

El renacimiento tecnológico de la Radiología: la revolución open source y la inteligencia artificial

The Technological Renaissance of Radiology: The Open Source Revolution and Artificial Intelligence

Rebeca Tenajas¹

[0000-0001-8815-7341](tel:0000-0001-8815-7341)

David Miraut^{2*}

[0000-0003-1648-5308](tel:0000-0003-1648-5308)

¹ Centro de Salud de Arroyomolinos. España.

² GMV Innovating Solutions. España

*Autor para la correspondencia: miraut@gmail.com

RESUMEN

El campo de la radiología ha experimentado avances notables en las últimas décadas, con desarrollos que van desde la mejora de la calidad y digitalización de las imágenes hasta la detección asistida por computadora. Particularmente, la aparición de técnicas de Inteligencia Artificial basadas en Deep Learning y Visión Computacional han promovido soluciones innovadoras en el diagnóstico y el análisis radiológico.

Se explora la relevancia de los desarrollos y modelos open source en el progreso de estas técnicas, resaltando el impacto que la colaboración y el acceso abierto han tenido en el avance científico del campo.

La investigación tiene un enfoque cualitativo, con alcance descriptivo y retrospectivo, de corte longitudinal. Se realizó un análisis documental de la evolución y el impacto del open source en la Radiología, poniendo de relieve la colaboración multidisciplinar. Se examinaron casos de uso, ventajas, desafíos y consideraciones éticas en relación con la implementación de soluciones basadas en Inteligencia Artificial en Radiología.

El enfoque open source ha mostrado ser una influencia positiva en la Radiología, con potencial para influir en la atención médica, ofreciendo soluciones más precisas y accesibles. No obstante, se presentan desafíos éticos y técnicos que requieren atención.

Palabras clave: radiología; aprendizaje profundo; código abierto; desarrollo de software; diagnóstico por imagen; ética médica; difusión de innovación.



ABSTRACT

The field of radiology has seen notable advances in recent decades, with developments ranging from image quality improvement and digitization to computer-aided detection. Particularly, the emergence of Artificial Intelligence techniques based on Deep Learning and Computer Vision have promoted innovative solutions in diagnosis and radiological analysis. This article explores the relevance of open source developments and models in the progress of these techniques, highlighting the impact that collaboration and open access have had on the scientific advancement in this field. This research has a qualitative approach, with a descriptive, retrospective, longitudinal scope. A documentary analysis of the evolution and impact of open source in Radiology was carried out, highlighting multidisciplinary collaboration. Use cases, advantages, challenges and ethical considerations were also examined in relation to the implementation of AI-based solutions in Radiology.

The Open Source approach has been shown to be a positive influence in Radiology, with the potential to influence medical care, offering more precise and accessible solutions. However, there are ethical and technical challenges that require attention.

Keywords: radiology; deep learning; open source; software development; diagnostic imaging; medical ethics; diffusion of innovation.

Recibido: 11/08/2023

Aprobado: 16/11/2023

Introducción

La convergencia de la Radiología y la informática médica ha impulsado la aparición de soluciones de diagnóstico innovadoras y precisas. Uno de los factores determinantes en este avance ha sido la adopción de modelos y desarrollos open source. Universidades y centros de investigación de todo el mundo han sido catalizadores en este movimiento, promoviendo la idea de que compartir código y modelos entrenados puede acelerar el ritmo de descubrimientos y el desarrollo de aplicaciones en el campo de la Radiología.⁽¹⁾

Evolución de los Desarrollos Open Source en la Informática Médica

La revolución tecnológica que hemos experimentado en las últimas décadas ha alterado significativamente la forma en que se realiza la investigación y la práctica clínica. Dentro de este marco, los desarrollos open source en la informática médica han ocupado un lugar central en la transformación del paisaje clínico a nivel tecnológico a pesar de pasar desapercibidos para los médicos que los usan en su práctica clínica.

La idea del software libre y de código abierto (FOSS) no es nueva. Surgió en la década de 1980 con iniciativas lideradas por figuras como Richard Stallman y su proyecto GNU. En



el ámbito médico, la adopción de estas filosofías fue inicialmente lenta. Las instituciones médicas a menudo se mostraban reacias a compartir investigaciones y herramientas por temor a perder ventajas competitivas o por preocupaciones sobre la privacidad y seguridad de los datos.⁽²⁾ Así, muchos investigadores trabajaban de forma aislada, protegiendo sus descubrimientos y metodologías.

Sin embargo, con el tiempo, las ventajas inherentes a la colaboración y el acceso abierto comenzaron a ganar terreno. Los primeros proyectos médicos open source se centraron en sistemas de información de salud, bases de datos y, más tarde, en herramientas de análisis y diagnóstico.⁽³⁾

Con la llegada del nuevo milenio, también aparecieron los repositorios de código, modelos y datos abiertos y accesibles de forma gratuita (como Github, HuggingFace y Zenodo), que junto con el auge de la cultura open source, han promovido que la investigación en Informática Médica se haya vuelto más colaborativa⁽⁴⁾ alrededor de proyectos open source con un gran potencial e impacto en la sociedad científica. Estas plataformas no solo permitieron el almacenamiento y el seguimiento de código, sino que también fomentaron una cultura de colaboración interdisciplinaria. En el campo de la informática médica, proyectos como ITK (Kit de herramientas de imágenes) y VTK (Kit de herramientas de visualización) se convirtieron en ejemplos emblemáticos de cómo el código abierto podría beneficiar la investigación médica.⁽⁵⁾

Junto con el código, el concepto de datos abiertos comenzó a cobrar importancia. Repositorios de datos como el Proyecto del Genoma Humano proporcionaron a investigadores de todo el mundo acceso a información genética esencial. Esta apertura ha permitido avances en la genómica personalizada y en la medicina de precisión.⁽⁶⁾

A medida que las técnicas de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático se han desarrollado, su aplicación en la Informática Médica se ha intensificado. Librerías open source como TensorFlow, PyTorch y Keras se han convertido en estándares de la industria para el desarrollo de soluciones basadas en IA. Estas herramientas, combinadas con datasets abiertos, han favorecido la consecución de notables avances en diagnóstico asistido por computador, la segmentación de imágenes y el análisis predictivo.⁽⁷⁾

La evolución de los desarrollos open source en la Informática Médica refleja una tendencia más amplia hacia la apertura y la colaboración en la investigación científica. Aunque hubo obstáculos iniciales y todavía quedan desafíos éticos que enfrentar, la trayectoria general ha sido de crecimiento y adopción expansiva. El enfoque colaborativo ha demostrado ser una fuerza motriz en el avance de soluciones innovadoras, en cuya punta de lanza en Radiología se encuentran las técnicas de Inteligencia Artificial basadas en Deep Learning (Aprendizaje Profundo).

Avances en Deep Learning gracias al Open Source

El Deep Learning, una subcategoría del aprendizaje automático y la inteligencia artificial, ha experimentado un crecimiento exponencial en términos de aplicaciones y avances en la última década. Su integración con la Medicina, especialmente en el ámbito de la



Radiología, ha abierto puertas a nuevas posibilidades diagnósticas y terapéuticas. En este contexto, el papel del open source ha sido determinante para fomentar esta evolución.

A comienzos de la década de 2010, el desarrollo de herramientas basadas en Deep Learning estaba limitado a unos pocos investigadores con conocimientos avanzados en programación, Matemáticas y Estadística. Sin embargo, la publicación de librerías de código abierto como TensorFlow por Google y PyTorch por Facebook (ahora llamada Meta) cambió el panorama.⁽⁸⁾ Estas herramientas ofrecían interfaces de programación amigables y capacidades de cómputo avanzadas, lo que permitió a los investigadores centrarse en el diseño y entrenamiento de modelos en lugar de la implementación básica de los mecanismos comunes en los que se fundamenta el aprendizaje.

Junto con estas librerías, la disponibilidad de conjuntos de datos públicos, como el dataset ImageNet, jugó un papel muy importante en la comparación y evolución de los modelos propuestos por la comunidad científica. Concursos como el ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) incentivaron a toda la comunidad científica a desarrollar modelos de Deep Learning más precisos y eficientes.⁽⁹⁾ En el ámbito de la investigación médica, iniciativas similares permitieron la formación de modelos para la detección de enfermedades, la segmentación de órganos y tumores, así como el análisis predictivo.

A medida que el Deep Learning ganó popularidad, universidades, centros de investigación y empresas comenzaron a reconocer el valor de compartir conocimientos. Un ejemplo es el trabajo colaborativo entre la Universidad de California, Berkeley, y el MIT en el desarrollo de Caffe, una librería de Deep Learning que llegó a ser muy popular. Estas colaboraciones interinstitucionales permitieron la rápida iteración y mejora de herramientas, ello a su vez aceleró el ritmo de innovación en este campo.⁽¹⁰⁾

La Radiología ha sido uno de los campos médicos más beneficiados por el Deep Learning. Proyectos como "CheXNet" de Stanford, que busca detectar neumonías en radiografías de tórax, son ejemplos de cómo el código abierto ha impulsado el progreso en el área. Además, herramientas como MONAI, un framework open source específico para imágenes médicas, han permitido a los radiólogos y científicos de datos colaborar juntos en soluciones innovadoras de una forma sencilla y accesible.⁽¹¹⁾

A pesar de los avances, todavía hay muchos desafíos. La disponibilidad de grandes conjuntos de datos médicos que no comprometan la privacidad del paciente es una preocupación constante. Además, si bien el código abierto democratiza y abarata el acceso, también puede conducir a la utilización de estas herramientas sin una comprensión adecuada de su manejo o de los resultados obtenidos, lo que puede dar lugar a interpretaciones erróneas. En cualquier caso, a medida que la comunidad global se une para superar estos desafíos, el futuro del Deep Learning en Medicina, potenciado por el open source, parece prometedor.



Ventajas del Enfoque Open Source

El paradigma open source ha transformado muchos campos de la tecnología y la ciencia. Su influencia en la Informática Médica, y más específicamente en las aplicaciones para Radiología, tiene una serie de ventajas que se han combinado facilitando la consecución de avances significativos. A continuación, se detallan algunas de las principales ventajas asociadas a este enfoque.

Democratización del Conocimiento

Uno de los pilares más notables del movimiento open source es la democratización del conocimiento. Al hacer que el software y los datos estén accesibles sin barreras económicas, se permite a investigadores, médicos y estudiantes de todo el mundo acceder, aprender y contribuir a la base de conocimiento global.⁽¹²⁾ Esto crea un campo de juego más equitativo, en el que la calidad de la investigación no depende únicamente de la capacidad financiera o los recursos económicos de una institución.

Rapidez en la Innovación

El código abierto favorece la colaboración y la revisión pública. Las soluciones y mejoras se proponen y adoptan con mayor rapidez cuando una amplia comunidad de expertos puede acceder y mejorar el código. La capacidad de construir sobre el trabajo de otros, sin tener que reinventar la rueda, acelera el ritmo de innovación en cualquier campo, incluida por supuesto la Radiología, y favorece la realización de nuevos descubrimientos.^{(13),(14)}

Flexibilidad y Personalización

Las soluciones de software propietarias suelen ser "cajas negras", donde los usuarios finales no pueden adaptar las herramientas a sus necesidades específicas. En contraste, las herramientas open source ofrecen flexibilidad, permitiendo a las instituciones y desarrolladores adaptar y personalizar las soluciones para ajustarse a requisitos o situaciones particulares.⁽¹⁵⁾

Reducción de Costes

El software open source, al no incurrir en costos de licencia, puede ofrecer una alternativa económica para instituciones con presupuestos limitados. Además, al evitar la dependencia de soluciones propietarias, las organizaciones pueden reducir sus costes a largo plazo.⁽¹⁶⁾

Robustez y Seguridad

Con una amplia comunidad que revisa y mejora constantemente el código, las vulnerabilidades y errores suelen identificarse y corregirse con mayor rapidez en entornos open source que en software propietario. Esto se traduce en soluciones más robustas y seguras en términos de funcionalidad y protección de datos.⁽¹⁷⁾ Además, al tener acceso al código fuente y a los modelos, es más sencillo para otros investigadores validar y reproducir resultados.⁽¹⁸⁾

Interoperabilidad



Las herramientas de código abierto tienden a seguir estándares abiertos, lo que facilita la integración y comunicación entre diferentes sistemas y aplicaciones. En el contexto médico, donde diferentes sistemas y dispositivos necesitan interactuar, la interoperabilidad es esencial. HL7 para el intercambio de información clínica y administrativa y DICOM en los sistemas de imagen médica, son claros ejemplos fuertemente soportados por los desarrollos software open source.⁽¹⁹⁾

Formación y Educación

Al tener acceso a la "maquinaria interna" del software, los estudiantes y profesionales pueden lograr tener una comprensión más profunda de las operaciones y principios subyacentes. Esto favorece la formación y proporciona una base sólida para la innovación futura.⁽²⁰⁾

Las ventajas del enfoque open source en la informática médica abarcan aspectos técnicos, económicos y educativos. Su adopción y promoción pueden catalizar avances significativos, no solo en términos de tecnología, sino también en cómo se lleva a cabo la investigación y se brinda la atención médica.

Desafíos y Consideraciones Éticas

El paradigma open source también presenta desafíos particulares y cuestiones éticas que merecen atención y reflexión. Es esencial reconocer y abordar estos desafíos para garantizar que la adopción de soluciones de código abierto en la medicina se haga de forma responsable y efectiva.

Privacidad y Seguridad de los Datos

A pesar de que el código abierto puede ofrecer robustez en términos de seguridad, gestionar y compartir datos médicos plantea preocupaciones específicas. Dado que los datos médicos son extremadamente sensibles, garantizar la privacidad y seguridad del paciente en un ecosistema abierto es primordial.⁽²¹⁾ Las brechas de datos pueden tener consecuencias graves, no solo en términos de confidencialidad, sino también de posibles malos usos. Las recientes propuestas de entrenamiento federado, como uTILE, pueden ofrecer una solución a esta problemática sin exponer los datos sensibles de los pacientes más allá de las instituciones sanitarias.⁽²²⁾

Calidad y Validación

La naturaleza descentralizada del desarrollo open source puede llevar a problemas de calidad y consistencia. Aunque una amplia comunidad puede revisar y mejorar el código, no siempre hay garantías de que el software haya pasado por procesos de validación rigurosos, especialmente cuando se trata de aplicaciones médicas. Es más, el sobreajuste de los modelos al ser entrenados con datos de una población con características específicas, puede dar lugar a resultados erróneos al ser aplicado en otras poblaciones distintas. éste y otros aspectos requieren atención y debate continuo.⁽²³⁾

Responsabilidad

En el entorno médico, una herramienta defectuosa o mal aplicada puede tener consecuencias sobre la salud de un paciente. Determinar la responsabilidad en caso de



fallos o errores en software open source puede ser complicado debido a la naturaleza distribuida de su desarrollo.⁽²⁴⁾

Fragmentación

A menudo, los proyectos open source pueden dar lugar a "bifurcaciones" o variantes, en función de las necesidades de cada grupo de interés. Si bien esto puede fomentar la innovación, también puede resultar en fragmentación, con múltiples versiones que ofrecen características ligeramente diferentes de una herramienta, complicando su adopción y estandarización.⁽²⁵⁾

Sostenibilidad a Largo Plazo

El desarrollo de software requiere financiación y recursos. Aunque los proyectos de código abierto pueden empezar con entusiasmo, garantizar su sostenibilidad y mantenimiento a largo plazo sin un modelo de negocio claro es un desafío.⁽²⁶⁾

Cuestiones Éticas en el Uso de Datos

La utilización de conjuntos de datos en investigación, especialmente en el Deep Learning, requiere el consentimiento informado de los pacientes. En un entorno open source, donde los datos pueden ser ampliamente compartidos, es imprescindible garantizar que se han respetado los derechos de los pacientes y que los datos no se utilizan para propósitos no autorizados.⁽²⁷⁾

Los desafíos y consideraciones éticas del paradigma open source en el ámbito médico acentúan la necesidad de un enfoque equilibrado. Es muy importante que, mientras se adoptan estas herramientas, las instituciones y los profesionales permanezcan alerta y proactivos en la identificación y mitigación de posibles problemas.

Casos de Uso y Contribuciones Significativas

De forma semejante a cómo ha evolucionado la creación de herramientas de Radiología en Cuba, en la comunidad global open source primero se han desarrollado aplicaciones de visualización cada vez más sofisticadas y precisas para cada una de las modalidades de imagen médica, después herramientas para asistir en la labor manual de los radiólogos (como la segmentación de tumores o la planificación de cirugía) y finalmente han surgido los desarrollos potenciados por inteligencia artificial que automatizan muchas de las labores tediosas para que los médicos puedan concentrar sus esfuerzos en aquellas tareas que tienen un mayor valor asistencial.⁽²⁸⁾

En esta breve recopilación de casos de éxito y herramientas open source populares entre los médicos y los ingenieros, hacemos la distinción mencionada entre las herramientas ya maduras de visualización y las modernas soluciones que aprovechan los avances en inteligencia artificial. Una frontera que se desdibuja, pues los primeros están siendo mejorados para aprovechar las características de los segundos, gracias a la sinergia y la proactividad antes mencionadas y tan características de la comunidad open source.



Visores y gestión de registros médicos

El campo de la informática médica ha sido testigo de notables contribuciones gracias a la filosofía open source. Algunos de estos proyectos y soluciones ha tenido un papel protagonista en la transformación de la práctica médica y en el avance de la investigación académica. A continuación, se destacan algunos ejemplos emblemáticos y se describe cómo han impactado en la Radiología y otros ámbitos médicos.

OsiriX Imaging Software

OsiriX es un conocido software de visualización de imágenes médicas diseñado específicamente para la navegación y visualización de imágenes DICOM. Aunque existe una versión de pago con funcionalidades avanzadas, la versión open source ha sido fundamental para proporcionar a numerosos médicos y centros de salud una herramienta potente sin los costes asociados a otras soluciones propietarias.⁽²⁹⁾

ITK (Insight Segmentation and Registration Toolkit)

Desarrollado por la National Library of Medicine, ITK es una herramienta open source para la segmentación y registro de imágenes. Ha sido clave en el desarrollo de numerosos proyectos de investigación, facilitando procesos avanzados como la reconstrucción 3D y la segmentación de imágenes médicas.⁽³⁰⁾

3D Slicer

Es una plataforma de software libre para la visualización, registro, segmentación y análisis de datos médicos. A través de su enfoque de código abierto, ha permitido a los investigadores adaptar y expandir sus funcionalidades para diferentes aplicaciones, desde la planificación preoperatoria hasta la investigación en neuroimagen.⁽³¹⁾

BioConductor

En el ámbito de la genómica, BioConductor es un proyecto que proporciona herramientas para el análisis y comprensión de datos genómicos y de alta dimensión. Aunque no está directamente relacionado con la Radiología, su enfoque de código abierto ha sentado precedentes en la manera de manejar y analizar datos médicos complejos.⁽³²⁾

RadiAnt DICOM Viewer

Es una aplicación ligera para la visualización de imágenes DICOM que ha ganado popularidad por su facilidad de uso y capacidad de manejar múltiples modalidades de imagen. Aunque no es completamente open source, ha demostrado cómo las soluciones alternativas pueden ofrecer funcionalidades comparables a soluciones más costosas.

OpenMRS (Open Medical Record System)

Más allá de la Radiología, OpenMRS es una plataforma y base de datos electrónica de registros médicos diseñada para países con recursos limitados. Su naturaleza open source ha permitido a comunidades en todo el mundo adaptar el sistema a sus necesidades locales, lo que ha resultado en un impacto significativo en la atención sanitaria global.⁽³³⁾



Estos casos de uso resaltan cómo las soluciones de código abierto han ofrecido herramientas potentes y flexibles que han transformado áreas específicas de la medicina. Además, su capacidad para ser adaptadas y personalizadas por la comunidad ha permitido una rápida innovación y adaptación a diferentes contextos y necesidades.

Aplicaciones de Radiología potenciadas con inteligencia artificial

En la intersección entre Radiología y Deep Learning, el enfoque open source ha propiciado una oleada de innovaciones que están transformando la interpretación de imágenes médicas. A continuación, se presentan algunos proyectos y aplicaciones destacadas en este ámbito:

MONAI (Medical Open Network for AI)

MONAI es un framework de código abierto centrado en la investigación en imágenes médicas basada en la inteligencia artificial. Esta herramienta, construida sobre la base de PyTorch, proporciona componentes modulares y herramientas para establecer flujos de trabajo que aborden tareas comunes en la interpretación de imágenes, como segmentación y registro. El uso de MONAI ha permitido a los investigadores y clínicos experimentar y adaptar algoritmos de vanguardia en sus propias investigaciones y aplicaciones.⁽³⁴⁾

NiftyNet

Es una plataforma de código abierto basada en TensorFlow que permite el desarrollo y la validación de modelos de redes neuronales para imágenes médicas. NiftyNet ha sido empleado en tareas como segmentación, detección de lesiones, e interpretación de imágenes. Su versatilidad y capacidad de integración ha facilitado la experimentación en múltiples modalidades de imagen, incluyendo resonancia magnética (MRI) y tomografía computarizada (CT).⁽³⁵⁾

DeepMedic

Diseñado para tareas de segmentación en imágenes médicas, DeepMedic es una herramienta basada en redes neuronales con capas convolucionales tridimensionales (3D). Se ha utilizado en aplicaciones como la segmentación de tumores cerebrales en imágenes de resonancia magnética, demostrando ser competitiva frente a otras soluciones propietarias.⁽³⁶⁾

ANTsPyNet

Parte del conjunto de herramientas ANTs, ANTsPyNet es una librería de Python para el entrenamiento y la inferencia en redes neuronales profundas orientada al procesamiento de imágenes médicas. Está destinado a proporcionar herramientas para tareas comunes, como segmentación y clasificación, en una amplia variedad de modalidades de imagen.⁽³⁷⁾

MedSeg

Aunque no es una herramienta en sí, MedSeg es un repositorio de conjuntos de datos de segmentaciones manuales de imágenes médicas. La disponibilidad de estas



segmentaciones facilita la formación y validación de modelos de Deep Learning en tareas específicas de segmentación.

El enfoque open source en Radiología ha sido una fuente inestimable de innovación y progreso de las técnicas de Deep Learning. Estas herramientas y proyectos, accesibles y modulables, están democratizando el acceso a técnicas avanzadas en la práctica clínica y la investigación, permitiendo que incluso centros con recursos limitados puedan beneficiarse de la revolución de la inteligencia artificial en la Medicina.

Perspectiva multidisciplinar y colaboración global

La naturaleza inclusiva y colaborativa del enfoque open source ha fomentado una amalgama de talento proveniente de diferentes disciplinas, generando un terreno fértil para el desarrollo de soluciones innovadoras en Radiología. Esta fusión de conocimientos desempeña un papel central en el avance acelerado de la tecnología y la investigación en este campo. La colaboración entre radiólogos, científicos de datos, ingenieros de software y especialistas en ética ha fructificado en una perspectiva multidisciplinar que está influyendo en la evolución de la Radiología.

El análisis y modelado estadístico de imágenes médicas requiere no sólo una comprensión profunda de las técnicas de aprendizaje automático y procesamiento de imágenes, sino también un conocimiento fundamental de la anatomía, fisiología y patología. La colaboración entre ingenieros informáticos, radiólogos, biólogos y médicos ha permitido crear soluciones que son clínicamente relevantes y técnicamente avanzadas.⁽³⁸⁾

Universidades y centros de investigación de renombre mundial contribuyen activamente al ecosistema open source en Radiología. Estas instituciones lanzan proyectos, liberan datasets y herramientas que benefician a la comunidad global, promoviendo un espíritu de aprendizaje colectivo y mejora continua; con resultados sorprendentes que rivalizan con el desempeño de los profesionales médicos más avezados.⁽³⁹⁻⁴¹⁾

Además de la academia, la industria ha reconocido el valor del enfoque open source. Empresas emergentes y grandes corporaciones están colaborando en proyectos de código abierto o lanzando sus propias soluciones, lo que a menudo conduce a mejoras en la eficiencia y la escalabilidad.⁽⁴²⁾

El acceso gratuito a herramientas y recursos ha permitido que incluso individuos y equipos con recursos limitados innoven y contribuyan. Estos "innovadores de base" a menudo aportan soluciones únicas a problemas específicos, enriqueciendo el ecosistema general.⁽⁷⁾

La organización de talleres y competiciones en conferencias internacionales, como la MICCAI o la IEEE ISBI, ha incentivado la colaboración y la competencia saludable. Estas plataformas ofrecen oportunidades para presentar, discutir y evaluar las últimas soluciones en un entorno colaborativo.⁽⁴³⁾



Además, el enfoque open source ha permitido el desarrollo y la distribución de material educativo de alta calidad. Desde cursos en línea hasta talleres prácticos, hay una creciente disponibilidad de recursos para formar a la próxima generación de profesionales en la intersección de la Radiología y la Informática Médica.⁽⁴⁴⁾

La colaboración y la perspectiva multidisciplinar son intrínsecas al espíritu de los desarrollos open source. En el campo de la Radiología, esta amalgama de talento y conocimiento ha desempeñado un papel vital en la aceleración de la investigación y el desarrollo tecnológico, garantizando que las soluciones sean más completas, inclusivas y estén en sintonía con las necesidades clínicas reales.

Conclusión

El ámbito de la Radiología ha experimentado una transformación revolucionaria con la inclusión de tecnologías avanzadas basadas en Deep Learning. Sin embargo, el verdadero catalizador de esta evolución no ha sido únicamente la tecnología en sí, sino la filosofía open source que ha permeado este desarrollo. Esta tendencia hacia la apertura y la colaboración ha democratizado el acceso a herramientas de vanguardia, permitiendo un progreso colectivo que abarca desde grandes instituciones hasta individuos y emprendimientos.

El poder del movimiento open source reside en su capacidad para aprovechar una base global de conocimientos. Cada contribución, ya sea un fragmento de código, un dataset, una corrección de errores, una mejora algorítmica o la escritura de documentación, suma a la riqueza del ecosistema. Estas contribuciones provienen de una variedad de contextos, desde la academia hasta la industria, y abarcan disciplinas desde la informática hasta la medicina. Es esta diversidad la que asegura que las soluciones desarrolladas sean robustas, versátiles y relevantes.

Un rasgo esencial que emerge del modelo open source es la capacidad de adaptabilidad. A medida que la ciencia y la tecnología avanzan, las soluciones basadas en el open source tienen el potencial de evolucionar rápidamente, adaptándose a los cambios en las necesidades y a los nuevos desafíos del mundo médico. Esto se contrasta con soluciones propietarias que, en ocasiones, pueden quedar rezagadas o encapsuladas en su propio ecosistema.

Asimismo, es preciso reconocer que, más allá de los avances tecnológicos, el enfoque open source fomenta una cultura de aprendizaje y mejora continua. Facilita la formación de redes colaborativas y comunidades donde los profesionales pueden compartir, discutir y perfeccionar sus habilidades y conocimientos.

Sin embargo, con grandes oportunidades vienen grandes responsabilidades. El movimiento open source no está exento de desafíos, particularmente en un dominio tan delicado y crítico como la medicina. La privacidad, la interpretación correcta de los datos y la validación clínica son cuestiones que requieren una consideración cuidadosa y ética.



El modelo open source en la intersección de la Radiología y el Deep Learning no es simplemente una tendencia pasajera, sino una filosofía de desarrollo y colaboración que tiene el potencial de moldear el futuro de la atención médica. Al adoptar este enfoque y alentar la participación multidisciplinar, la comunidad global puede continuar avanzando hacia soluciones que son más precisas, accesibles, transparentes y en última instancia, beneficiosas para pacientes y profesionales por igual. La clave reside en abordar los desafíos con prudencia y mantener la esencia colaborativa y abierta en el núcleo de todas las iniciativas.

Referencias

1. Lysaght T, Lim HY, Xafis V, Ngiam KY. AI-Assisted Decision-making in Healthcare. ABR [Internet]. 2019;11:299–314. Disponible en: <http://doi.org/10.1007/s41649-019-00096-0>
2. Stallman R. Free Software, Free Society. 3 ed [Internet]. Boston: Free Software Foundation; 2002 [Citado 10/08/2023]. Disponible: <https://www.gnu.org/doc/fsfs3-hardcover.pdf>
3. Haux R. Health information systems – past, present, future. International Journal of Medical Informatics [Internet]. 2006;75:268–81. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2005.08.002>
4. Dabbish L, Stuart C, Tsay J, Herbsleb J. Social coding in GitHub: transparency and collaboration in an open software repository. Proceedings of the ACM 2012 conference on Computer Supported Cooperative Work [Internet]. New York: Association for Computing Machinery; 2012. pp. 1277–1286. Disponible en: <http://doi.org/10.1145/2145204.2145396>
5. Schroeder W, Martin K, Lorensen W. The Visualization Toolkit. 4 ed. New York: Kitware Inc; 2006.
6. Collins FS, Varmus H. A New Initiative on Precision Medicine. New England Journal of Medicine [Internet]. 2015;372:793–5. Disponible en: <http://doi.org/10.1056/NEJMp1500523>
7. Litjens G, Kooi T, Bejnordi BE, Setio AAA, Ciompi F, Ghafoorian M, et al. A survey on deep learning in medical image analysis. Medical Image Analysis [Internet]. 2017;42: 60–88. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.005>
8. Abadi M, Agarwal A, Barham P, Brevdo E, Chen Z, Citro C, et al. TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems [Internet]. EE UU: arXiv; 2016. Disponible en: <http://doi.org/10.48550/arXiv.1603.04467>
9. Russakovsky O, Deng J, Su H, Krause J, Satheesh S, Ma S, et al. ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. Int J Comput Vis [Internet]. 2015;115:211–52. Disponible en: <http://doi.org/10.1007/s11263-015-0816-y>
10. Jia Y, Shelhamer E, Donahue J, Karayev S, Long J, Girshick R, et al. Caffe: Convolutional Architecture for Fast Feature Embedding. Proceedings of the 22nd ACM international conference on Multimedia [Internet]. New York: Association for Computing Machinery; 2014. pp. 675–678. Disponible en: <http://doi.org/10.1145/2647868.2654889>



11. Cardoso MJ, Li W, Brown R, Ma N, Kerfoot E, Wang Y, et al. MONAI: An open-source framework for deep learning in healthcare [Internet]. EE UU: arXiv; 2022. Disponible en: <http://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02701>
12. Cropf RA. Benkler, Y. The Wealth of Networks: How Social Production Transforms Markets and Freedom. New Haven and London: Yale University Press; 2006 [Citado 10/08/2023]. Disponible en: https://www.benkler.org/Benkler_Wealth_Of_Networks.pdf
13. Munafò MR, Nosek BA, Bishop DVM, Button KS, Chambers CD, Percie du Sert N, et al. A manifesto for reproducible science. Nat Hum Behav [Internet]. 2017;1:1–9. Disponible en: <http://doi.org/10.1038/s41562-016-0021>
14. Hippel E von, Krogh G von. Open Source Software and the “Private-Collective” Innovation Model: Issues for Organization Science. Organization Science [Internet]. 2003;14:209–23. Disponible en: <http://doi.org/10.1287/orsc.14.2.209.14992>
15. Raymond ES. The Cathedral & the Bazaar [Internet]. Massachusetts: O’Reilly Media Inc.; 2001 [Citado 10/08/2023]. Disponible en: <https://www.oreilly.com/library/view/the-cathedral/0596001088/>
16. Wheeler DA. Why open source software/free software (OSS/FS, FLOSS, or FOSS)? Look at the numbers [Internet]. EE UU: dwheeler; 2007 [Citado 10/08/2023]. Disponible en: https://dwheeler.com/oss_fs_why.html
17. Hoepman J-H, Jacobs B. Increased security through open source. Commun ACM [Internet]. 2007;50:79–83. Disponible en: <http://doi.org/10.1145/1188913.1188921>
18. Donoho DL. An invitation to reproducible computational research. Biostatistics [Internet]. 2010 ;11:385–8. Disponible en: <http://doi.org/10.1093/biostatistics/kxq028>
19. Wong Pérez D, Mar Cornelio O. HL7 un estándar de interoperabilidad en salud: Revisión sistemática de la literatura. Revista Cubana de Informática Médica [Internet]. 2023 [Citado 10/08/2023];15(2):e627. Disponible en: <https://revinformatica.sld.cu/index.php/rcim/article/view/627>
20. Bretthauer D. Open Source Software: A History [Internet]. EE UU: Open Commons @UConn; 2001 [Citado 10/08/2023]. Disponible en: https://opencommons.uconn.edu/libr_pubs/7
21. Malin BA. Protecting genomic sequence anonymity with generalization lattices. Methods Inf Med. 2005;44: 687–92.
22. Grañana L, Auñón JM. uTile, la solución de GMV para generalizar el uso de las PETs [Internet]. Revista SIC: ciberseguridad, seguridad de la información y privacidad. 2022 [Citado 10/08/2023];31:158–9. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8494623>
23. Wynants L, Calster BV, Collins GS, Riley RD, Heinze G, Schuit E, et al. Prediction models for diagnosis and prognosis of covid-19: systematic review and critical appraisal. BMJ [Internet]. 2020;369:m1328. Disponible en: <http://doi.org/10.1136/bmj.m1328>
24. Schroeder B, Wierman A, Harchol-Balter M. Open versus closed: A cautionary tale. NSDI 2006 [Internet]. EE UU: USENIX Association; 2006 [Citado 10/08/2023]. Disponible en: https://www.usenix.org/legacy/event/nsdi06/tech/full_papers/schroeder/schroeder_html/



25. Fitzgerald B, Kenny T. Open source software the trenches: Lessons from a large-scale OSS implementation. Conference: Proceedings of the International Conference on Information Systems, ICIS 2003, December 14-17, 2003, Seattle, Washington, USA [Internet]. EE UU: Semantic Scholar; 2003 [Citado 10/08/2023]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Open-Source-Software-the-Trenches%3A-Lessons-from-a-Fitzgerald-Kenny/dae42cea39a13767230bddbfa806d97e01bb295>
26. Riehle D. The economic case for open source foundations. *Computer*. 2010;43: 86–90.
27. Loukides G, Denny JC, Malin B. The disclosure of diagnosis codes can breach research participants' privacy. *Journal of the American Medical Informatics Association* [Internet]. 2010;17:322–7. Disponible en: <http://doi.org/10.1136/jamia.2009.002725>
28. Iglesias López D. Impacto de la Inteligencia Artificial en la Radiología. *Revista Cubana de Informática Médica* [Internet]. 2023; ;15(1):e624 [Citado 10/08/2023]. Disponible en: <https://revinformatica.sld.cu/index.php/rcim/article/view/624>
29. Rosset A, Spadola L, Ratib O. OsiriX: An Open-Source Software for Navigating in Multidimensional DICOM Images. *Journal of Digital Imaging* [Internet]. 2004;17:205. Disponible en: <http://doi.org/10.1007/s10278-004-1014-6>
30. Yoo TS, Ackerman MJ, Lorensen WE, Schroeder W, Chalana V, Aylward S, et al. Engineering and Algorithm Design for an Image Processing API: A Technical Report on ITK - the Insight Toolkit. *Stud Health Technol Inform* [Internet]. 2002 [Citado 10/08/2023];85:586-92. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15458157/>
31. Fedorov A, Beichel R, Kalpathy-Cramer J, Finet J, Fillion-Robin J-C, Pujol S, et al. 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Magnetic Resonance Imaging* [Internet]. 2012;30:1323–41. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.mri.2012.05.001>
32. Gentleman RC, Carey VJ, Bates DM, Bolstad B, Dettling M, Dudoit S, et al. Bioconductor: open software development for computational biology and bioinformatics. *Genome Biology* [Internet]. 2004;5:R80. Disponible en: <http://doi.org/10.1186/gb-2004-5-10-r80>
33. Mamlin BW, Biondich PG, Wolfe BA, Fraser H, Jazayeri D, Allen C, et al. Cooking Up An Open Source EMR For Developing Countries: OpenMRS – A Recipe For Successful Collaboration. *AMIA Annu Symp Proc*. 2006;2006: 529–33.
34. Simpson AL, Antonelli M, Bakas S, Bilello M, Farahani K, van Ginneken B, et al. A large annotated medical image dataset for the development and evaluation of segmentation algorithms [Internet]. EE UU: arXiv; 2019. Disponible en: <http://doi.org/10.48550/arXiv.1902.09063>
35. Gibson E, Li W, Sudre C, Fidon L, Shakir DI, Wang G, et al. NiftyNet: a deep-learning platform for medical imaging. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* [Internet]. 2018;158:113–22. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.cmpb.2018.01.025>
36. Kamnitsas K, Ledig C, Newcombe VFJ, Simpson JP, Kane AD, Menon DK, et al. Efficient multi-scale 3D CNN with fully connected CRF for accurate brain lesion segmentation. *Medical Image Analysis* [Internet]. 2017;36:61–78. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.media.2016.10.004>



37. Tustison N, Avants B. Explicit B-spline regularization in diffeomorphic image registration. *Frontiers in Neuroinformatics* [Internet]. 2013[Citado 10/08/2023];7. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fninf.2013.00039>
38. Erickson BJ, Korfiatis P, Akkus Z, Kline TL. Machine Learning for Medical Imaging. *Radiographics* [Internet]. 2017;37:505–15. Disponible en: <http://doi.org/10.1148/rg.2017160130>
39. Badrinarayanan V, Kendall A, Cipolla R. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [Internet]. 2017;39:2481–95. Disponible en: <http://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2644615>
40. He B, Kwan AC, Cho JH, Yuan N, Pollick C, Shiota T, et al. Blinded, randomized trial of sonographer versus AI cardiac function assessment. *Nature* [Internet]. 2023;616:520–4. Disponible en: <http://doi.org/10.1038/s41586-023-05947-3>
41. Lång K, Josefsson V, Larsson A-M, Larsson S, Högberg C, Sartor H, et al. Artificial intelligence-supported screen reading versus standard double reading in the Mammography Screening with Artificial Intelligence trial (MASAI): a clinical safety analysis of a randomised, controlled, non-inferiority, single-blinded, screening accuracy study. *The Lancet Oncology* [Internet]. 2023;24:936–44. Disponible en: [http://doi.org/10.1016/S1470-2045\(23\)00298-X](http://doi.org/10.1016/S1470-2045(23)00298-X)
42. Miao S, Wang ZJ, Liao R. A CNN Regression Approach for Real-Time 2D/3D Registration. *IEEE Transactions on Medical Imaging* [Internet]. 2016;35:1352–63. Disponible en: <http://doi.org/10.1109/TMI.2016.2521800>
43. Maier-Hein L, Eisenmann M, Reinke A, Onogur S, Stankovic M, Scholz P, et al. Why rankings of biomedical image analysis competitions should be interpreted with care. *Nat Commun* [Internet]. 2018;9:5217. Disponible en: <http://doi.org/10.1038/s41467-018-07619-7>
44. Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In: Navab N, Hornegger J, Wells WM, Frangi AF, eds. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015* [Internet]. New York: Springer International Publishing; 2015. pp. 234–41. Disponible en: http://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Declaración de autoría

Rebeca Tenajas: Aportaciones importantes a la conceptualización de la investigación, estudio de la bibliografía, análisis e interpretación de datos, la redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y la aprobación final de la versión a publicar.

David Miraut: Aportaciones importantes a la idea y diseño de la investigación, estudio de la bibliografía, análisis e interpretación de datos, la redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y la aprobación final de la versión a publicar.

