultado de la medición y se reconstruye la matriz

binaria. Por esta razón, aumentar los shots no elimina necesariamente los errores introducidos en otras etapas del procedimiento (Geng et al., 2022; Preskill, 2018).

La resolución de la imagen también influye en la visibilidad de estas diferencias. Una imagen de 256×256 píxeles contienen más posiciones y detalles que una de 102×102 . Por ello, pequeñas variaciones producidas durante el procesamiento pueden acumularse y hacerse más evidentes en los contornos o en las regiones de mayor textura. Este efecto es especialmente perceptible en Baboon, debido a la cantidad de bordes y cambios de intensidad presentes en la imagen. La relevancia de la representación y del escalamiento también ha sido señalada en distintas propuestas de procesamiento cuántico de imágenes (Haque et al., 2023; Jiang & Wang, 2015; Le et al., 2011; Nasr et al., 2021; Zhang et al., 2013).

La principal limitación práctica de la simulación fue el tiempo requerido. A medida que se aumentó la resolución y el número de ejecuciones, también lo hizo el costo computacional. De manera esperada el caso con más requerimientos correspondió a la imagen de 256×256 píxeles con 160000 shots, para la cual se registró un tiempo cercano a 32000 segundos. Este aumento no estuvo acompañado por una mejora proporcional en las métricas de calidad. Dentro de las configuraciones analizadas, los números menores de ejecuciones ofrecieron una relación más conveniente entre similitud y tiempo de procesamiento. Este resultado debe interpretarse considerando que el circuito fue evaluado mediante simulación clásica y dentro de las limitaciones asociadas con el contexto NISQ (Leymann & Barzen, 2020; Preskill, 2018).

Los tiempos mostrados en la gráfica no corresponden al desempeño de un procesador cuántico real. El circuito se ejecutó en un simulador, por lo que cada medición incluye el costo de reproducir su comportamiento mediante una computadora clásica. Además, no fue posible separar el tiempo de erosión del tiempo de dilatación, ya que las dos salidas se obtienen durante la misma ejecución del circuito. En consecuencia, estos resultados no permiten establecer una ventaja temporal frente a OpenCV. Su utilidad radica en mostrar el

funcionamiento del diseño y el costo requerido para evaluarlo con la estrategia empleada (Wang et al., 2022; Yan & Venegas-Andraca, 2025).

Finalmente, el análisis se realizó únicamente con una imagen binaria y con un registro de tiempo para cada configuración. No se calcularon promedios ni desviaciones estándar, y tampoco se probaron otros tipos de imágenes o elementos estructurantes. Debido a estas limitaciones, todavía no es posible distinguir con precisión qué parte de la variación se debe al simulador y cuál corresponde al propio circuito. Un estudio posterior debería incluir varias repeticiones independientes, imágenes con características diferentes, optimización de compuertas y pruebas en hardware cuántico. Esto permitiría determinar cuáles de los comportamientos observados se mantienen fuera del caso específico de Baboon (Geng et al., 2022; Liu et al., 2022).

CONCLUSIONES

Se implementó en Qiskit un circuito de 16 qubits y 2 bits clásicos capaz de producir, en un mismo procesamiento, las salidas utilizadas para reconstruir la erosión y la dilatación de la imagen binaria Baboon. La prueba se realizó en tres resoluciones y con cinco cantidades de ejecuciones, lo que permitió observar el comportamiento del circuito bajo distintas cargas de simulación.

La comparación con OpenCV mostró que las dos operaciones conservan su efecto morfológico general, pero no generan imágenes idénticas a la referencia clásica. En el caso analizado, la dilatación presentó una similitud más estable que la erosión y las configuraciones de 16 y 160 ejecuciones ofrecieron la correspondencia más favorable entre las evaluadas. Aumentar el número de shots no garantizó mejores valores de MSE, PSNR o SSIM. En cambio, sí produjo un crecimiento importante del tiempo de cómputo, particularmente en 256×256

píxeles. Por esta razón, las configuraciones con menos ejecuciones resultaron más convenientes para el balance entre calidad de reconstrucción y costo de simulación.

El trabajo demuestra que las operaciones morfológicas binarias pueden explorarse mediante un circuito cuántico y evaluarse con herramientas habituales de procesamiento de imágenes. No demuestra una ventaja sobre OpenCV ni permite generalizar el resultado a otras imágenes. El siguiente paso será ampliar el conjunto de pruebas, repetir cada configuración para estimar su variabilidad, optimizar el circuito y estudiar su ejecución en dispositivos cuánticos reales.

Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés relacionado con esta investigación.

Declaración de contribución a la autoría

Emily Andrea Franco Escudero primer autor: conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, software, validación, visualización, redacción del borrador original, revisión y edición de la redacción.

Roberto Arceo Reyes segundo autor: curación de datos, análisis formal, adquisición de fondos, recursos, software, supervisión, visualización, redacción del borrador original, revisión y edición de la redacción, administración del proyecto.

Leonardi Hernández Sánchez tercer autor: curación de datos, administración del proyecto, análisis formal, adquisición de fondos, recursos, supervisión, visualización, validación, visualización, redacción del borrador original, revisión y edición de la redacción,

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que utilizaron herramientas de inteligencia artificial como apoyo en la revisión de estilo y organización del manuscrito. Estas herramientas no sustituyeron el análisis, la interpretación ni las decisiones académicas de los autores. Los datos, figuras, cálculos, citas y referencias fueron revisados y validados por los autores antes de preparar la versión final.

REFERENCIAS

- Caraiman, S., & Manta, V. I. (2014). Histogram-based segmentation of quantum images. *Theoretical Computer Science*, 529, 46–60. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2013.08.005>
- Deutsch, D. (1985). Quantum theory, the Church–Turing principle and the universal quantum computer. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 400(1818), 97–117. <https://doi.org/10.1098/rspa.1985.0070>
- Feynman, R. P. (1982). Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(6–7), 467–488. <https://doi.org/10.1007/BF02650179>
- Geng, A., Moghiseh, A., Redenbach, C., & Schladitz, K. (2022). A hybrid quantum image edge detector for the NISQ era. *Quantum Machine Intelligence*, 4, Article 15. <https://doi.org/10.1007/s42484-022-00071-3>
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing* (4th ed.). Pearson.
- Grover, L. K. (1996). A fast quantum mechanical algorithm for database search. In *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on theory of computing* (pp. 212–219). ACM. <https://doi.org/10.1145/237814.237866>
- Haque, M. E., Paul, M., Ulhaq, A., & Debnath, T. (2023). Advanced quantum image representation and compression using a DCT-EFRQI approach. *Scientific Reports*, 13, Article 4129. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30575-2>

- Haralick, R. M., Sternberg, S. R., & Zhuang, X. (1987). Image analysis using mathematical morphology. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-9(4), 532–550. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1987.4767941>
- Horé, A., & Ziou, D. (2010). Image quality metrics: PSNR vs. SSIM. In 2010 20th International Conference on Pattern Recognition (pp. 2366–2369). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2010.579>
- Huynh-Thu, Q., & Ghanbari, M. (2008). Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment. *Electronics Letters*, 44(13), 800–801. <https://doi.org/10.1049/el:20080522>
- Jiang, N., & Wang, L. (2015). Quantum image scaling using nearest neighbor interpolation. *Quantum Information Processing*, 14(5), 1559–1571. <https://doi.org/10.1007/s11128-014-0841-8>
- Le, P. Q., Dong, F., & Hirota, K. (2011). A flexible representation of quantum images for polynomial preparation, image compression, and processing operations. *Quantum Information Processing*, 10(1), 63–84. <https://doi.org/10.1007/s11128-010-0177-y>
- Leymann, F., & Barzen, J. (2020). The bitter truth about gate-based quantum algorithms in the NISQ era. *Quantum Science and Technology*, 5(4), Article 044007. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/abae7d>
- Li, P., Shi, T., Lu, A., & Wang, B. (2019). Quantum circuit design for several morphological image processing methods. *Quantum Information Processing*, 18(12), Article 364. <https://doi.org/10.1007/s11128-019-2479-z>
- Liu, W., Wang, L., & Cui, M. (2022). Quantum image segmentation based on grayscale morphology. *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, 3, Article 3103012, 1–12. <https://doi.org/10.1109/TQE.2022.3223368>
- Ma, S.-Y., Khalil, A., Hajjdiab, H., & Eleuch, H. (2020). Quantum dilation and erosion. *Applied Sciences*, 10(11), Article 4040. <https://doi.org/10.3390/app10114040>

- Nasr, N., Younes, A., & Elsayed, A. (2021). Efficient representations of digital images on quantum computers. *Multimedia Tools and Applications*, 80(25), 34019–34034.
<https://doi.org/10.1007/s11042-021-11355-4>
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66.
<https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, Article 79.
<https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>
- Pulli, K., Baksheev, A., Korniyakov, K., & Eruhimov, V. (2012). Real-time computer vision with OpenCV. *Communications of the ACM*, 55(6), 61–69.
<https://doi.org/10.1145/2184319.2184337>
- Qiskit Community (2019). Qiskit: An open-source framework for quantum computing [Software de computadora]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2562111>
- Shor, P. W. (1994). Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring. In *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science* (pp. 124–134). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SFCS.1994.365700>
- Vincent, L. (1993). Morphological grayscale reconstruction in image analysis: Applications and efficient algorithms. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2(2), 176–201.
<https://doi.org/10.1109/83.217222>
- Wang, Z., & Bovik, A. C. (2002). A universal image quality index. *IEEE Signal Processing Letters*, 9(3), 81–84. <https://doi.org/10.1109/97.995823>
- Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4), 600–612. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>

- Wang, Z., Xu, M., & Zhang, Y. (2022). Review of quantum image processing. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(2), 737–761. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09599-2>
- Yan, F., Iliyasu, A. M., & Jiang, Z. (2014). Quantum computation-based image representation, processing operations and their applications. *Entropy*, 16(10), 5290–5338. <https://doi.org/10.3390/e16105290>
- Yan, F., Iliyasu, A. M., & Venegas-Andraca, S. E. (2016). A survey of quantum image representations. *Quantum Information Processing*, 15(1), 1–35. <https://doi.org/10.1007/s11128-015-1195-6>
- Yan, F., & Venegas-Andraca, S. E. (2025). Lessons from twenty years of quantum image processing. *ACM Transactions on Quantum Computing*, 6(1), Article 5, 1–29. <https://doi.org/10.1145/3663577>
- Yao, X.-W., Wang, H., Liao, Z., Chen, M.-C., Pan, J., Li, J., Zhang, K., Lin, X., Wang, Z., Luo, Z., Zheng, W., Li, J., Zhao, M., Peng, X., & Suter, D. (2017). Quantum image processing and its application to edge detection: Theory and experiment. *Physical Review X*, 7(3), Article 031041. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.7.031041>
- Yuan, S., Mao, X., Li, T., Xue, Y., Chen, L., & Xiong, Q. (2015). Quantum morphology operations based on quantum representation model. *Quantum Information Processing*, 14(5), 1625–1645. <https://doi.org/10.1007/s11128-014-0862-3>
- Yuan, S., Mao, X., Chen, L., & Wang, X. (2016). Improved quantum dilation and erosion operations. *International Journal of Quantum Information*, 14(7), Article 1650036. <https://doi.org/10.1142/S0219749916500362>
- Zhang, Y., Lu, K., Gao, Y., & Wang, M. (2013). NEQR: A novel enhanced quantum representation of digital images. *Quantum Information Processing*, 12(8), 2833–2860. <https://doi.org/10.1007/s11128-013-0567-z>

Barenco, A., Bennett, C. H., Cleve, R., DiVincenzo, D. P., Margolus, N., Shor, P., Sleator, T., Smolin, J. A., & Weinfurter, H. (1995). Elementary gates for quantum computation. *Physical Review A*, 52(5), 3457–3467. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.52.3457>

Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum computation and quantum information* (10th anniversary ed.). Cambridge University Press.