



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
Escuela Superior de Cómputo



Modelo de Clasificación de Tumores Cerebrales en Imágenes de Resonancia Magnética Usando Embedding Cuántico y Redes Neuronales

INVESTIGACIÓN

P R E S E N T A

Castillo Reyes Diego

Muñoz González Eduardo

Yañez Martínez Marthon Leobardo

Asesor académico

Mtra. Areli Yesareth Guerrero Estrada

Dra. Ángeles Alejandra Sánchez Manilla

Ciudad de México

Noviembre 2025

Resumen

La computación cuántica es una tecnología en auge que utiliza las propiedades de la mecánica cuántica de modo que permite reducir la complejidad en operaciones costosas computacionalmente gracias al paralelismo cuántico. En este proyecto se busca optimizar la clasificación de tumores cerebrales en imágenes médicas mediante un enfoque híbrido cuántico-clásico. Utilizaremos *Quantum Feature Embedding*, específicamente *Amplitude Encoding* para extraer representaciones eficientes de imágenes de resonancia magnética (MRI por sus siglas en inglés) y una red neuronal clásica para dar interpretación al resultado de dichos embeddings y realizar la clasificación, esto usando el conjunto de datos proporcionado por Muhammad Al-Zafar Khan et al. [1] con poco más de 3000 MRI, clasificadas entre meningioma, glioma y tumor pituitario.

Palabras claves: Circuitos Cuánticos Variacionales, Codificación por Amplitud, Imágenes de Resonancia Magnética, Redes Neuronales Convolucionales, Tumores Cerebrales.

Índice general

Resumen	I
0.1. Introducción	1
0.2. Antecedentes	3
0.3. Estado del arte	4
0.4. Justificación	5
0.5. Objetivo general	5
0.6. Objetivos específicos	6
 1. Marco Teórico	 7
1.1. Tema 1	7
1.2. Tema 2	8
1.3. Tema 3	8
 2. Metodología	 9
2.1. Etapa Uno	9
2.2. Etapa Dos	9
2.3. Etapa Tres	10
 3. Resultados esperados	 11

Índice de figuras

1.	Edificio principal de CICATA Altamira	4
----	---	---

Índice de tablas

1.	Centros de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del IPN en México .	5
----	--	---

0.1. Introducción

El cáncer es un término genérico para describir una variedad de enfermedades que pueden afectar a cualquier parte del organismo. Este está definido por el crecimiento descontrolado de células anormales. Estas pueden invadir otros organismos por medio de un proceso que se llama «metástasis» [2]. La Organización Mundial de la Salud afirma que el cáncer es una de las principales causas de muerte en todo el mundo, causando al rededor de 10 millones de defunciones en todo el mundo [3]. Tan solo en México, en 2023 hubo 799,869 defunciones de las cuales el 11.4 % fueron por tumores malignos según datos de la INEGI [4]

El tumor cerebral maligno es una de las enfermedades más peligrosas debido a su mal pronóstico y a las dificultades inherentes a su tratamiento. Un obstáculo clave es la barrera hematoencefálica (BHE), que limita la eficacia de los paradigmas diagnósticos y terapéuticos. En respuesta, la comunidad científica busca activamente soluciones innovadoras; trabajos como los de Ijaz et al. y Hasan et al. son ejemplos de esfuerzos dedicados a desarrollar sondas de diagnóstico avanzadas y nanomedicinas para mejorar la detección temprana y el tratamiento de estos tumores [5, 6]. Aun que los tumores trabajados en este proyecto son benignos, la detección temprana de estos es crucial para prevenir su progresión a malignidad y mejorar el pronóstico del paciente. También el trabajo hecho se podría replicar para verificar su eficacia en tumores malignos.

En este contexto, el diagnóstico temprano y preciso mediante IRM se ha consolidado como un pilar fundamental en la neurooncología moderna, ya que influye directamente en la eficacia del tratamiento y el pronóstico del paciente [7]. En los últimos años, la inteligencia artificial, y en particular los modelos de aprendizaje profundo, han revolucionado la interpretación de estas imágenes, alcanzando niveles de precisión en la detección de tumores comparables a los de radiólogos expertos [8, 9]. Modelos avanzados como BrainTumorSegNet [10] y qER de Qure.ai [11] ejemplifican este éxito. Sin embargo, la aplicabilidad de estos enfoques clásicos enfrenta dos barreras significativas: la dependencia de enormes volúmenes de datos para el entrenamiento y la necesidad de una alta capacidad de cómputo. Estas limitaciones restringen su implementación en entornos clínicos con recursos computacionales limitados y pueden ralentizar la optimización de los modelos. Ante este panorama, emerge la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible desarrollar un modelo de clasificación de imágenes de IRM que mantenga una alta precisión diagnóstica reduciendo al mismo tiempo la dependencia de recursos computacionales masivos?

Sumario de la Revisión de la Literatura y Justificación del Estudio

Para abordar las limitaciones mencionadas, esta investigación explora la computación cuántica como una alternativa disruptiva. A diferencia de los bits clásicos, los cúbits aprovechan los principios de superposición

y entrelazamiento para procesar información de manera exponencialmente más potente, permitiendo que los algoritmos cuánticos resuelvan problemas de alta complejidad con menos recursos [12]. En el campo del diagnóstico médico, ya existen propuestas que integran enfoques cuánticos y clásicos. Por ejemplo, el modelo HQC-CNN utiliza un circuito cuántico para la extracción de características en la clasificación de tumores cerebrales [13], mientras que otros han aplicado el aprendizaje por transferencia cuántico al diagnóstico de Alzheimer y Parkinson [14]. Un trabajo de referencia es el de Khan et al. [1], quienes desarrollaron una red híbrida (HQCNN) que emplea codificación angular para clasificar tumores con una precisión del 91.4%. Este estudio se justifica en la necesidad de superar los cuellos de botella computacionales de la IA clásica, proponiendo una arquitectura híbrida novedosa que no solo busca mejorar la precisión, sino también optimizar la eficiencia del procesamiento de datos médicos.

Objetivos e Hipótesis

El objetivo general de esta investigación es desarrollar y evaluar una arquitectura de red neuronal híbrida cuántico-clásica para la clasificación de tumores cerebrales en imágenes de resonancia magnética, que demuestre un rendimiento superior en precisión y eficiencia computacional en comparación con enfoques híbridos existentes.

De este objetivo se desprende la siguiente hipótesis: H_1 : *Una arquitectura de red híbrida que utiliza el algoritmo cuántico de extracción de características **Amplitude Encoding** (Codificación por Amplitud) [15] junto con una red neuronal clásica, logrará una mayor precisión en la clasificación de imágenes de IRM que el modelo híbrido de Khan et al. [1], el cual se basa en la codificación angular.*

Contexto, Variables y Términos Clave

Esta investigación se realizará en un entorno de simulación computacional. Se utilizará un conjunto de datos público de imágenes de resonancia magnética cerebral [16] para entrenar y validar los modelos. Este conjunto de datos es el mismo que utilizó Khan et al. [1] y servirá como base para comprobar nuestra hipótesis. El desarrollo de la arquitectura clásica se llevará a cabo con la librería PyTorch, mientras que los componentes cuánticos serán diseñados y simulados utilizando el kit de desarrollo de software Qiskit de IBM para Python. También se planea utilizar la plataforma en la nube IBM Quantum Experience para ejecutar simulaciones en hardware cuántico real, sin embargo estaremos sujetos a la disponibilidad y las limitaciones de acceso.

Las variables principales son:

- **Variable Independiente:** La arquitectura del modelo de clasificación, comparando (a) el enfoque híbrido propuesto con *Amplitude Encoding* y (b) el enfoque híbrido de referencia con codificación angular.
- **Variable Dependiente:** La precisión (*accuracy*) del modelo en la tarea de clasificación binaria (presencia o ausencia de tumor).

Limitaciones de la Investigación y Utilidad del Estudio

El estudio presenta dos limitaciones principales. Primero, el uso de simuladores cuánticos no refleja completamente las condiciones de ruido y decoherencia inherentes al hardware cuántico real, lo que podría afectar la generalización de los resultados. Segundo, la investigación se enfoca exclusivamente en una clasificación binaria, sin abordar tareas más complejas como la segmentación tumoral o la clasificación multiclase (e.g., glioma, meningioma). Segundo, el simulador de IBM Quantum Experience tiene limitaciones en cuanto al número de cúbits, la profundidad del circuito e incluso el tiempo que podemos utilizar, lo cual podría afectar seriamente nuestros resultados para cuando queramos comparar a una computadora cuántica real.

A pesar de estas limitaciones, la utilidad de este estudio es doble. Para el campo académico, aporta evidencia sobre la viabilidad y el potencial de las técnicas de *quantum machine learning*, específicamente del *Amplitude Encoding*, en el dominio de imágenes médicas. A nivel profesional y clínico, los hallazgos podrían sentar las bases para el desarrollo de futuras herramientas de diagnóstico asistido por computadora que sean más rápidas, accesibles y eficientes, democratizando el acceso a tecnologías de diagnóstico avanzado en centros con infraestructura computacional modesta.

0.2. Antecedentes

En la figura 1 Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.



Figura 1: Edificio principal de CICATA Altamira

0.3. Estado del arte

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum. 1

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

[?] Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero.

Tabla 1: Centros de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del IPN en México

Nombre	Ubicación	Áreas de Especialización
CICATA Altamira	Altamira, Tamaulipas	Materiales Avanzados
CICATA Legaria	Ciudad de México	Innovación Tecnológica
CICATA Querétaro	Querétaro, Querétaro	Nanotecnología
CICATA Reynosa	Reynosa, Tamaulipas	Ingeniería de Software
CICATA Unidad IPN Ticomán	Ciudad de México	Electrónica, Física Aplicada

Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

0.4. Justificación

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

0.5. Objetivo general

Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla.

0.6. Objetivos específicos

1. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna.
2. Raesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla
3. CDuis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Capítulo 1

Marco Teórico

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

1.1. Tema 1

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

1.2. Tema 2

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus. [?]

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

1.3. Tema 3

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Capítulo 2

Metodología

2.1. Etapa Uno

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

2.2. Etapa Dos

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

[?] Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac,

lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

2.3. Etapa Tres

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Capítulo 3

Resultados esperados

Bibliografía

- [1] M. A.-Z. Khan, N. Innan, A. A. O. Galib, and M. Bennai, “Brain tumor diagnosis using hybrid quantum convolutional neural networks,” *arXiv preprint arXiv:2401.15804*, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2401.15804>
- [2] Instituto Nacional del Cáncer, “¿qué es el cáncer?” <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/naturaleza/que-es>, mayo 2021, consultado el 12 de octubre de 2025.
- [3] Organización Mundial de la Salud, “Cáncer,” <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cancer>, febrero 2022, consultado el 12 de octubre de 2025.
- [4] I. N. de Estadística y Geografía (INEGI), “Estadísticas a propósito del día mundial contra el cáncer,” 2025. [Online]. Available: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2025/EAP_DMvsCancer25.pdf
- [5] M. Ijaz, I. Hasan, B. Aslam, Y. Yan, W. Zeng, J. Gu, J. Jin, Y. Zhang, S. Wang, L. Xing, and B. Guo, “Diagnostics of brain tumor in the early stage: current status and future perspectives,” vol. 13, no. 10, pp. 2580–2605, publisher: The Royal Society of Chemistry. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/D4BM01503G>
- [6] I. Hasan, S. Roy, B. Guo, S. Du, W. Tao, and C. Chang, “Recent progress in nanomedicines for imaging and therapy of brain tumors,” vol. 11, no. 4, pp. 1270–1310, publisher: The Royal Society of Chemistry. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/D2BM01572B>
- [7] Z. Akkus, A. Galimzianova, A. Hoogi, D. L. Rubin, and B. J. Erickson, “Deep learning for brain mri segmentation: State of the art and future directions,” *Journal of Digital Imaging*, vol. 30, no. 4, pp. 449–459, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10278-017-9983-4>
- [8] S. Pereira, A. Pinto, V. Alves, and C. A. Silva, “Brain tumor segmentation using convolutional neural networks in mri images,” *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 35, no. 5, pp. 1240–1251, May 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TMI.2016.2538465>

- [9] C. J. Liew, “The role of artificial intelligence in diagnostic radiology: a survey at a single academic institution,” *Journal of the American College of Radiology*, vol. 15, no. 3, pp. 512–517, 2018.
- [10] X. Hu, W. Luo, J. Hu, S. Guo, W. Huang, M. R. Scott, R. Wiest, M. Dahlweid, and M. Reyes, “Brain segnet: 3d local refinement network for brain lesion segmentation,” *BMC Medical Imaging*, Tech. Rep. 10.1186, 2020, Último acceso: 1 de marzo de 2025. [Online]. Available: <https://bmcmmedimaging.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12880-020-0409-2>
- [11] Qure.ai, “Qure.ai’s qer: The globally proven algorithm for head cts,” 2024, Último acceso: 1 de marzo de 2025. [Online]. Available: https://www.qure.ai/impact_stories/qure.ai-qER-the-globally-proven-algorithm-for-head-cts
- [12] D. McMahon, *Quantum Computing Explained*. Wiley-IEEE Computer Society Press, 2007. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Quantum+Computing+Explained-p-9780470096994>
- [13] Y. Dong, Y. Fu, H. Liu, X. Che, L. Sun, and Y. Luo, “An improved hybrid quantum-classical convolutional neural network for multi-class brain tumor mri classification,” *Journal of Applied Physics*, vol. 133, no. 6, p. 064401, 02 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/5.0138021>
- [14] N. Alsharabi, T. Shahwar, A. U. Rehman, and Y. Alharbi, “Implementing magnetic resonance imaging brain disorder classification via alexnet–quantum learning,” *Mathematics*, vol. 11, no. 2, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/2/376>
- [15] K. Nakaji, S. Uno, Y. Suzuki, R. Raymond, T. Onodera, T. Tanaka, H. Tezuka, N. Mitsuda, and N. Yamamoto, “Approximate amplitude encoding in shallow parameterized quantum circuits and its application to financial market indicators,” *Physical Review Research*, vol. 4, no. 2, p. 023136, 2022.
- [16] J. Cheng, “Brain tumor dataset,” <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.1512427.v5>, 2017, figshare. Dataset.