

Alejandro Martínez Guillermo

Herramientas de IA en la Planificación Quirúrgica: Segmentación y Clasificación Automatizada en Imágenes Médicas RM

MAYO 2025

Director:

Martínez Cabeza de Vaca Alajarán, Juan de la Cruz

Codirectores:

Zapata Pérez, Juan Francisco

Arévalo García, Alicia

Universidad Politécnica de Cartagena

Copyright © 2025 Alejandro Martínez Guillermo

TRABAJO FÍN DE GRADO ALEJANDRO MARTÍNEZ GUILLERMO

PRESENTADO EN UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

First printing, March 2025

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia por su apoyo incondicional, a mis amigos por su compañía y a mi tutor por su paciencia y dedicación.

Resumen

Resumen (te puede servir la ficha del proyecto donde hay que exponer los objetivos, metodología, resultados y conclusiones).

Índice general

1	<i>Introducción</i>	1
1.1	<i>Evolución de la Inteligencia Artificial y su Aplicación en Medicina</i>	1
1.2	<i>Principios de las Imágenes Médicas y la Resonancia Magnética</i>	3
1.2.1	<i>Imágenes Médicas</i>	3
1.3	<i>Principios de RM</i>	4
1.4	<i>Objetivos de la Investigación</i>	5
1.5	<i>Estructura del Trabajo Fin de Grado</i>	6
	 <i>Bibliografía</i>	 7

Índice de figuras

- 1.1. <https://radiodiagnosticando.com/2016/06/13/rm-introduccion-a-conceptos-basicos-definicion-de-spin/> 5

Índice de cuadros

Dedicado a mi familia y amigos.

1

Introducción

En este párrafo, se describe un pequeño resumen del capítulo. 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.

1.1 Evolución de la Inteligencia Artificial y su Aplicación en Medicina

LA *inteligencia artificial* (IA)¹ ha estado experimentando un crecimiento exponencial en las últimas décadas, se ha consolidado como una de las tecnologías más importantes en muchos campos, de entre ellos, la medicina. Desde sus primeras menciones en la década de 1950 con los trabajos pioneros de Alan Turing en el concepto de máquinas inteligentes y John McCarthy, quien acuñó el término *inteligencia artificial* en 1956², la IA ha evolucionado significativamente. Inicialmente la mayoría de los avances en IA se basaban en sistemas expertos y en programas con reglas fijas, es decir, sistemas que seguían instrucciones muy concretas, escritas directamente por personas expertas. Estos sistemas eran útiles para tareas específicas, pero eran rígidos y no podían adaptarse a situaciones nuevas, proporcionando soluciones limitadas y altamente dependientes del conocimiento humano explícito. Sin embargo, con la llegada del aprendizaje automático (*Machine Learning*, ML)³ en las décadas de 1980 y 1990, se inició una transición hacia modelos capaces de aprender patrones a partir de grandes volúmenes de datos, mejorando su capacidad de generalización y adaptabilidad. En la actualidad, el aprendizaje profundo (*Deep*

¹ La inteligencia artificial es un campo de la informática que se enfoca en la creación de sistemas y máquinas capaces de realizar tareas que normalmente requieren inteligencia humana. Estas tareas incluyen el aprendizaje, la percepción, el razonamiento, la toma de decisiones, el reconocimiento de patrones, el procesamiento del lenguaje natural y la resolución de problemas.

² John McCarthy. The dartmouth conference: The birth of artificial intelligence. Dartmouth College, 1956. Coined the term "Artificial Intelligence" during the Dartmouth Conference in 1956

³ Machine Learning es una rama de la inteligencia artificial que permite a las computadoras aprender patrones y tomar decisiones a partir de datos, sin ser programadas explícitamente para cada tarea.

Learning, DL)⁴ ha revolucionado la IA, permitiendo a los modelos aprender representaciones jerárquicas de los datos, lo que ha llevado a un aumento significativo en el rendimiento de los sistemas de IA en una amplia variedad de tareas, incluyendo la visión por computadora, el procesamiento del lenguaje natural y la robótica.

En el campo de la medicina, la IA ha demostrado ser una herramienta valiosa para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades. En particular, la visión por computadora ha sido ampliamente utilizada para el análisis de imágenes médicas, como radiografías (RX)⁵, tomografías computarizadas (TC)⁶ y resonancias magnéticas (RM)⁷. La detección y clasificación de enfermedades a partir de imágenes médicas es una tarea compleja que requiere una gran cantidad de conocimientos y experiencia. Los radiólogos, por ejemplo, deben examinar cuidadosamente las imágenes para identificar patrones y anomalías que puedan indicar la presencia de enfermedades. Sin embargo, este proceso es lento y propenso a errores, ya que los radiólogos pueden pasar por alto detalles importantes o malinterpretar los resultados. La IA puede ayudar a superar estos desafíos, ya que los modelos de aprendizaje profundo pueden aprender a detectar patrones sutiles en las imágenes que pueden ser difíciles de detectar para los humanos. Además, los modelos de IA pueden analizar grandes volúmenes de datos en poco tiempo, lo que puede acelerar el proceso de diagnóstico y tratamiento.

El avance más significativo se produjo con la introducción del aprendizaje profundo (Deep Learning), impulsado por tres factores:

1. El incremento en la capacidad de cómputo, especialmente con las unidades de procesamiento gráfico (GPUs), que han permitido entrenar modelos más complejos en tiempos reducidos [3].
2. La enorme cantidad de datos disponibles hoy en día, gracias a internet, redes sociales, sensores y todo tipo de dispositivos conectados, lo que ha dado a los modelos muchísimo material para aprender y mejorar [4].
3. Las constantes mejoras en los algoritmos y en las estructuras de las redes neuronales, que han hecho que estos modelos no solo sean más precisos, sino también más capaces de adaptarse a situaciones nuevas y resolver problemas cada vez más complejos [5].

En el campo de la medicina, la IA ha transformado por completo la forma en la que se aborda el diagnóstico, el tratamiento e incluso la investigación. Uno de los ámbitos donde más impacto ha tenido la IA es en el análisis de imágenes médicas, donde las redes neuronales convolucionales (CNNs)⁸ han demostrado ser muy eficaces. Utilizan capas convolucionales para extraer características locales y jerárquicas, lo que las hace muy efectivas en tareas de visión por computadora, como clasificación de imágenes, detección de objetos y segmentación. Este tipo de redes son capaces de analizar imágenes médicas de forma automática, además de realizar tareas de detección, clasificación y segmentación de estructuras anatómicas con niveles de exactitud y

⁴ Deep Learning es una subárea del machine learning que utiliza redes neuronales artificiales con múltiples capas para aprender representaciones complejas de datos. Es especialmente efectivo en tareas como reconocimiento de imágenes, procesamiento de lenguaje natural y predicciones avanzadas.

⁵ Las radiografías utilizan rayos X para crear imágenes de estructuras internas del cuerpo, especialmente huesos. Los rayos X atraviesan el cuerpo y son absorbidos en diferentes cantidades por los tejidos, creando una imagen en blanco y negro.

⁶ La tomografía computarizada combina múltiples imágenes de rayos X tomadas desde diferentes ángulos para crear imágenes detalladas en cortes transversales (axiales) del cuerpo. A menudo se usa un medio de contraste para mejorar la visibilidad de ciertos tejidos.

⁷ La resonancia magnética utiliza campos magnéticos y ondas de radio para generar imágenes detalladas de los tejidos blandos, órganos y estructuras internas. No utiliza radiación ionizante.

⁸ CNN (Convolutional Neural Networks, Redes Neuronales Convolucionales) son un tipo de red neuronal profunda diseñada específicamente para procesar datos estructurados en forma de cuadrícula, como imágenes.

precisión similares a los de especialistas humanos en determinadas aplicaciones [6].

Algunos modelos de aprendizaje automático han sido implementados en la identificación temprana de patologías como el cáncer, la retinopatía diabética y enfermedades neurodegenerativas, mejorando así las tasas de detección precoz. Además, la integración de la IA con sistemas de historial clínico permite proporcionar recomendaciones terapéuticas basadas en datos de pacientes, optimizando la toma de decisiones y reduciendo errores médicos. La capacidad de estos sistemas para analizar grandes volúmenes de información ha facilitado la identificación de patrones en datos genómicos y moleculares, impulsando avances en la medicina personalizada y el descubrimiento de nuevos fármacos.

La capacidad de los algoritmos para identificar patrones invisibles al ojo humano ha revolucionado la radiología y otras disciplinas médicas, permitiendo diagnósticos más precisos y la detección temprana de patologías [7]. Tecnologías como U-Net [8], nnU-Net [9] y Transformers en visión médica [10] han mejorado la segmentación automática de tejidos y órganos, mientras que otros modelos basados en redes profundas han permitido la clasificación automática de imágenes en modalidades como radiografías (RX), tomografías computarizadas (TC) y resonancias magnéticas (RM).

Además, la integración de la IA en el ámbito clínico ha abierto nuevas posibilidades en la planificación quirúrgica personalizada, permitiendo a los cirujanos acceder a reconstrucciones tridimensionales precisas de la anatomía del paciente. Estos avances han mejorado la seguridad y la eficiencia de los procedimientos quirúrgicos, reduciendo el margen de error y optimizando la preparación preoperatoria [11].

A pesar de los logros alcanzados, persisten desafíos importantes en la implementación clínica de la IA, incluyendo la necesidad de bases de datos de alta calidad, la validación regulatoria de los modelos y la interpretabilidad de los resultados [12]. El presente trabajo busca abordar estos desafíos mediante el desarrollo de una herramienta basada en IA para la clasificación y segmentación automatizada de imágenes de RM en pacientes oncológicos, con el fin de mejorar la precisión diagnóstica y optimizar la planificación quirúrgica.

1.2 *Principios de las Imágenes Médicas y la Resonancia Magnética*

1.2.1 *Imágenes Médicas*

Las imágenes médicas desempeñan un papel fundamental en la práctica clínica y la investigación biomédica, permitiendo la evaluación no invasiva de la anatomía y fisiología del cuerpo humano. Existen diversas modalidades de adquisición de imágenes médicas, cada una con aplicaciones específicas según el tipo de tejido o patología a evaluar. Entre las principales técnicas se encuentran:

- Radiografía (RX): Basada en la atenuación diferencial de los rayos X, es ampliamente utilizada para el diagnóstico de fracturas óseas y patologías pulmonares [13].
- Tomografía Computarizada (TC): Emplea múltiples proyecciones de rayos X para generar imágenes seccionales del cuerpo, permitiendo una mejor caracterización de estructuras óseas y tejidos blandos [14].
- Ultrasonido (US): Utiliza ondas sonoras de alta frecuencia para obtener imágenes en tiempo real, siendo de gran utilidad en obstetricia, cardiología y evaluación de tejidos superficiales [15].
- Medicina Nuclear (PET y SPECT): Requiere la administración de radiofármacos que emiten radiación gamma, permitiendo el estudio de procesos metabólicos y la detección de enfermedades como el cáncer [16].
- Resonancia Magnética (RM): Basada en la interacción entre un campo magnético externo y los protones presentes en los tejidos, es una técnica avanzada que ofrece imágenes de alta resolución sin el uso de radiación ionizante [17].

Entre estas modalidades, la Resonancia Magnética (RM) ha demostrado ser especialmente útil en la evaluación de tejidos blandos, permitiendo la identificación de estructuras anatómicas con un alto nivel de detalle [18]. A diferencia de otras técnicas de imagen como la tomografía computarizada (TC) o las radiografías, la RM no emplea radiación ionizante, lo que la convierte en una opción más segura para el seguimiento a largo plazo de pacientes, especialmente aquellos con enfermedades crónicas o en poblaciones vulnerables como niños y embarazadas [19]. Su capacidad para generar distintos contrastes mediante variaciones en los parámetros de adquisición permite resaltar diferencias sutiles entre tejidos sanos y patológicos, lo que resulta fundamental en el diagnóstico y seguimiento de enfermedades neurológicas, musculoesqueléticas y oncológicas. En el ámbito de la oncología, la RM juega un papel clave en la detección y caracterización de tumores, facilitando la evaluación de su extensión y respuesta al tratamiento sin exponer al paciente a dosis acumulativas de radiación. Además, su aplicación en técnicas avanzadas como la RM funcional y la espectroscopía por RM ha permitido el análisis de la actividad metabólica de los tejidos, proporcionando información valiosa para la planificación quirúrgica y la personalización de terapias en pacientes oncológicos.

1.3 Principios de RM

La Resonancia Magnética (RM) es una técnica de imagen no invasiva que se basa en la interacción entre un campo magnético externo y los protones presentes en los tejidos del cuerpo. Al someter al paciente a un campo magnético estático (B_0) y a pulsos de radiofrecuencia (RF) en presencia de gradientes magnéticos, se generan

señales que son captadas por una antena receptora y transformadas en imágenes mediante un proceso de reconstrucción computarizado [20]. La RM ofrece una excelente resolución espacial y contraste entre tejidos blandos, lo que la convierte en una herramienta valiosa para la evaluación de estructuras anatómicas y la detección de patologías en diversas áreas del cuerpo. Entre las aplicaciones más comunes de la RM se encuentran la evaluación del sistema nervioso central, el aparato musculoesquelético y la mama, así como la detección y caracterización de tumores en diferentes órganos [21].

A continuación, como se muestra en la Figura 1.1 se emite un pulso de radiofrecuencia (RF) con una frecuencia específica (frecuencia de Larmor), lo que provoca que los protones absorban energía y cambien su alineación. Cuando cesa la excitación, los protones regresan a su estado de equilibrio, emitiendo señales electromagnéticas que son captadas por las antenas del equipo de RM [22]. Estas señales son procesadas mediante algoritmos de reconstrucción para generar imágenes en dos o tres dimensiones, que pueden ser visualizadas por el radiólogo en un monitor de computadora. La información obtenida en las imágenes de RM se basa en la distribución espacial de los protones en los tejidos, así como en sus propiedades magnéticas y de relajación, lo que permite obtener información detallada sobre la anatomía y fisiología del cuerpo humano [23].⁹

1.4 Objetivos de la Investigación

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un sistema de inteligencia artificial basado en redes neuronales convolucionales (CNNs) para la clasificación y segmentación automatizada de imágenes de resonancia magnética (RM) en pacientes oncológicos. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Recopilar y preprocesar un conjunto de datos de imágenes de RM de pacientes oncológicos, incluyendo imágenes de tumores y tejidos sanos.
2. Implementar un modelo de CNN para la clasificación de imágenes de RM en tejidos sanos y patológicos, evaluando su rendimiento en términos de precisión, sensibilidad y especificidad.
3. Desarrollar un modelo de CNN para la segmentación de tumores en imágenes de RM, evaluando su capacidad para delimitar con precisión las regiones de interés.
4. Integrar los modelos de clasificación y segmentación en una interfaz de usuario interactiva que permita la visualización y análisis de los resultados.
5. Validar los modelos de IA en un conjunto de datos independiente, comparando sus resultados con los de especialistas humanos en radiología.

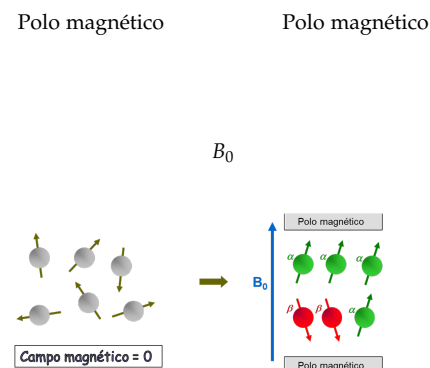


Figura 1.1: <https://radiodiagnostico.com/2016/06/13/rm-introduccion-a-conceptos-basicos-definicion-de-spin/>

⁹ Stefanos D. Kollias, Andreas Stafylopatis, Wlodzislaw Duch, and Erkki Oja, editors. *Artificial Neural Networks - ICANN 2006, 16th International Conference, Athens, Greece, September 10-14, 2006. Proceedings, Part I*, volume 4131 of *Lecture Notes in Computer Science*, 2006. Springer. ISBN 3-540-38625-4

1.5 Estructura del Trabajo Fin de Grado

El presente trabajo se estructura en cinco capítulos, cada uno de los cuales aborda aspectos específicos del desarrollo del sistema de inteligencia artificial para la clasificación y segmentación de imágenes de resonancia magnética en pacientes oncológicos. A continuación, se describen los contenidos de cada capítulo:

1. **Introducción:** En este capítulo se presenta una introducción general a la inteligencia artificial y su aplicación en medicina, así como los principios de las imágenes médicas y la resonancia magnética. Se describen los objetivos de la investigación y la estructura de la tesis.
2. **Estado del Arte:** Se abordan los fundamentos teóricos de la inteligencia artificial, el aprendizaje profundo y las redes neuronales convolucionales, así como los principios de las imágenes de resonancia magnética y su aplicación en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades.
3. **Metodología:** Se describe la metodología utilizada en el desarrollo del sistema de inteligencia artificial, incluyendo la recopilación y preprocesamiento de datos, la implementación de modelos de CNN para clasificación y segmentación, y la evaluación de los resultados.
4. **Resultados:** Se presentan los resultados obtenidos en la implementación de los modelos de CNN para la clasificación y segmentación de imágenes de resonancia magnética, así como su validación en un conjunto de datos independiente.
5. **Conclusiones y Trabajo Futuro:** Se presentan las conclusiones del trabajo realizado, así como las limitaciones y posibles mejoras para futuras investigaciones en el campo de la inteligencia artificial aplicada a la medicina.

Bibliografía

Stefanos D. Kollias, Andreas Stafylopatis, Wlodzislaw Duch, and Erkki Oja, editors. *Artificial Neural Networks - ICANN 2006, 16th International Conference, Athens, Greece, September 10-14, 2006. Proceedings, Part I*, volume 4131 of *Lecture Notes in Computer Science*, 2006. Springer. ISBN 3-540-38625-4.

John McCarthy. The dartmouth conference: The birth of artificial intelligence. Dartmouth College, 1956. Coined the term "Artificial Intelligence" during the Dartmouth Conference in 1956.