

La era de la inteligencia artificial radiológica

Angely Rocío Jiménez Insuasti¹  Randol Karami Silva Bermudez²  Pedro Angel Nieto Manrique³  Héctor Daniel Alejandro Cotrino Palma⁴  Brenda Bohorquez de la Hoz⁵ 

1 Angely Rocío Jiménez Insuasti*, Universidad de Nariño, angely_rocio_jimenez@hotmail.com

2 Randol Karami Silva Bermudez, Universidad del Cauca, rksilva@unicauca.edu.co

3 Pedro Angel Nieto Manrique, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, angelnietomed@gmail.com

4 Héctor Daniel Alejandro Cotrino Palma, Fundación Univerditaria Sanitas, danielcotrino19@gmail.com

5 Brenda Bohorquez de la Hoz, Universidad del Sinú- Cartagena, bhd_15@hotmail.com

Historia del Artículo:

Recibido el 15 de octubre de 2020

Aceptado el 09 de diciembre de 2021

On-line el 20 de enero de 2022

Palabras Clave: Inteligencia artificial, Aprendizaje automático, Radiología, Aprendizaje profundo, Radiólogos.

Keywords: Artificial Intelligence, Machine Learning, Radiology, Deep Learning, Radiologists.

Resumen

La inteligencia artificial constituye uno de los avances más notorios en el campo de la radiología en los últimos años. Los algoritmos de inteligencia artificial pueden aplicarse a distintas problemáticas dentro de la especialidad, convirtiéndose en un apoyo para el clínico. La capacidad superior de la inteligencia artificial para la realización de ciertas actividades ha provocado un ambiente de desconfianza entre los profesionales de la salud y entre la población de pacientes que podría intervenir en la implementación de esta tecnología dentro del campo de la radiología. En esta revisión se explorará el papel del profesional en radiología en un ámbito con una gran influencia procedente de la inteligencia artificial.

Abstract

Artificial intelligence is one of the most notorious advances in the field of radiology in recent years. Artificial intelligence algorithms can be applied to different problems within the specialty, becoming a support for the clinician. The superior capacity of artificial intelligence to carry out certain activities has caused an atmosphere of distrust among health professionals and among the patient population that could intervene in the implementation of this technology within the field of radiology. This review will explore the role of the professional in radiology in a field with a great influence from artificial intelligence.

* Autor para correspondencia:

Angely Rocío Jiménez Insuasti, Universidad de Nariño, e-mail: angely_rocio_jimenez@hotmail.com

Cómo citar:

Jiménez et al. La era de la inteligencia artificial radiológica. S&EMJ. Año 2022; Vol.5: 85-100.

Introducción

Teniendo en cuenta que la radiología es una rama de la medicina que va de la mano con los avances tecnológicos, se hace indispensable para el profesional conocer estas herramientas, manejarlas e implementarlas en su práctica diaria.

La aplicación de la inteligencia artificial en este campo se convierte en un tema de debate, en tanto la necesidad de aprovechar las fortalezas de la misma se vuelve en incertidumbre frente al impacto en el desempeño del radiólogo, posiblemente reemplazado por esta nueva tecnología, creando desconfianza y recelo en el uso de la misma, y poniendo a prueba el liderazgo del profesional. Todo este ambiente repercute en el desarrollo del trabajo, la enseñanza y aprendizaje de los residentes en radiología, la percepción del profesional sobre sí mismo y sobre su autonomía, y la percepción de los pacientes sobre el profesional y su "utilidad" y precisión como galeno frente a la máquina. Sin embargo, las aplicaciones de la IA se vuelven necesarias al permitir el manejo de grandes cantidades de datos en un menor tiempo, por lo que es imperativo dominarlas para evitar el estancamiento de la profesión.

Objetivo

Identificar el rol del radiólogo en su ejercicio asociado a la implementación de la inteligencia artificial como parte de la evolución tecnológica de la especialidad.

Método

Se realizó una búsqueda sistemática de literatura, entre enero del 2019 a diciembre del 2021, en las bases de PubMed, ScienceDirect, Radiological society of North América (RSNA), SCIELO, y Google académico, con los términos MeSH (Medical Subject Headings): Artificial intelligence, Machine learning, Radiology, Deep learning, Radiologist, y con los no MeSH: Inteligencia artificial vs inteligencia humana, futuro de la radiología, rol del radiólogo. Se consideraron 335 artículos tipo revisión sistemática de literatura, investigaciones originales (cualitativas), estudios de casos, estudios controlados aleatorizados, y estudios comparativos. En total se incluyeron 49 artículos en la presente revisión relacionados con el lugar del radiólogo como profesional en los tiempos de la inteligencia artificial como herramienta para apoyo clínico, así como las consecuencias de esta introducción tecnológica y las perspectivas de los profesionales y pacientes.

Resultados y conclusiones

La radiología va de la mano con los avances tecnológicos, entre los cuales se destaca la aplicación de la inteligencia artificial para diversas

actividades de la profesión, lo que vuelve necesario que el profesional de esta área se convierta en un experto en el tema, con el fin de ser capaz de hacer un uso extensivo de sus aplicaciones, especialmente en el manejo del tiempo de procesamiento de resultados y la precisión diagnóstica, y de liderar la introducción de esta tecnología en la medicina.

Introduction

Considering that radiology is a branch of medicine that goes hand in hand with technological advances, it is essential for the professional to know these tools, manage them and implement them in their daily practice.

The application of artificial intelligence in this field becomes a topic of debate, while the need to take advantage of its strengths becomes uncertain about the impact on the performance of the radiologist, possibly replaced by this new technology, creating distrust and suspicion in the use of it, and testing the leadership of the professional. All this environment has an impact on the development of work, the teaching and learning of residents in radiology, the perception of the professional about himself and his autonomy, and the perception of patients about the professional and his "usefulness" and precision as a doctor in front of the machine. However, AI applications become necessary by allowing the handling of large amounts of data in a shorter time, so it is imperative to master them to avoid professional stagnation.

Objective

Identify the role of the radiologist in his practice associated with the implementation of artificial intelligence as part of the technological evolution of the specialty.

Method

A systematic literature search was carried out, between January 2019 and December 2021, in the databases of PubMed, ScienceDirect, Radiological society of North America (RSNA), SCIELO, and Google Scholar, with the terms MeSH (Medical Subject Headings): Artificial intelligence, Machine learning, Radiology, Deep learning, Radiologists, and with the non-MeSH: Artificial intelligence vs human intelligence, future of radiology, role of the radiologist. We considered 335 articles such as systematic literature review, original (qualitative) research, case studies, randomized controlled studies, and comparative studies. In total, 49 articles were included in this review related to the place of the radiologist as a professional in the times of artificial intelligence as a tool for clinical support, as well as the consequences of this technological introduction and the perspectives of professionals and patients.

Results and conclusions

Radiology goes hand in hand with technological advances, among which the application of artificial intelligence for various activities of the profession stands out, which makes it necessary for the professional in this area to become an expert in the subject, in order to be able to make extensive use of its applications, especially in the management of the processing time of results and diagnostic accuracy, and to lead the introduction of this technology in medicine.

Contextualización del tema

La radiología es una profesión que se basa en tecnología que permite la visualización de imágenes (1) por lo que se convierte en susceptible de cualquier avance tecnológico en este campo de forma más precoz que otras áreas de la medicina (2), siendo influenciado por la aparición de nuevas oportunidades de desempeño en la práctica (1), y, debido a que la radiología no se dedica exclusivamente a la lectura de imágenes diagnósticas (3), los algoritmos de inteligencia artificial pueden aplicarse en múltiples problemas diagnósticos (4).

Por lo anterior, se ha creado un ambiente de ambiente de ansiedad y desconfianza respecto al posible desplazamiento o reemplazo de los radiólogos en el ámbito clínico, basado en la idea de que los algoritmos de inteligencia artificial pueden realizar el trabajo de un especialista de forma más rápida y barata (3).

El término "inteligencia artificial" se refiere a un conjunto de teoría y sistemas computacionales que son capaces de realizar actividades que normalmente requerirían habilidades propias de la inteligencia humana, como la percepción visual, reconocimiento de voz, toma de decisiones y predicción (1).

En los últimos años se ha visto un desarrollo rápido de aplicaciones de la inteligencia artificial adaptadas a la imagenología diagnóstica (1, 5), lo que ha impactado las capacidades del radiólogo en su práctica clínica (5) al influir en aspectos como la digitalización de datos de los pacientes, el apoyo en la toma de decisiones clínicas (6), o el acortamiento en los tiempos de lectura y la precisión con la que esta se realiza, dado que la valoración a nivel de píxeles de las imágenes digitalizadas está más allá de la capacidad del ojo humano (7). Sin embargo, este desarrollo no se centra solo en la tecnología de imagen, si no, también en la adopción de algoritmos en los equipos de procesamiento y revisión de imágenes (1).

A pesar de que se reconoce el potencial impacto positivo de la inteligencia artificial en la reducción de costos en los sistemas de salud y de la eficiencia

en los departamentos de radiología (4), aún hay desconocimiento sobre la forma en la que será introducida en la práctica radiológica actual, especialmente porque es un recurso que requiere grandes cantidades de datos y equipos adecuados para su uso, lo que daría pie a un despliegue inequitativo de las tecnologías, con segregaciones por países, regiones, o subgrupos sociales (8), así que, es evidente que se presentarán barreras para su implementación adecuada (9). Por otro lado, hay dudas entre los pacientes en cuanto al uso de esta tecnología en los procesos de escaneo y lectura de imágenes (10), por lo que se ha propuesto que el radiólogo participe activamente en los procesos de desarrollo de aplicaciones de la inteligencia artificial en su campo, ya que son expertos y su contribución puede mejorar la confianza en el uso de la IA entre los demás médicos y los pacientes (5).

Los profesionales en radiología han demostrado su liderazgo en cuanto aparecen las innovaciones tecnológicas, así que se deduce que ningún otro campo de la medicina se encuentra mejor calificado para confrontar los desafíos que propone la implementación de la inteligencia artificial (11). Acorde a esto, actualmente el consenso parece estar a favor del apoyo de la inteligencia artificial hacia las tareas del radiólogo, sin llegar a reemplazarlo (3), ya que se espera que se convierta en un apoyo y permita optimizar el trabajo mejorando la eficiencia y precisión del proceso diagnóstico (12). En esta revisión narrativa se discuten las actividades que le competen al radiólogo bajo la premisa de que el dominio de la influencia de la inteligencia artificial será clave en la práctica clínica futura, así como el impacto que los avances tecnológicos tienen entre los profesionales, los estudiantes y los pacientes.

Historia

La inteligencia artificial se considera el tercer paso en la revolución tecnológica, siendo el primero el almacenamiento de cantidades ilimitadas de datos organizados (computación), y el segundo su comunicación instantánea (internet). Jhon McCarthy fue el primero en acuñar el término "inteligencia artificial" durante el Proyecto de investigación de verano de Dartmouth sobre inteligencia artificial en 1956 (7). Sin embargo, el concepto de "cerebros artificiales" se atribuye a los pioneros de la computación: Alan Turing y Konrad Zuse (13), e incluso, se podría decir que la inteligencia artificial pudo tener sus raíces en el tercer siglo en China, con la mención de la invención de los robots.

El desarrollo de la inteligencia artificial se ha basado en la introducción de tecnologías que se han optimizado progresivamente, incluyendo las redes neuronales artificiales y los posteriores modelos de aprendizaje automático y profundo

(12). Entre 1980 y 1990 se produjo una disminución en el progreso de los sistemas de inteligencia artificial, debido a una reducción en los fondos, por lo que, aproximadamente, 300 compañías dedicadas al desarrollo de tecnologías de este tipo fueron cerradas (14). En 1998, Lecun desarrolló su red neuronal convolucional; pero los métodos basados en el aprendizaje profundo solo recibieron reconocimiento amplio hasta el 2012, cuando Krizhevsky y Hinton usaron con éxito a AlexNet, una red neuronal convolucional que superó a otras técnicas clásicas de aprendizaje automático en el reto ImageNet, y ahora se consideran el estado del arte en cuanto a procesamiento y análisis de imágenes (15).

La cantidad de trabajo de los radiólogos ha aumentado sustancialmente en los últimos 25 años. Entre 1991 y 2007, la carga laboral anual aumentó un 34%. Entre 1998 y 2010 el número de imágenes diagnósticas interpretadas por un residente de radiología aumentó en un 26% por cada uno. Este aumento se dio por un crecimiento en la complejidad de los servicios de imagenología con la inclusión del ultrasonido, tomografía, y resonancia magnética, con un crecimiento del 49.7%, 129.1% y 132% respectivamente, mientras el número de

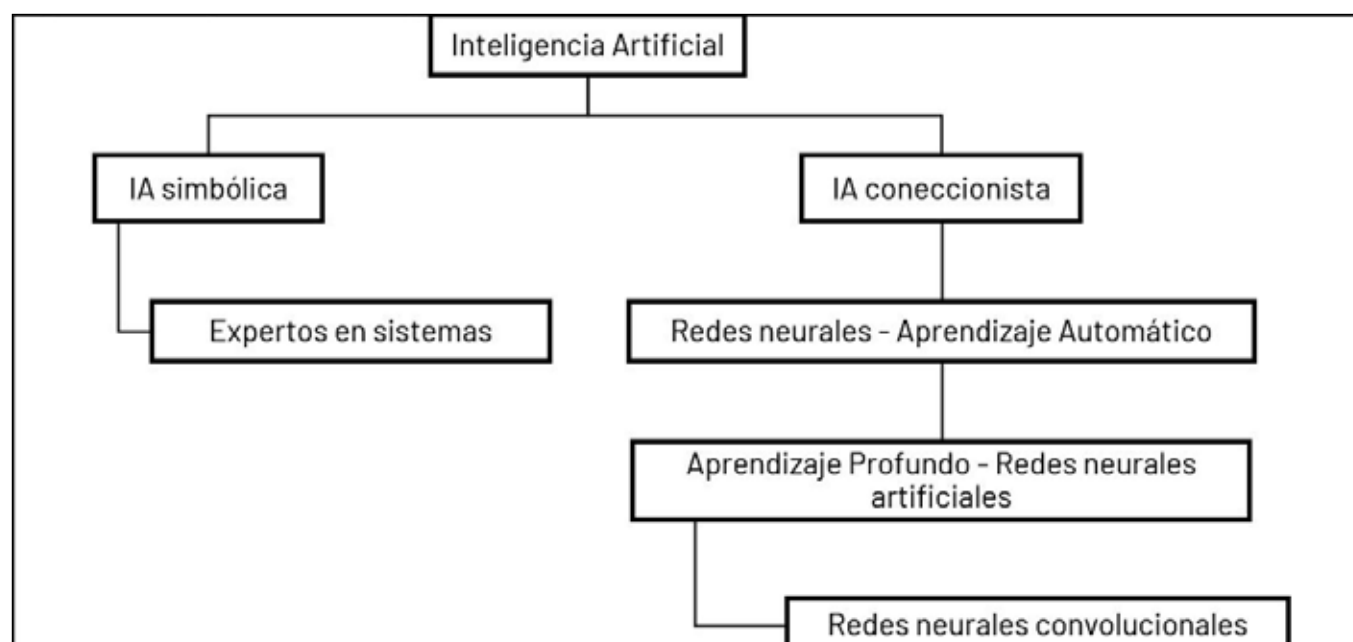
imágenes radiográficas clásicas decreció en un 8.1% (11). El desarrollo de inteligencias artificiales para soporte clínico se ha aceptado durante cerca de 20 años en el campo de la radiología, ya que se ha usado ampliamente en el análisis de imágenes y diagnóstico (16).

La inteligencia artificial en la radiología

La radiología como profesión susceptible a los avances tecnológicos

En la última década la inteligencia artificial (IA) se ha abierto campo en la radiología con diversas aplicaciones (3, 17, 18) en los procesos de diagnóstico basados en los algoritmos de aprendizaje automático (*Machine Learning* (ML)) y el aprendizaje profundo (*Deep Learning* (DL)) (15), lo que se ha traducido en herramientas de apoyo para los radiólogos (19), constituyéndose como uno de los avances más importantes en la radiología (9). Sin embargo, en la misma proporción de aparición de estas aplicaciones de soporte se ha aumentado la disponibilidad de tecnología de imagenología de alta resolución y su uso (19), e, igualmente, la carga laboral de los radiólogos (1, 19) quienes usualmente son receptivos frente a los avances tecnológicos

Figura 1: Jerarquías en la inteligencia artificial.



Fuente: Basado en Soffer S, et al. *Convolutional Neural Networks for Radiologic Images: A Radiologist's Guide*, 2019, y de Alsuliman T, Humaidan D, Sliman L. *Machine learning and artificial intelligence in the service of medicine: ¿Necessity or potentiality?*, 2020 (15, 6).

Tabla 1: Glosario de términos relacionados con inteligencia artificial.

TÉRMINO	DEFINICIÓN
Inteligencia artificial	Un concepto amplio que describe sistemas automatizados que pueden realizar tareas comúnmente asociadas a la inteligencia humana
Procesamiento de lenguaje natural	Un subcampo de la IA centrado en permitir a los computadores identificar, entender y clasificar las frases o palabras que aparecen en los textos

Visión por computador	Un subtipo de IA que provee al computador la habilidad de identificar, procesar y clasificar imágenes en una forma similar a la visión humana
Reconocimiento de voz	Un subcampo de la IA que usa algoritmos para identificar frases o palabras en el lenguaje hablado y las convierte en formato de texto
Optimización y planeamiento	Un subcampo de la IA que se centra en la realización de estrategias o secuencias de acción para alcanzar una meta en específico
Aprendizaje automático	Estudio de algoritmos que pueden aprender de datos y hacer predicciones
Aprendizaje profundo	Un algoritmo particular de aprendizaje automático que se compone principalmente de redes neurales enormes e intrincadas
Redes neurales convolucionales	Un subtipo de aprendizaje profundo usado para analizar datos con un patrón específico capaz de aprender de forma adaptativa con jerarquías espaciales de niveles más bajos a más altos en cuanto a la organización de características
Aprendizaje supervisado	Modelado con etiquetado de datos
Aprendizaje no supervisado	Modelado con datos sin etiquetar
Aprendizaje por transferencia	Modelado a través de algoritmos previamente entrenados con modificaciones
Aprendizaje por refuerzo	Una parte del aprendizaje automático que permite a un agente externo aprender una tarea específica en un ambiente interactivo, basado en ensayo y error, y aplica una retroalimentación continua basada en su experiencia
Modelo	Estructura de datos matemáticos creados con algoritmos de aprendizaje automático que pueden predecir y mejorar
Regresión	Predicción de datos numéricos
Clasificación	Predicción de datos categóricos
Parámetro	Valor en modelos usualmente específicos de un algoritmo que se establece de acuerdo con los datos usados, sin intervención externa
Hiperparámetro	Valores de alto nivel en modelos únicos a algoritmos que pueden ser alterados por operadores externos
Modificación de hiperparámetros	Proceso de hallar los mejores hiperparámetros en el modelado
Datos de entrenamiento	Datos usados en el desarrollo de modelos
Datos de validación	Datos usados para modificar el modelo y abordar generalizabilidad interna
Datos de evaluación	Grupo de datos desconocidos usados para evaluar la generalizabilidad
Datos masivos	Toda la información, radiológica o no, que, debido a su amplio volumen y variedad, es muy compleja para ser manejada y analizada con software convencional
Radiómica	Un subcampo del aprendizaje automático dedicado a la extracción de propiedades cuantitativas de imágenes radiológicas usando algoritmos específicos que permiten obtener información más allá del análisis médico convencional
Etiqueta	Objetivos en estándares de referencia que los algoritmos de aprendizaje profundo intentan predecir
Estándar de referencia	Valores verdaderos o datos contra los que se genera el modelo propuesto
Sesgo	Diferencia entre la predicción y los valores actuales que ocurre cuando los modelos de predicción son sistemáticamente perjudicados por asunciones imprecisas
Desviación	Nivel de variabilidad entre las predicciones y los valores reales
Sobreajuste	Error de modelado que muestra alto entrenamiento y pobre desempeño en evaluación
Infrajuste	Error de modelado que muestra pobre entrenamiento y desempeño en evaluación.
Validación cruzada	Un método de validación generalmente usado en la fase de entrenamiento sin superposición entre las partes de validación
Validación independiente	Evaluación de la generalidad final usando instancias no conocidas
Regularización	Métodos para reducir el sobreajuste como el aumento, interrupción anticipada, métodos de conjuntos, regularización de parámetros
Reducción de dimensiones	Proceso de reducción del número de características usando métodos específicos como un algoritmo basado en selección de características
Selección de características	Selección de características relevantes con algoritmos particulares

Fuente: Basado en Noguero M, et al. *Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats Analysis of Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in Radiology*, 2019, y de Kocak B, Kus EA, Kilickesmez O. *How to read and review papers on machine learning and artificial intelligence in radiology: a survival guide to key methodological concepts*, 2021(26, 27).

siempre que haya posibilidad de mejora en el cuidado de la salud de sus pacientes, ya que estas mejoras pueden impactar sus responsabilidades en cuanto al diagnóstico (1), siendo la autonomía de la máquina un punto a manejar por parte del operador, quien complementaría el sistema tecnológico con la inteligencia humana.

Los avances relacionados con la inteligencia artificial son, indudablemente, impactantes en el área de la salud, por lo que se ha intensificado la investigación en este ámbito (20, 15). Sin embargo, la transformación que trae esta tecnología ha sido de desarrollo e implementación más lentos de lo esperado, posiblemente por periodos pasados en los que no hubo grandes avances, conocidos como periodos de "inviernos de la IA" (21). Las mejoras producto de la introducción de la IA se expanden a muchos aspectos, como la digitalización de los datos de las personas (6), que mejorarían la calidad de la atención por parte de los radiólogos y su equipo (22). Pese a esto, es prudente balancear el interés en estas tecnologías con un poco de escepticismo para entender las capacidades técnicas y limitaciones de la IA antes de aplicarla directamente en el cuidado de los pacientes (17).

¿Por qué hablar de inteligencia artificial?

La IA se compone de una serie de algoritmos de computador puestas a realizar tareas como aprender o solucionar problemas (10, 6), que usualmente requieren el uso de inteligencia humana (15, 10, 23) ya que la IA procesa grandes cantidades de información, memoriza y aplica mejor las reglas lógicas, aunque carece de otros componentes propios de la inteligencia humana como conciencia, empatía, subjetividad, intuición, y adaptación a situaciones inusuales (7). De esta forma, se podría decir que estos sistemas pueden ver, oír, leer, razonar y actuar casi por sí mismos, porque pueden aprender a tomar decisiones al enfrentarse a nuevas situaciones y refinar su lógica (2, 24).

Se ha visto que hay un desempeño similar o mejor por parte de la IA en algunas tareas con respecto a la inteligencia humana (10). Estos algoritmos pueden representarse como una matrioska en la que la IA involucra los abordajes simbólico y conexionista, siendo el aprendizaje automático la rama conexionista que combina los campos biológicos (redes neurales) y estadísticos (teoría del aprendizaje basado en datos), y el aprendizaje profundo que se centra en redes neurales a gran escala con

Tabla 2: Estilos de aprendizaje en inteligencia artificial.

ESTILO DE APRENDIZAJE	ALGORITMOS COMUNES /MÉTODOS	EJEMPLOS
ESTRUCTURAS BÁSICAS DE APRENDIZAJE		
Aprendizaje supervisado	Regresión lineal o logística Árboles de decisión Máquina de vectores de soporte Redes neurales convolucionales Redes neurales recurrentes	Diagnóstico de cáncer Segmentación de órganos Denotación de dosis de radioterapia Predicción de dosis de radioterapia Conversión entre modalidades de imagen
Aprendizaje no supervisado	Codificadores automáticos Reducción de dimensionalidad Agrupación	Tareas de adaptación a dominios Clasificación de grupos de pacientes Reconstrucción de imágenes
Aprendizaje por refuerzo	"Q-learning" Procesos de decisión de Markov	Segmentación de tumores Reconstrucción de imágenes Planeación de tratamientos
ESTRUCTURAS HÍBRIDAS DE APRENDIZAJE		
Aprendizaje semi supervisado	Redes neurales adversarias	Clasificación de tumores Segmentación de órganos Generación sintética de imágenes
Aprendizaje auto supervisado	Tarea de preparación: extracción de fragmentos basada en la distorsión, el color o la intensidad	Clasificación de imágenes o segmentación
ESTRATEGIAS DE APRENDIZAJE		
Aprendizaje por transferencia	Inductiva Transductiva No supervisada	Predicción de toxicidad de radioterapia Adaptación a diferentes prácticas clínicas Mejorar la generalización del modelo
Aprendizaje en conjunto	"AGGREGATING"(bosques aleatorios)	Predicción de dosis de radioterapia Estimación de incertidumbre Estratificación de pacientes

Fuente: Tomado de Barragán-Montero A, et al. *Artificial intelligence and machine learning for medical imaging: A technology review*, 2021(25).

especificaciones funcionales para procesamiento de imágenes, sonidos, videos, etc. (25). En la Figura 1 se muestra un algoritmo de las jerarquías de la IA (15, 6), y en la tabla 1 se encuentran resumidas distintas definiciones básicas relacionadas con la inteligencia artificial (26, 27).

El ML es una subclase de la inteligencia artificial que crea algoritmos con la finalidad de aprender sin necesidad de programación previa (15, 6, 27), con el objetivo de proveer a la computadora la habilidad de aprender automáticamente y ajustar sus acciones de acuerdo con los datos ingresados y los resultados obtenidos (26, 27). Aquí, el programador elige las características objetivo de la imagen (15). Es el subtipo de IA más utilizado en radiología (26, 28).

Se pueden distinguir tres categorías principales entre los algoritmos de ML: aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado, y el aprendizaje por refuerzo (6, 25, 27). En el aprendizaje supervisado el algoritmo aprende asociaciones bajo el análisis de datos revisados por un supervisor dentro de un proceso de entrenamiento. En el aprendizaje no supervisado el algoritmo estudia asociaciones en los datos sin una definición externa de las asociaciones, de forma que busca características comunes en los datos resultantes (6, 28, 27), y es posible que se relacione con la falta de información previa (28). En el aprendizaje por refuerzo el sistema aprende de

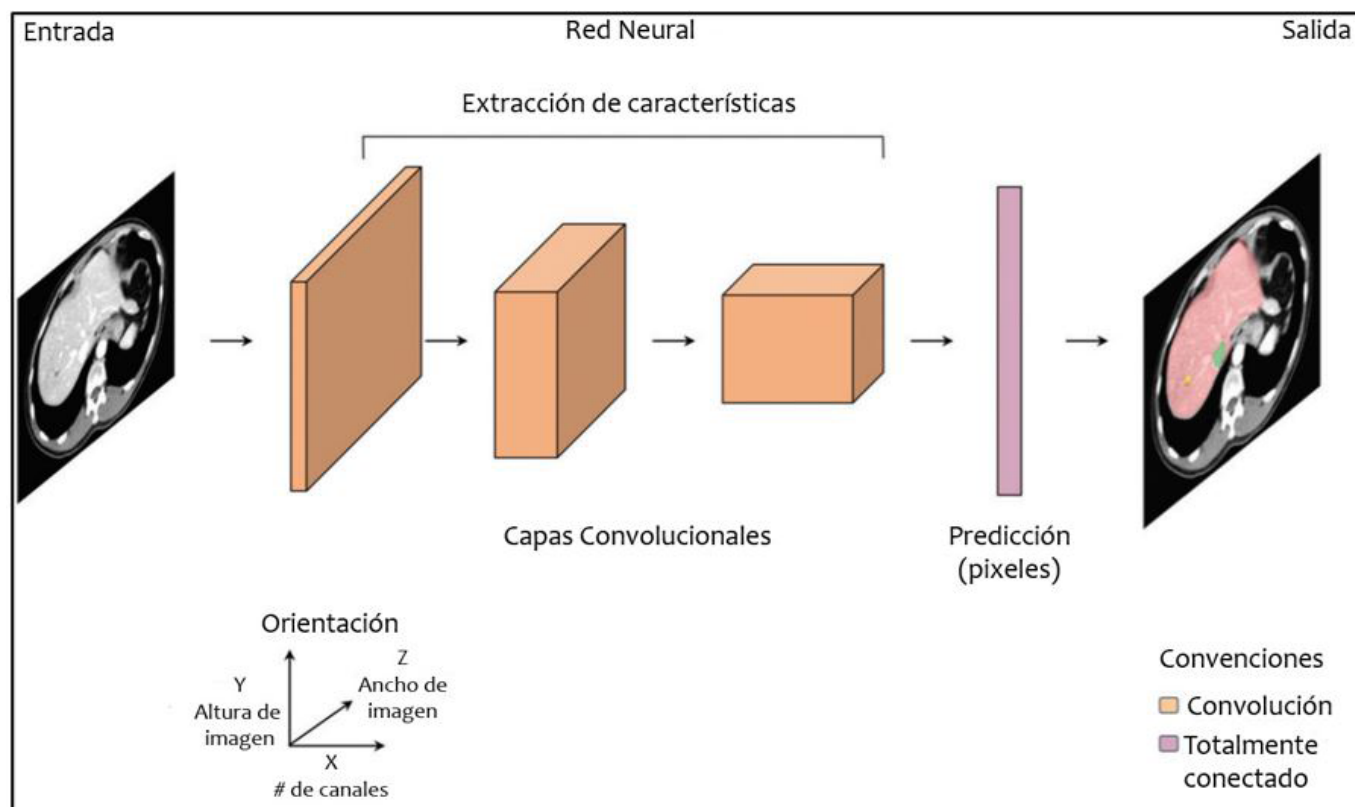
acuerdo con una señal de premio/castigo (6). En la tabla 2 se aprecian distintos estilos de aprendizajes (25).

El DL es la subclase siguiente de la IA. Aquí, el humano no realiza ninguna selección de características en la imagen (15). Se basa en el desarrollo de redes neurales artificiales (25, 23), que están inspiradas en el funcionamiento del cerebro humano (26, 17, 28), entre las cuales las más importantes son las redes neurales convolucionales (*Convolutional Neural Network* (CNN)) (15, 29).

Una red neural consiste en múltiples entradas digitalizadas que pasan a través de varias capas de "neuronas" conectadas, que progresivamente detectan características de los datos ingresados, como la forma o los bordes de la imagen, desde una capa de entrada hasta una de salida (30, 6, 23, 29), de modo que los datos de salida de algunas sean los de entrada de otras, sin interconexiones neurales entre las de la misma capa. En la figura 2 se aprecia un esquema del funcionamiento de las CNN (29).

Las CNN trabajan bajo la hipótesis de que los datos que entran son imágenes (15). Como característica es de resaltar que el humano no programa la red neural, si no solamente el número de capas que la conformarán (30). Aunque es posible explicar el proceso de una CNN con algoritmos matemáticos,

Figura 2: Esquema de funcionamiento de las redes neurales convolucionales en capas sucesivas.



Fuente: Tomado de Cheng PM, et al. *Deep Learning: An Update for Radiologists*, 2021(29).

una CCN se considera una "caja negra" porque es difícil determinar la forma en cómo llegó la red a la conclusión que nos muestra (15, 18, 23). A pesar de que las capacidades del DL han excedido ya las del ML (17), el DL usa grandes cantidades de datos para funcionar (6, 27, 23), es computacionalmente caro y es relativamente "opaco" (17), por lo que los problemas relacionados con los datos, como baja cantidad, alta dispersión y pobre calidad, pueden limitar su aprendizaje (6).

Cualquier proyecto basado en IA en radiología requiere de recolección adecuada de datos, por lo que se requeriría clasificación exhaustiva de las imágenes para tener datos suficientes para "entrenar" una IA, siendo distintos los que se usarán para validación y para prueba. Los datos de validación se usan para abordar repetidamente el desempeño del modelo durante la fase entrenamiento. Es importante que los datos de prueba no se encuentren incluidos en los de entrenamiento ni validación, de lo contrario, las medidas del desempeño serían muy optimistas (13); así, es difícil llevar a cabo el entrenamiento, usualmente por falta de datos de imágenes médicas bien etiquetadas, por lo que se suele usar la ampliación de imágenes y las técnicas de aprendizaje por transferencia (28). La clasificación manual de este tipo de datos es costosa porque, primero, se requieren enormes cantidades de información, y, segundo, el etiquetado adecuado de cada dato requiere experticia médica, lo que obliga a involucrar personal de este tipo (13).

Hay numerosas aplicaciones de la IA, que incluyen el procesamiento natural del lenguaje, reconocimiento automático de voz (26, 31, 23) y el mejoramiento actual de los sistemas de IA permite proveer mejor razonamiento y uso de los datos recogidos. El objetivo es permitirle al clínico una herramienta para soporte en la toma de decisiones para, por ejemplo, proveer diagnósticos tempranos (6). Los sistemas de soporte de decisiones clínicas (CDS por sus siglas en inglés) proveen apoyo al clínico en la toma de decisiones. La debilidad de estos sistemas radica en que se vuelve difícil operarlos cuando hay grandes cantidades de reglas en los algoritmos o cuando hay reglas que se contradicen (22).

Uso real de la inteligencia artificial en radiología

La IA tiene múltiples aplicaciones en diversos campos, como el reconocimiento de imágenes y voz en el que usa aprendizaje supervisado, con entrenamiento basado en patrones conocidos y datos etiquetados, comúnmente conocidos como "verdad absoluta" (30, 23), y la visión de computadora que puede usarse para monitorizar actividades, que en redes de salud podría aplicarse a actividades como vigilancia de lavado de manos, vigilancia de

pacientes en unidades de cuidados intensivos, vigilancia por riesgo de caídas de pacientes (30), revisión de ciertas características de la historia clínica que permitan generar una representación digital del paciente para programas de soporte clínico e identificar contraindicaciones para imagenología en la historia clínica (32, 24), así como predecir riesgo de enfermedades (24), o servir de soporte a la hora de realizar un diagnóstico proponiendo diagnósticos diferenciales (33). Se espera que casi todos los clínicos, posiblemente, estén usando IA en un futuro (30).

Los algoritmos tienen el potencial para mejorar varios pasos en el trabajo de los radiólogos, por ejemplo, en soporte de decisiones clínicas, detección e interpretación de hallazgos patológicos, postprocesado de imágenes (20, 26, 1), estimación de dosis de radiación ionizante (14), control de calidad, y reportes (20, 26, 15).

Los sistemas inteligentes automatizados propenden por mejorar la precisión, eficiencia y productividad con el fin de mejorar el cuidado de los pacientes (16, 10) al proveer cuantificación detallada de los tejidos, lo que puede ser usado para diagnóstico, pronóstico y planeación del tratamiento (10).

Usando el entrenamiento de tipo supervisado, los radiólogos podrían usar IA con datos "correctos" o "incorrectos", por ejemplo, con imágenes de rayos x (16), incluyendo neoplasias, patología del parénquima, y enfermedades infecciosas, siendo la tarea más prevalente, la detección y clasificación de nódulos pulmonares (15) ya que es uno de los exámenes radiológicos más accesibles para tamizaje y diagnóstico de patologías pulmonares, aunque hay otras modalidades de imagen que pueden contener datos más significativos como la mamografía, tomografía computarizada, resonancia magnética, medicina nuclear, e incluso ultrasonido (16).

En neuroimágenes, el DL se centra en la segmentación de las estructuras neuroanatómicas (15); en imágenes abdominopélvicas, en tomografía y ultrasonido, se realiza principalmente segmentación de las imágenes, especialmente la segmentación hepática con detección de lesiones patológicas en el TAC (Tomografía Axial Computarizada) (30, 15). En mamografía, las CNN detectan y clasifican las neoplasias.

El sistema musculoesquelético puede ser abordado mediante el estudio de la edad ósea, detección del nivel espinal, detección de hallazgos ortopédicos patológicos en columna, detección de osteoartritis, y detección de fracturas (30, 15).

En un estudio prospectivo llevado a cabo con el fin de evaluar el desempeño de preprocesadores en un departamento de radiología, se encontró una

diferencia notoria en el tiempo de dictado entre el grupo que realizaba el trabajo sin asistencia y el que usaba los preprocesadores, disminuyendo el tiempo usado en la interpretación de 12 a 7.5 minutos, lo que representa una disminución universal del 37% en tiempo usado por los radiólogos para interpretar imágenes de TAC con la implementación de los preprocesadores en el trabajo diario, siendo estadísticamente significativo (34).

Los algoritmos de IA tienen la posibilidad de reemplazar y cooperar con varias de las actividades de los clínicos, sin embargo, es improbable que reemplace la comunicación entre el paciente y el profesional (1). La IA puede disminuir el tiempo de lectura y mejora la precisión diagnóstica en la imagenología y optimiza los procedimientos en radiología intervencionista (7); además, se puede aplicar en otro tipo de imágenes médicas como cortes de patología, lesiones en piel, imágenes de retina, electrocardiogramas, endoscopias, e incluso signos vitales (16, 7).

Así mismo, los modelos de IA juegan un papel importante en la investigación biomédica al aplicarse en detección de riesgo y estratificación de patologías, tamizaje personalizado, predicción de respuesta a terapias y pronóstico (28, 12), y en la formación de nuevos especialistas ayudando a los estudiantes con novedosas plataformas que permitan mejorar sus habilidades procedurales y afianzar sus conocimientos en anatomía junto al uso de realidad aumentada y realidad virtual (12).

Aplicaciones de la inteligencia artificial adaptadas a la imagenología diagnóstica

La tecnología digital ha revolucionado el diagnóstico radiológico (14) al realizar actividades a una gran velocidad y a gran escala (1), reducir la carga de trabajo del especialista, prevenir el riesgo de errores médicos con sus correspondientes consecuencias legales, y optimizar la costo-efectividad (1); pero la parte humana juega un papel importante aún (14).

La mayoría de los artículos publicados en referencia al uso de la IA abordan temas como la

asistencia en la interpretación de imágenes y la automatización de otras tareas en radiología como el mejoramiento de imágenes, la segmentación de objetos, la protocolización automatizada de imágenes, detección de hallazgos críticos e, incluso, predicción clínica (35). En un estudio sistemático comparativo se encontró que es posible que un algoritmo de IA alcance los niveles de desempeño de un residente de radiología de tercer año en una gran cantidad de actividades. Sin embargo, los residentes se desempeñan mejor al detectar anomalías sutiles como masas y nódulos, varias formas de consolidaciones, aunque los algoritmos de IA detectan mejor anomalías claramente visibles y hallazgos considerados no anómalos (19). A pesar de esto, en la lectura de rayos x en proyección anteroposterior, en otro estudio, la IA superó el desempeño de los radiólogos (30).

La FDA ya ha desarrollado la primera guía para el desarrollo y aprobación de productos de inteligencia artificial (35) y parece interesada en mantener un marco regulatorio para mejorar la estandarización e integración de las tecnologías de IA en el campo de la salud (18). En la tabla 3 se encuentran enumeradas las áreas de aplicación clínica de la IA y su actual estado con respecto a desarrollo y disponibilidad (35).

Retos en la era de la inteligencia artificial

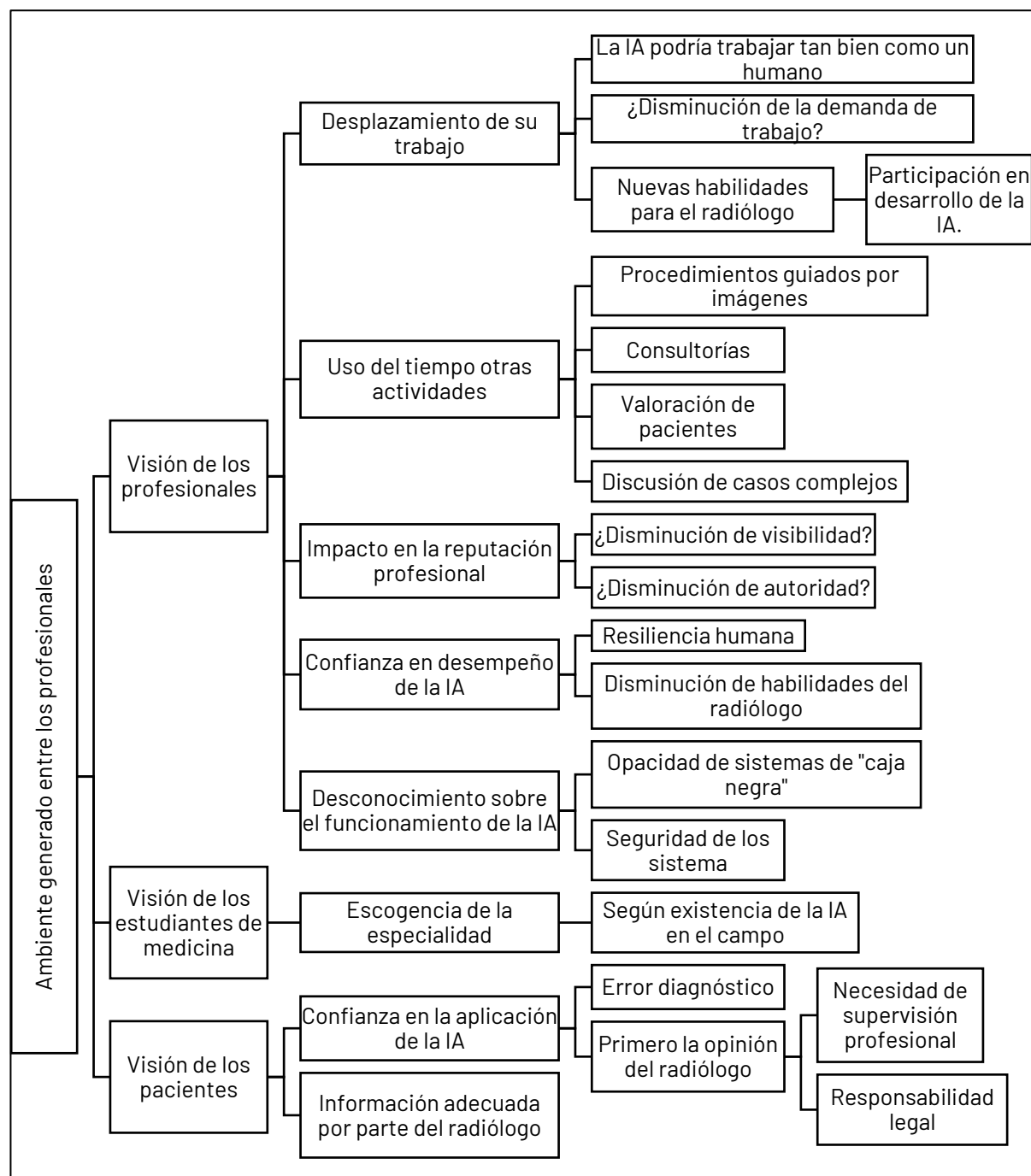
Existe un importante entusiasmo acerca de las potenciales aplicaciones de la IA, particularmente del DL, en la imagenología. Hay una baja proporción de radiólogos que usa actualmente la IA en su práctica diaria, lo que indica que aún estamos iniciando la implementación de su uso en clínica (20) con la implementación de datos en los reportes, con potenciales beneficios en términos de precisión diagnóstica e individualización de tratamientos (36). Estas herramientas han creado altas expectativas entre el personal de salud prometiendo eficiencia y calidad (9). En las figuras 3 se resumen las visiones del personal afectado por la aplicación de la IA en el campo de la radiología.

La FDA parece tener una actitud positiva frente

Tabla 3: Áreas de aplicación de la IA.

AREA DE APLICACIÓN	ESTADO ACTUAL
Mejora de imágenes Detección de enfermedades Segmentación de lesiones Diagnóstico	En mercado o pronto en el mercado
Selección de tratamientos Abordaje de respuesta Predicción clínica (o respuesta al tratamiento, o futuro de la enfermedad)	En desarrollo

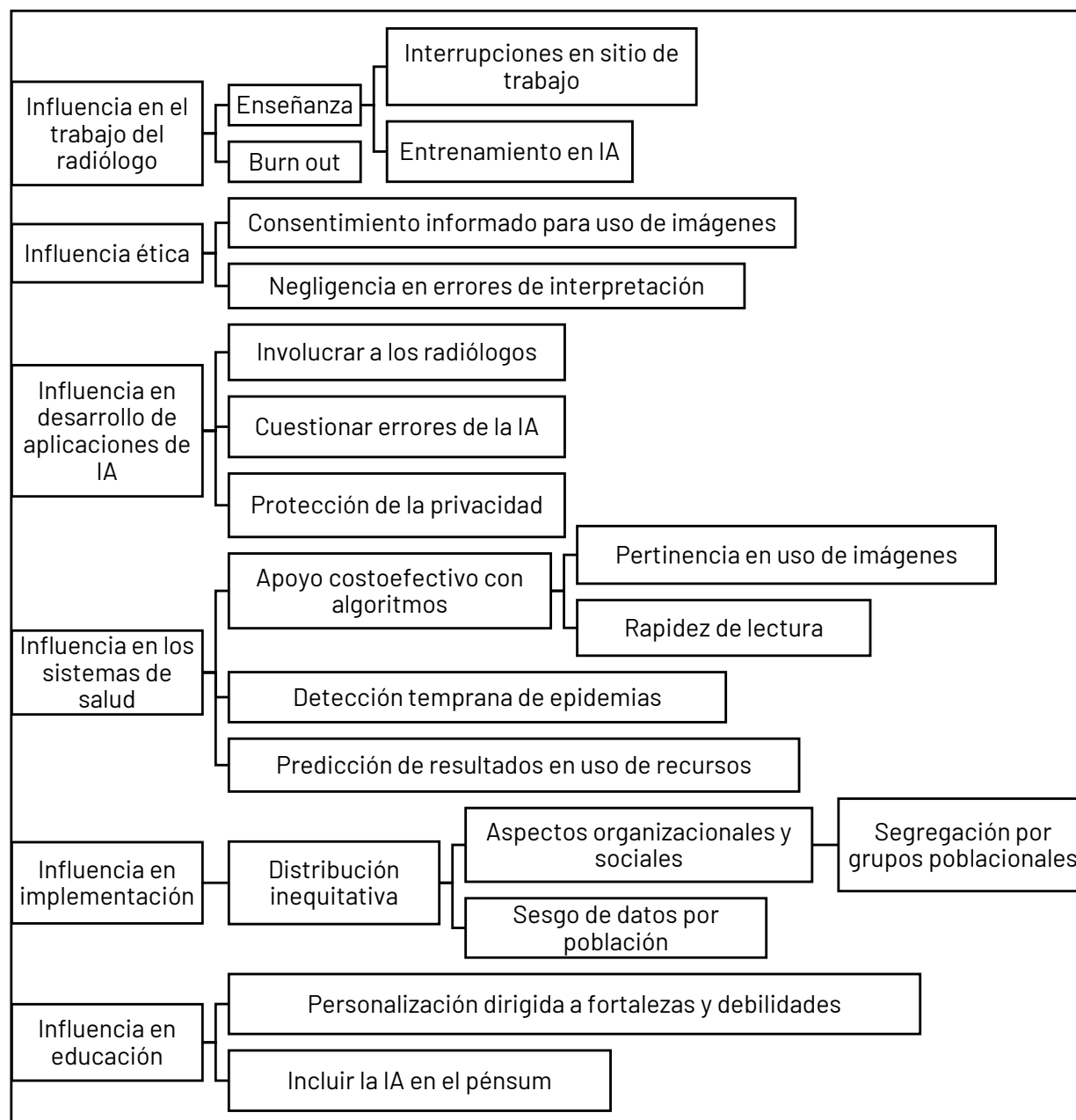
Fuente: Tomado de Rubin DL. *Artificial Intelligence in Imaging: The Radiologist's Role*, 2019 (35).

Figura 3: Retos de la aplicación de la IA en la radiología.

Fuente: Tomado para fines académicos basados en: Pesapane F, et al. (2020)(2), Mazurowski MA. (2019)(3), Bhandari A, et al. (2021)(4), Brady AP, Neri E. (2020)(8), Strohm L, et al. (2020)(9), Haan M, et al. (2019)(10), Borstelmann SM. (2020)(17), Reyes M, et al. (2020)(18), Waymel Q, et al. (2019)(20), Holzinger A, et al. (2019)(23), Kapoor N, et al. (2020)(24), Noguerol M, et al. (2019)(26), Park CJ, et al. (2021)(31), Rubin DL. (2019)(35), Coppola F, et al. (2021)(36), Spatola N, et al. (2021)(37), Chen Y, et al. (2021)(38), Huisman M, et al. (2021)(39), Gupta S, et al. (2020)(40), Stai B, et al. (2020)(41).

a la IA, ya que ha mostrado interés en facilitar la introducción de dispositivos de IA al mercado, actualizando sus regulaciones (3, 42), pero se esperaría que sea necesaria la resolución de múltiples obstáculos legales adicionales (3). Así mismo, la opacidad de los algoritmos de DL ha llevado a demandas para requerir que sean más explicables y transparentes al ser usados en el cuidado de los

pacientes (30). Sin embargo, hay múltiples factores personales, organizacionales, y éticos, y ciertos aspectos técnicos que limitan el desarrollo de algoritmos (43), y se desconoce las condiciones en las que la humanidad trabajará mano a mano con la IA en un futuro, y de qué forma cambiará esto a la sociedad (37). En la tabla 4 se resumen varios problemas éticos y posibles soluciones que se

Figura 4: Implicaciones de la aplicación de la IA en radiología.

Fuente: Tomados para fines académicos basados en: Hardy M, Harvey H. (2020)(1), Mazurowski MA. (2019)(3), Kolanska K, et al. (2021) (7), Brady AP, Neri E. (2020)(8), Strohm L, et al. (2020)(9), Griffith B, et al. (2019)(11), Gurgitano M, et al. (2021)(12), Jalal S, et al. (2019) (16), Kapoor N, et al. (2020)(24), Topol EJ. (2019)(30), Bizzo BC, et al. (2019)(32), Rubin DL. (2019)(35), Geis JR, et al. (2019)(44), Safdar NM, et al. (2020)(45), Golding LP, Nicola GN. (2020)(46), Thrall JH, et al. (2021)(47), Simpson SA, Cook TS. (2020)(48), Wiggins WF, et al. (2020)(49).

Tabla 4: Problemas éticos posibles de la implementación de la Inteligencia Artificial.

INCONVENIENTES TECNOLÓGICOS DE LA IA	IMPLICACIONES ÉTICAS	SOLUCIONES POTENCIALES
Elementos de "caja negra"	Riesgo de validación de lo desconocido	La IA debe ser accesible a cuestionamientos (Transparencia) Solo uso de abordajes algorítmicos
Complejidad de los modelos de IA	Modelos de IA no accesibles ni entendibles para el radiólogo	Explicabilidad e interpretabilidad de la IA Los radiólogos deben entrenarse para entender los principios básicos de la IA y modelos de IA
Errores de IA: "riesgo de sobreajuste"	Impacto en el diagnóstico radiológico	Entrenamiento apropiado de la IA: Grandes estudios multicéntricos con validación de los datos de imagen

Acceso difícil a grandes datos para entrenamiento de IA	Propiedad de datos. Cómo son usados los datos y como se protege la privacidad de estos	Pacientes deben dar su consentimiento si se va a usar las imágenes para un algoritmo El consentimiento debe ser dinámico, pudiendo solicitarse para una nueva versión del algoritmo Hacer todo lo posible para proteger la privacidad del paciente durante el desarrollo de herramientas de IA
Sesgo de automatización	Las decisiones del radiólogo pueden estar sesgadas por la automatización de la I Las tareas del radiólogo pueden ser reemplazadas por la IA con disrupción de la fuerza de trabajo	Los radiólogos deben entrenarse en el uso apropiado de la IA en la práctica clínica

Fuente: Tomado de Brady AP, Neri E. *Artificial Intelligence in Radiology—Ethical Considerations*, 2020 (8).

pueden presentar en la implementación de la IA (8).

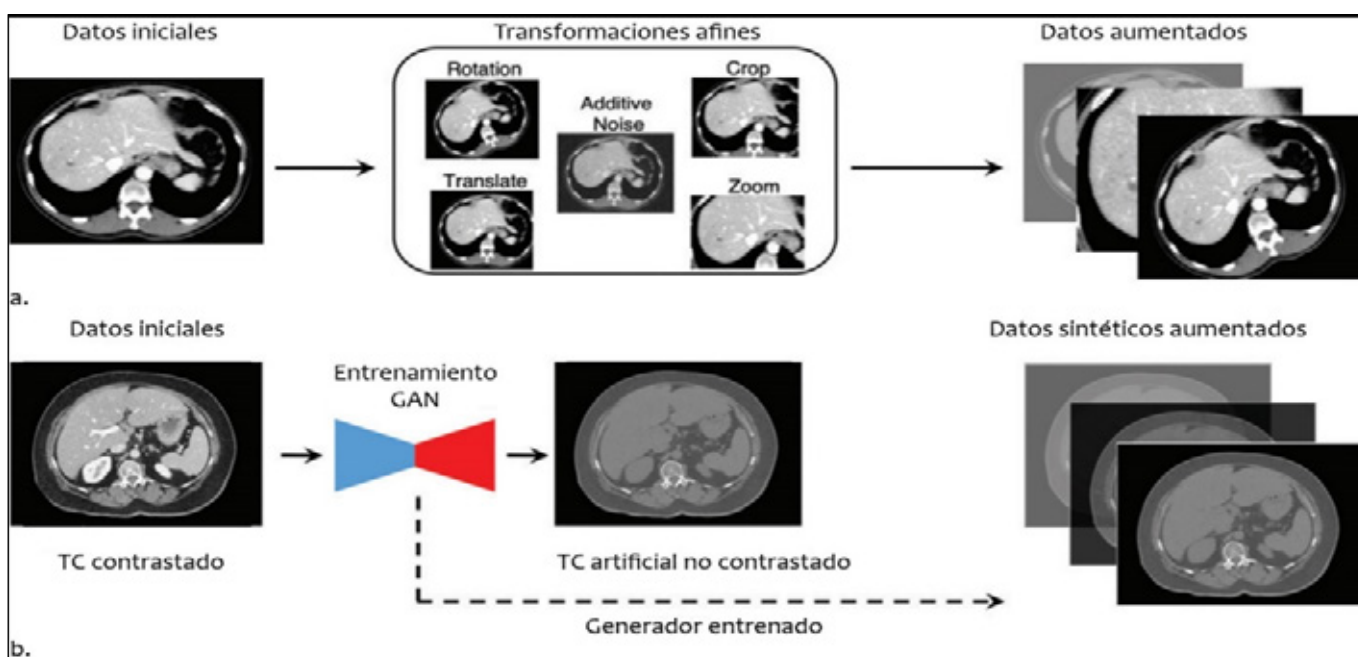
La implementación de estas tecnologías ha sido lenta y compleja (9) y su introducción se ha acompañado de ideas extravagantes en cuanto a su impacto en la sociedad. Empiezan a aparecer estudios que resaltan los retos de la implementación de la IA en el campo de la salud (38).

La implementación de la IA en el campo de la radiología podría influir en múltiples aspectos tanto de la práctica clínica como en la sociedad en sí misma (11), ya que la radiología consta de un ecosistema complejo de cuidados clínicos, tecnología, avances matemáticos, negocios y economía (44). En la figura 4 se resumen las implicaciones de la aplicación de la IA en el campo de la radiología.

Uso de datos y tecnología para aplicación de inteligencia artificial

Para aprender a realizar ciertas tareas con éxito, los algoritmos de ML y de DL requieren una buena calidad de datos usados para su entrenamiento (26, 8, 21), y la generación de este tipo de datos requiere que expertos etiqueten y validen lo que se conoce como "verdad absoluta", además de ser un proceso costoso tanto en tiempo como en recursos (26, 24, 29). La incorrecta validación del modelo puede llevar a errores sobre los datos reales, obteniendo modelos no generalizables que lleven a conclusiones no relevantes o resultados incorrectos. Los abordajes sin supervisión o semisupervisados se crean con la mayor cantidad de datos disponibles, pero actualmente carecen de la potencia de los algoritmos supervisados (26, 24).

Figura 5: Diagramas que demuestran el aumento de datos. (a) Aumento clásico de datos que consiste en aplicar varias transformaciones a las imágenes iniciales de TAC, que luego se usan para entrenamiento. (b) Aumento sintético de datos que usa una red generativa adversarial para producir imágenes adicionales que incluyen imágenes contrastadas y no contrastadas.



Fuente: Tomado de Cheng PM, et al. *Deep Learning: An Update for Radiologists*, 2021(29).

Tabla 5: Pasos para que el radiólogo evalúe un algoritmo de IA en la práctica.

1. Entender los resultados clave del algoritmo de IA y decidir cuales son clínicamente relevantes para las necesidades clínicas
2. Recolectar muestras representativas de pacientes
3. Establecer la "verda absoluta" para cada muestra
4. Escoger apropiadamente la medida de evaluación
5. Definir el límite de desempeño para dicha medida
6. Evaluar los casos en cuanto a la medida seleccionada
7. Implementar estrategias de monitoreo

Fuente: Tomado de Rubin DL. *Artificial Intelligence in Imaging: The Radiologist's Role*, 2019 (35).

Usualmente, los datos de imágenes en general son más reproducibles que los de las imágenes diagnósticas. La heterogeneidad de estas imágenes se relaciona con características como cambios en el *hardware*, o parámetros de escaneo no estandarizados entre un departamento de radiología y otro. Los artefactos en las imágenes reducen la reproducibilidad de los datos. Además, está la variabilidad interobservador, que, en varios casos hace imposible que se dé un diagnóstico definitivo.

Hay que tener en cuenta, también, que hay diferencias relacionadas con la incidencia de patologías que se traducen en resultados diferentes en cada región (13), y esto no permite que un mismo algoritmo sirva para clasificar los datos de otra región distinta a la de los datos con los que fue entrenada (13). Adicionalmente, los algoritmos, aunque hayan sido entrenados con una cantidad adecuada de datos, podrían no funcionar al aplicarse a situaciones más raras (7).

Por las anteriores razones, hallar una "verdad absoluta" de alta calidad en imagenología médica se convierte en una tarea muy difícil y extenuante por la enorme cantidad de tiempo que se requiere para detectar y etiquetar cada hallazgo (13, 29). Como resultado de estas circunstancias, los grupos de datos en radiología son pequeños en cantidad en comparación con los de otros proyectos de IA no médicos, lo que plantea varias soluciones como aumento de los datos, que es una práctica común en este tipo de proyectos en radiología (13, 47) e incluye conversiones aleatorias, rotaciones, giros, recortes y ajustes de brillo y contraste. También han suscitado interés las redes generativas adversariales (GAN por sus siglas en inglés) que producen imágenes falsas que semejan a las reales (29). En la figura 5 se aprecian ejemplos de cómo funcionan estas técnicas de aumento de datos.

La idea errónea de que, para que un algoritmo funcione adecuadamente y sea clínicamente útil, se requieren más datos, deja de lado la importancia de un etiquetado de calidad (21), la confiabilidad de las etiquetas y anotaciones, un nivel decente de

interpretabilidad, lo que hace que los desarrolladores puedan seguir más de un camino para lograr este resultado (28).

Papel del profesional en radiología en la era de la inteligencia artificial

A pesar de que el desarrollo de la IA es una fuente de incertidumbre entre los profesionales en radiología (7, 42) desencadenados por un posible desempeño superhumano de la IA (42), en general hay una tendencia a favor de que la IA será un apoyo en las tareas del radiólogo, sin llegar a reemplazarlo, dándole un nuevo enfoque a la medicina (35, 7).

La historia de la automatización ha demostrado que no se pierden vacantes de trabajo con el desarrollo tecnológico, si no que se reforman (2). En el mejor de los casos, los algoritmos de IA serían un recurso suplementario para la práctica radiológica, mejorando la automatización, eficiencia, precisión diagnóstica (35, 1, 9, 22). Esto abre múltiples retos para los radiólogos, quienes deben aprender habilidades para interactuar con la IA, y vigilar sus procesos semiautomatizados (1).

En una entrevista, se reportó una opinión positiva acerca del futuro de la IA en radiología, acentuada en el subgrupo de profesionales que ya tenían conocimientos previos de esta (20). Es así como es menester de los mismos radiólogos encontrar la manera de tener tiempo disponible para enseñar de forma más eficiente, promoviendo un ambiente que minimice situaciones como el "Burn Out" en los especialistas y residentes (11). Esta educación puede enfocarse en el reconocimiento de errores en la IA, los cuales pueden ser por inadecuada revisión de medidas, que se corregiría con entrenamiento, o más sutiles, menos predecibles y repetibles, propios de la naturaleza de esta tecnología (48), o en prepararlos para liderar el desarrollo y aplicación de modelos de ML en el área clínica (49).

Los radiólogos deben ser considerados como los principales consumidores educados en algoritmos de IA (35), ya que es quien considerará la necesidad

del uso de estas herramientas, las evaluará y las adoptará en la práctica, manteniendo su experticia y un grado aceptable de confianza en la tecnología (35, 5). Sin embargo, es necesario que consideren si estas aplicaciones van a beneficiar su práctica y qué algoritmos les serían útiles. Por ejemplo, un radiólogo puede no encontrar valor en un algoritmo que detecte neumotórax, pero si en uno que detecte y reporte los cambios volumétricos en el tamaño del neumotórax o detecte características que indiquen tensión (35).

Por lo anterior es importante que los radiólogos aprendan a evaluar el desempeño de los algoritmos de IA en su práctica diaria, de manera que se pueda retroalimentar a las compañías desarrolladoras para una posterior vigilancia y comercialización. La tabla 5 muestra una lista de pasos que se consideran necesarios para la evaluación de IA (35). Así mismo, se pueden detectar mecanismos para evitar daños a los pacientes derivados del exceso de confianza en las herramientas, las cuales pueden presentar fallas en algunas situaciones (45).

Los radiólogos se encuentran en una situación en la que, siendo proactivos, pueden ayudar a sus colegas a integrarse, asegurándose también de que el equipo de informática se incorpore en los programas de soporte clínico (46, 49), enfatizando en el trabajo en equipo, la comunicación y la toma de decisiones (11). Pueden articular las metas de estos programas con los enfoques en mejoramiento de la calidad de atención y reducción de costos (46). Además, pueden asumir roles importantes al establecer conexiones entre compañías e instituciones médicas, por ejemplo, para solicitar el acceso a datos (38). Así mismo, su interacción con la IA en escenarios clínicos es crucial a la hora de promover la confiabilidad de las aplicaciones de IA (9).

Es necesario, también, que los profesionales de radiología se involucren en el desarrollo de aplicaciones con el fin de convertirse en líderes que jueguen un papel importante en mejorar la aceptación de estas tecnologías (9) manteniendo el campo de la medicina como una disciplina humana e integral (21) y evitando perder terreno frente a las industrias u otras especialidades (39). Es significativo tener un líder local que haya participado en investigaciones sobre la adopción de sistemas de telesalud, así como la implementación de sistemas de soporte clínico (9).

En la práctica del radiólogo por fuera de las actividades meramente de lectura e interpretación de imágenes es necesario un entendimiento de la totalidad de las opciones propuestas para ser capaz de orientar al paciente y discutir la toma de decisiones (7). Adicionalmente, el tiempo no usado en la lectura de imágenes al apoyarse en la IA debe ser usado, en

lo posible, para comunicarle al paciente los riesgos de cada procedimiento, buscar su consentimiento informado, y escuchar las preocupaciones que pueda tener sobre el procedimiento y discutir las (1).

Los sistemas de salud completamente basados en inteligencia artificial podrían no aparecer hasta en décadas, siglos, o incluso nunca: No conocemos la respuesta definitiva al "¿cuándo?". (2). El prestigio asociado al uso de estas tecnologías (41) impulsa a los radiólogos a jugar más roles que solo el etiquetado de datos en las compañías que tengan suficientes recursos para contratarlos en sus equipos de trabajo (5), y, si bien la IA se convertirá en un soporte para el clínico, no lo sustituirá; pero si pudiéramos decir que aquellos radiólogos que dominan el campo de la inteligencia artificial sobrepasarán a aquellos que no sepan usarla (2).

Conclusiones

Es necesaria la integración de la inteligencia artificial en los procesos radiológicos de lectura y diagnóstico, optimizándolos y mejorando la eficiencia en los departamentos de radiología, sin perder la participación y supervisión permanente de los radiólogos entrenados.

La inteligencia artificial también es capaz de impactar los sistemas de salud debido a que es posible la reducción de costos; sin embargo, es inminente la presencia de barreras a la hora de implementarla de forma equitativa en la sociedad.

Hasta el momento es claro que no es posible reemplazar al radiólogo como protagonista de su ejercicio, debido a que la inteligencia artificial es una herramienta que serviría exclusivamente como apoyo y optimizador de las habilidades del galeno, por lo que permitiría la expansión de sus habilidades a actividades de mayor exigencia.

Bibliografía

1. Hardy M, Harvey H. Artificial intelligence in diagnostic imaging: impact on the radiography profession. *Br J Radiol* [Internet]. Abril de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 93(1108):20190840. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31821024/>
2. Pesapane F, et al. Myths and facts about artificial intelligence: why machine and deep learning will not replace interventional radiologists. *Med Oncol* [Internet]. Abril de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 37(5):40. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32246300/>
3. Mazurowski MA. Artificial Intelligence May Cause a Significant Disruption to the Radiology Workforce. *J Am Coll Radiol* [Internet]. Agosto de 2019 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 16(8):1077-1082. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S154614401930064X>
4. Bhandari A, et al. Knowledge and attitudes towards

- artificial intelligence in imaging: a look at the quantitative survey literature. Clin Imaging [Internet]. Diciembre de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 80:413-419. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34537484/>
5. Scheek D, Rezazade Mehrizi MH, Ranschaert E. Radiologists in the loop: the roles of radiologists in the development of AI applications. Eur Radiol [Internet]. Octubre de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 31(10):7960-7968. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33860828/>
 6. Alsuliman T, Humaidan D, Sliman L. Machine learning and artificial intelligence in the service of medicine: Necessity or potentiality? Current Research in Translational Medicine [Internet]. Febrero de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 68. 10.1016/j.retram.2020.01.002. Disponible en : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32029403/>
 7. Kolanska K, Chabbert-Buffet N, Daraï E, Antoine JM. Artificial intelligence in medicine: A matter of joy or concern? J Gynecol Obstet Hum Reprod [Internet]. Enero de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 50(1):101962. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33148398/>
 8. Brady AP, Neri E. Artificial Intelligence in Radiology—Ethical Considerations. Diagnostics [Internet]. Abril de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 10(4):231. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32316503/>
 9. Strohm L, et al. Implementation of artificial intelligence (AI) applications in radiology: hindering and facilitating factors. European Radiology [Internet]. Mayo de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 30. 10.1007/s00330-020-06946-y. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32458173/>
 10. Haan M, Ongena YP, Hommes S, Kwee TC, Yakar D. A Qualitative Study to Understand Patient Perspective on the Use of Artificial Intelligence in Radiology. J Am Coll Radiol [Internet]. Octubre de 2019 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 16(10):1416-1419. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30878311/>
 11. Griffith B, Kadom N, Straus CM. Radiology Education in the 21st Century: Threats and Opportunities. J Am Coll Radiol [Internet]. Octubre de 2019 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 16(10):1482-1487. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1546144019304223>
 12. Gurgitano M, et al. Interventional Radiology ex-machina: impact of Artificial Intelligence on practice. Radiol Med [Internet]. Julio de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 126(7):998-1006. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33861421/>
 13. Weikert T, et al. A Practical Guide to Artificial Intelligence-Based Image Analysis in Radiology. Invest Radiol [Internet]. Enero de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; Disponible en <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31503083/>
 14. Moores BM. Artificial intelligence and deep learning in diagnostic radiology—is this the next phase of scientific and technological development? Radiat Prot Dosimetry [Internet]. Octubre de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 195(3-4):145-151. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33604607/>
 15. Soffer S, et al. Convolutional Neural Networks for Radiologic Images: A Radiologist's Guide. Radiology [Internet]. Enero de 2019 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 290(3):590-606. Disponible en: <https://pubs.rsna.org/doi/10.1148/radiol.2018180547>
 16. Jalal S, Nicolaou S, Parker W. Artificial Intelligence, Radiology, and the Way Forward. Can Assoc Radiol J [Internet]. Febrero de 2019 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 70(1):10-12. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30691556/>
 17. Borstelmann SM. Machine Learning Principles for Radiology Investigators. Acad Radiol [Internet]. Enero de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 27(1):13-25. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31818379/>
 18. Reyes M, et al. On the Interpretability of Artificial Intelligence in Radiology: Challenges and Opportunities. Radiol Artif Intell [Internet]. Mayo de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 2(3): e190043. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32510054/>
 19. Wu JT, et al. Comparison of Chest Radiograph Interpretations by Artificial Intelligence Algorithm vs Radiology Residents. JAMA Netw Open [Internet]. Octubre de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 3(10): e2022779. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33034642/>
 20. Waymel Q, et al. Impact of the rise of artificial intelligence in radiology: What do radiologists think? Diagn Interv Imaging [Internet]. Junio de 2019 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 100(6):327-336. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31072803/>
 21. Macruz, F. Misconceptions in the health technology industry that are delaying the translation of artificial intelligence technology into relevant clinical applications. Radiologia Brasileira [Internet]. Agosto de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 54. 243-245. Disponible en: <https://www.scielo.br/rb/a/xgVZcPRNsVwBhKYTTxwxRS/?lang=en>
 22. Makeeva V, et al. The Application of Machine Learning to Quality Improvement Through the Lens of the Radiology Value Network. J Am Coll Radiol [Internet]. Septiembre de 2019 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 16(9 Pt B):1254-1258. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1546144019306398>
 23. Holzinger A, et al. Causability and explainability of artificial intelligence in medicine. Wiley Interdiscip Rev Data Min Knowl Discov [Internet]. Julio de 2019 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 9(4): e1312. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32089788/>
 24. Kapoor N, Lacson R, Khorasani R. Workflow Applications of Artificial Intelligence in Radiology, and an Overview of Available Tools. J Am Coll Radiol [Internet]. Noviembre de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 17(11):1363-1370. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33153540/>
 25. Barragán-Montero A, et al. Artificial intelligence, and machine learning for medical imaging: A technology review. Phys Med [Internet]. Marzo de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 83:242-256. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33979715/>
 26. Noguerol M, et al. Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats Analysis of Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in Radiology. J Am Coll Radiol [Internet]. Septiembre de 2019 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 16(9 Pt B):1239-1247. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1546144019306994>
 27. Kocak B, Kus EA, Kilickesmez O. How to read and review papers on machine learning and artificial intelligence in radiology: a survival guide to key methodological concepts. Eur Radiol [Internet]. Abril de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 31(4):1819-1830. Disponible en:

- <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33006018/>
28. Castiglioni I, et al. AI applications to medical images: From machine learning to deep learning. *Phys Med [internet]*. Marzo de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 83:9-24. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33662856/>
 29. Cheng PM, et al. Deep Learning: An Update for Radiologists. *Radiographics [internet]*. Septiembre de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 41(5):1427-1445. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34469211/>
 30. Topol EJ. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nat Med [Internet]*. Enero de 2019 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 25(1):44-56. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30617339/>
 31. Park CJ, Yi PH, Siegel EL. Medical Student Perspectives on the Impact of Artificial Intelligence on the Practice of Medicine. *Curr Probl Diagn Radiol [internet]*. Septiembre de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 50(5):614-619. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32680632/>
 32. Bizzo BC, et al. Artificial Intelligence and Clinical Decision Support for Radiologists and Referring Providers. *J Am Coll Radiol [internet]*. Septiembre de 2019 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 16(9 Pt B):1351-1356. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1546144019307173>
 33. Harada Y, et al. Efficacy of Artificial-Intelligence-Driven Differential-Diagnosis List on the Diagnostic Accuracy of Physicians: An Open-Label Randomized Controlled Study. *Int J Environ Res Public Health [internet]*. Febrero de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 18(4):2086. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33669930/>
 34. Do HM, et al. Augmented Radiologist Workflow Improves Report Value and Saves Time: A Potential Model for Implementation of Artificial Intelligence. *Academic Radiology [internet]*. Enero de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 27(1):96-105. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31818390/>
 35. Rubin DL. Artificial Intelligence in Imaging: The Radiologist's Role. *J Am Coll Radiol [Internet]*. Septiembre de 2019 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 16(9 Pt B):1309-1317. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1546144019306362>
 36. Coppola F, et al. Artificial intelligence: radiologists' expectations and opinions gleaned from a nationwide online survey. *Radiol Med [internet]*. Enero de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 126(1):63-71. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32350797/>
 37. Spatola N, Normand A. Human vs. machine: the psychological and behavioral consequences of being compared to an outperforming artificial agent. *Psychol Res [internet]*. Abril de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 85(3):915-925. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32206855/>
 38. Chen Y, et al. Professionals' responses to the introduction of AI innovations in radiology and their implications for future adoption: a qualitative study. *BMC Health Serv Res [internet]*. Agosto de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 21(1):813. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34389014/>
 39. Huisman M, et al. An international survey on AI in radiology in 1,041 radiologists and radiology residents' part 1: fear of replacement, knowledge, and attitude. *Eur Radiol [internet]*. Septiembre de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 31(9):7058-7066. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33744991/>
 40. Gupta S, Kattapuram TM, Patel TY. Social media's role in the perception of radiologists and artificial intelligence. *Clin Imaging [internet]*. Diciembre de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 68:158-160. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32623195/>
 41. Stai B, et al. Public Perceptions of Artificial Intelligence and Robotics in Medicine. *J Endourol [internet]*. Octubre de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 34(10):1041-1048. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32611217/>
 42. Tariq A, et al. Current Clinical Applications of Artificial Intelligence in Radiology and Their Best Supporting Evidence. *J Am Coll Radiol [internet]*. Noviembre de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 17(11):1371-1381. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1546144020309352>
 43. Huisman M, et al. An international survey on AI in radiology in 1041 radiologists and radiology residents part 2: expectations, hurdles to implementation, and education. *Eur Radiol [internet]*. Noviembre de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 31(11):8797-8806. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33974148/>
 44. Geis JR, et al. Ethics of Artificial Intelligence in Radiology: Summary of the Joint European and North American Multisociety Statement. *Radiology [Internet]*. Noviembre de 2019 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 293(2):436-440. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0846537119301305>
 45. Safdar NM, Banja JD, Meltzer CC. Ethical considerations in artificial intelligence. *Eur J Radiol [Internet]*. Enero de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 122:108768. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31786504/>
 46. Golding LP, Nicola GN. Clinical Decision Support: The Law, the Future, and the Role for Radiologists. *Curr Probl Diagn Radiol [internet]*. Septiembre de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 49(5):337-339. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32222263/>
 47. Thrall JH, Fessell D, Pandharipande PV. Rethinking the Approach to Artificial Intelligence for Medical Image Analysis: The Case for Precision Diagnosis. *J Am Coll Radiol [internet]*. Enero de 2021 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 18(1 Pt B):174-179. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33413896/>
 48. Simpson SA, Cook TS. Artificial Intelligence and the Trainee Experience in Radiology. *J Am Coll Radiol [Internet]*. Noviembre de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 17(11):1388-1393. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33010211/>
 49. Wiggins WF, et al. Preparing Radiologists to Lead in the Era of Artificial Intelligence: Designing and Implementing a Focused Data Science Pathway for Senior Radiology Residents. *Radiol Artif Intell [internet]*. Noviembre de 2020 [citado el 15 de diciembre de 2021]; 2(6): e200057. Disponible en: <https://pubs.rsna.org/doi/10.1148/ryai.202020005>