

Evaluación comparativa bajo criterios de sostenibilidad: Tecnologías de adquisición de imágenes desde el punto de vista técnico, impacto ambiental, costos operativos y consumo de energía

Diego Alexander Florez Silva

Juan Camilo Delgado Rojas

Laura Viviana Lozada Rodriguez

Oscar Adolfo Gélvez Jaimes

Silvia Juliana Díaz Herreño

Asesor

Javier Alberto Pérez Murillas

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias de la salud

Tecnología en Radiología e Imágenes Diagnósticas

2025

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a nuestras familias y seres queridos, quienes con paciencia, apoyo y comprensión nos brindaron la motivación necesaria para culminar este diplomado.

También lo dedicamos a nuestros compañeros de grupo, quienes con colaboración, compromiso y espíritu de equipo hicieron posible el aprendizaje compartido y el crecimiento profesional.

Agradecimientos

Agradecemos primero a Dios, por brindarnos fortaleza, paciencia y sabiduría necesarias para culminar este diplomado con éxito.

A nuestras familias por su apoyo incondicional, acompañamiento y palabras de aliento.

A la UNAD, por ofrecer los espacios, recursos y herramientas educativas que hicieron posible nuestro desarrollo académico y profesional.

Expresamos nuestra gratitud a nuestro tutor, Javier Alberto Pérez, por su orientación, paciencia y conocimientos durante todo el diplomado, guiándonos en la realización de este trabajo y en el fortalecimiento de nuestras competencias.

También reconocemos el esfuerzo y colaboración de cada integrante del grupo: Diego Alexander Florez Silva, Juan Camilo Delgado Rojas, Laura Viviana Lozada Rodríguez, Óscar Adolfo Gelvez Jaimes y Silvia Juliana Díaz Herreño, quienes trabajamos activamente para alcanzar el éxito de este proyecto, demostrando compromiso, responsabilidad y trabajo en equipo.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que, de manera directa o indirecta, apoyaron al desarrollo de nuestro proyecto académico: compañeros de clase, personal administrativo, docentes, radiólogos y a todos los que compartieron sus conocimientos, experiencias y apoyo para que pudiéramos culminar esta etapa de formación con éxito.

Resumen

En el marco de la sostenibilidad y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el sector salud enfrenta el desafío de incorporar criterios ambientales, energéticos y económicos en la gestión de tecnologías médicas. La imagenología diagnóstica, como tomografía computarizada, resonancia magnética, rayos X digitales y ecografía, es esencial para la práctica clínica, pero conlleva elevado consumo energético, costos operativos significativos y creciente impacto ambiental. Esta investigación bibliográfica propone un modelo de evaluación comparativa que integra criterios de sostenibilidad en la adquisición y uso de tecnologías de imagen médica. A partir del análisis de estudios científicos, normativas y propuestas institucionales, se elabora una matriz multicriterio que considera desempeño técnico, eficiencia energética, huella de carbono, generación de residuos, costos de operación y mantenimiento, y adaptabilidad a distintos contextos institucionales. Se adopta un enfoque de ciclo de vida completo, evaluando fabricación, uso y disposición final de los equipos, con el objetivo de promover decisiones tecnológicas más responsables. Se destaca además el papel emergente de la inteligencia artificial como herramienta para optimizar recursos, reducir tiempos de procesamiento y disminuir el impacto ambiental de los estudios diagnósticos. Los resultados permiten establecer directrices prácticas para una gestión tecnológica ética, eficiente y sostenible, fortaleciendo sistemas de salud resilientes y ambientalmente responsables. En conjunto, esta revisión orienta a gestores hospitalarios, profesionales de la salud y responsables de políticas públicas hacia una toma de decisiones informada, fomentando una cultura de ecoeficiencia, responsabilidad ambiental y compromiso ético en los servicios de diagnóstico por imagen.

Palabras clave: sostenibilidad tecnológica, consumo energético, evaluación comparativa, huella de carbono, gestión de tecnologías sanitarias.

Abstract

Within the framework of sustainability and the Sustainable Development Goals (SDGs), the healthcare sector faces the challenge of incorporating environmental, energy, and economic criteria into the management of medical technologies. Diagnostic imaging, including computed tomography, magnetic resonance imaging, digital X-rays, and ultrasound, is essential for clinical practice but involves high energy consumption, significant operational costs, and an increasing environmental impact. This bibliographic study proposes a comparative evaluation model that integrates sustainability criteria into the acquisition and use of medical imaging technologies. Based on the analysis of scientific studies, regulations, and institutional proposals, a multicriteria matrix is developed considering technical performance, energy efficiency, carbon footprint, waste generation, operational and maintenance costs, and adaptability to different institutional contexts. A full life-cycle approach is adopted, assessing equipment manufacturing, use, and end-of-life, aiming to promote more responsible technological decisions. Furthermore, the emerging role of artificial intelligence is highlighted as a tool to optimize resources, reduce processing times, and minimize the environmental impact of diagnostic studies. The results provide practical guidelines for ethical, efficient, and sustainable technology management, strengthening resilient and environmentally responsible healthcare systems. Overall, this review guides hospital managers, healthcare professionals, and policymakers toward informed decision-making, fostering a culture of eco-efficiency, environmental responsibility, and ethical commitment in medical imaging services.

Keywords: technological sustainability, energy consumption, comparative evaluation, carbon footprint, healthcare technology management.

Tabla de Contenido

Introducción	9
Planteamiento del Problema	14
Justificación	17
Objetivos	20
Objetivo General.....	20
Objetivo Específicos.....	20
Marco Teórico.....	21
Sostenibilidad Tecnológica.....	23
Tecnologías de Adquisición de Imágenes: Evaluación Técnica y Ambiental.....	23
Evaluación del Impacto Ambiental en Tecnologías Médicas	24
Criterios de Sostenibilidad en Procesos de Adquisición Institucional	24
Estrategias de Sostenibilidad Aplicables a Tecnologías Médicas	25
Adquisición Tecnológica en Imagenología: Criterios y Procesos.....	27
Control de Calidad y Desempeño Técnico	29
Sostenibilidad Ambiental en Servicios de Imagenología	30
Innovación Tecnológica y Competencias Profesionales	30
Hacia una Evaluación Integral de Sostenibilidad en Imagenología	31
Eficiencia Energética en Radiología.....	32
Radiología y Cambio Climático: una Responsabilidad Emergente.....	33
Sostenibilidad en Entornos de Bajos Recursos.....	33
Procesos Tecnológicos Hospitalarios con Enfoque Ambiental	34
Inteligencia Artificial como Herramienta de Sostenibilidad Diagnóstica	34

Procesos Sostenibles desde una Perspectiva Institucional.....	37
Prácticas Sostenibles y Recomendaciones Clínicas	38
Marco Metodológico.....	40
Diseño Metodológico	40
Fases de la Investigación	41
Fase 1. Revisión Documental Sistemática.....	41
Fase 2. Identificación y Categorización de Variables Clave	41
Fase 3. Diseño de la Matriz Comparativa Multicriterio	41
Fase 4. Análisis e Interpretación de Resultados	41
Fase 5. Formulación de Recomendaciones.....	42
Análisis de Resultados	43
Dimensión Técnica	43
Dimensión Ambiental.....	43
Dimensión Energética.....	44
Dimensión Económica.....	44
Conclusiones.....	54
Recomendaciones	56
Referencias Bibliográficas	58

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Evaluación de tecnologías de imagenología médica según eficiencia técnica.....</i>	45
Tabla 2 <i>Comparativa de tecnologías de imagenología médica desde el impacto ambiental y consumo energético.....</i>	46
Tabla 3 <i>Comparativa de tecnologías de imagenología médica basada en accesibilidad y costo operativo genología médica según eficiencia técnica.....</i>	48
Tabla 4 <i>Comparación de tecnologías de imagenología desde criterios técnicos, económicos y ambientales.....</i>	49
Tabla 5 <i>Evaluación multicriterio de tecnologías de adquisición de imágenes con enfoque de ciclo de vida tecnológico.....</i>	52

Introducción

Durante la última década, el sector salud ha experimentado una profunda transformación impulsada por avances tecnológicos, digitalización y nuevas demandas sociales. La imagenología médica, como eje fundamental en la toma de decisiones clínicas, ha sido uno de los campos con mayor crecimiento y sofisticación técnica. Sin embargo, este progreso ha venido acompañado de retos emergentes, entre ellos el aumento en el consumo energético, la generación de residuos tecnológicos y la presión sobre los recursos institucionales.

En un contexto global marcado por el cambio climático y la urgencia de adoptar prácticas sostenibles, la necesidad de replantear los procesos asociados a la adquisición y uso de tecnologías médicas se vuelve un imperativo ético, económico y ambiental. Instituciones sanitarias de todo el mundo están reconociendo la importancia de integrar criterios de sostenibilidad en sus decisiones, como parte de un compromiso más amplio hacia sistemas de salud resilientes y responsables.

Estudios como los de Esmaeili et al., (2014) y McCarthy et al., (2014) subrayan que una parte significativa del gasto energético hospitalario proviene de equipos de imagenología que permanecen activos aun cuando no están siendo utilizados, debido a protocolos operativos tradicionales que no priorizan la eficiencia.

Los servicios de imagen diagnóstica, incluyendo tomografía computarizada (TC), resonancia magnética (RM), radiología digital y ecografía, son indispensables para la atención clínica moderna, al permitir diagnósticos precisos, seguimiento terapéutico y detección temprana de patologías. Su papel es tan decisivo que la demanda de estudios ha incrementado de manera sostenida en los últimos años, impulsada por el envejecimiento poblacional, la ampliación de coberturas en salud y los avances en tecnologías digitales. Sin embargo, este crecimiento ha

traído consigo importantes desafíos relacionados con la sostenibilidad ambiental y operativa del sector salud.

Diversas investigaciones han evidenciado que los servicios de imagen diagnóstica se encuentran entre los mayores consumidores de energía dentro de los hospitales. Equipos como la TC y, especialmente, la RM, presentan requerimientos energéticos significativamente altos debido a su operación continua, el uso de sistemas de enfriamiento de gran capacidad, el consumo en modo de espera, stand-by y la necesidad de mantener condiciones ambientales estrictas para su correcto funcionamiento (Heye et al., 2020; Chaban et al., 2023).

Estos factores no solo incrementan los costos institucionales, sino que además generan una huella ambiental considerable, convirtiendo a la imagenología en uno de los servicios con mayor impacto energético en la infraestructura hospitalaria (Woolen et al., 2022; Roletto et al., 2024).

El concepto de sostenibilidad ha dejado de ser una tendencia para convertirse en un criterio esencial en la planificación y gestión de servicios de salud. La adquisición de tecnologías médicas debe considerar no solo la calidad diagnóstica y la eficiencia clínica, sino también el consumo energético, la vida útil del dispositivo, la gestión de residuos electrónicos y la adaptabilidad de los equipos a las condiciones institucionales.

A lo anterior se suma el crecimiento acelerado de la demanda de estudios radiológicos, lo que ha intensificado la presión sobre los equipos, aumentado el riesgo de fallas y elevado los requerimientos de mantenimiento. Este escenario ha hecho más evidente la necesidad de renovar tecnologías obsoletas, optimizar los tiempos de uso y reducir prácticas ineficientes que contribuyen al desgaste prematuro de los equipos y al aumento del consumo energético.

Diversos autores y organismos internacionales destacan la importancia de incorporar metodologías de análisis comparativo, evaluaciones del ciclo de vida, indicadores ambientales y enfoques multidimensionales. En consecuencia, seleccionar tecnologías sin considerar su impacto ambiental o energético no solo genera costos operativos elevados, sino que compromete la sostenibilidad a largo plazo de los servicios de salud. De esta manera, surge la necesidad de integrar herramientas evaluativas que permitan decisiones más informadas y alineadas con los principios de responsabilidad ambiental y eficiencia institucional.

Frente al avance tecnológico en equipos biomédicos, la Inteligencia Artificial (IA) ha comenzado a posicionarse como un recurso estratégico para mejorar la eficiencia operativa, optimizar los flujos de trabajo y reducir el impacto ambiental en la imagenología médica. Aplicaciones de IA permiten disminuir tiempos de escaneo, mejorar la reconstrucción de imágenes con menor dosis de radiación, reducir el consumo energético del equipo y apoyar la toma de decisiones clínicas con mayor precisión.

En países como Colombia y en instituciones internacionales, la IA está siendo utilizada para acelerar procesos, evitar repeticiones de estudios, aprovechar mejor los recursos y facilitar diagnósticos más rápidos y exactos. Este avance tecnológico no solo responde a la necesidad de mejorar la calidad asistencial, sino que contribuye a modelos de sostenibilidad diagnóstica que buscan reducir la presión sobre los equipos y el gasto institucional, promoviendo una imagenología más eficiente, segura y ambientalmente responsable.

En este contexto, las instituciones enfrentan un doble desafío: por un lado, responder de manera oportuna y efectiva a las necesidades clínicas de la población; y por otro, implementar estrategias que reduzcan la huella ecológica y mejoren la eficiencia energética del servicio. Esto implica adoptar modelos de gestión más responsables y sostenibles, en los que la selección de

tecnologías biomédicas considere no solo el rendimiento técnico, sino también indicadores ambientales como consumo energético, emisiones asociadas, vida útil del dispositivo y facilidad de mantenimiento, tal como recomiendan Sumner et al., (2023) y Anudjo et al., (2023).

Analizar la sostenibilidad en la selección de tecnologías para imagenología resulta fundamental para orientar decisiones basadas en evidencia, mejorar el desempeño institucional y reducir el impacto ambiental asociado a estos servicios. A través de un enfoque que integra criterios técnicos, energéticos, económicos y ambientales, este estudio busca aportar una herramienta metodológica que responda a los desafíos actuales del sector.

Este escenario resalta la urgencia de establecer procesos de adquisición tecnológica más rigurosos, transparentes y orientados a la sostenibilidad. Incorporar criterios técnicos, económicos, energéticos y ambientales en la evaluación de equipos de imagenología no solo favorece la eficiencia institucional, sino que permite avanzar hacia modelos de salud más responsables y alineados con los objetivos globales de sostenibilidad. De acuerdo con el PNUMA (2021) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2013), las instituciones deben priorizar tecnologías que reduzcan el impacto ambiental, optimicen recursos y garanticen un equilibrio entre calidad diagnóstica y sostenibilidad operativa.

La revisión de literatura, el análisis de estudios recientes y la comparación de criterios de adquisición permitirán comprender de manera más profunda cómo la sostenibilidad debe incorporarse como un eje transversal en todo proceso de renovación o incorporación tecnológica. Además, se destaca el papel emergente de la IA como facilitadora de prácticas más eficientes, ofreciendo una perspectiva actualizada sobre su contribución a la sostenibilidad diagnóstica.

En conjunto, este trabajo busca fortalecer la toma de decisiones institucionales, promoviendo un modelo de gestión responsable, acorde con los retos del cambio climático, la optimización de recursos y las exigencias de la atención médica contemporánea.

Planteamiento del Problema

En la imagenología médica, tecnologías como la tomografía computarizada (TC), resonancia magnética (RM), rayos X digitales y ecografía desempeñan un papel indispensable en el diagnóstico clínico moderno. Sin embargo, su adopción y renovación continúan guiándose principalmente por criterios técnicos, como resolución espacial, precisión diagnóstica, rapidez de adquisición, compatibilidad tecnológica, dejando de lado variables críticas relacionadas con el impacto ambiental, el consumo energético y la sostenibilidad económica. Esta visión reducida ha generado decisiones tecnológicas que, si bien satisfacen necesidades inmediatas de rendimiento, reproducen esquemas tecnocéntricos que perpetúan altos niveles de consumo energético, generación de residuos electrónicos y costos operativos crecientes.

Muñoz (2019) advierte que continuar adoptando tecnologías sin evaluar su impacto ambiental contribuye a reproducir esquemas tecnocéntricos y extractivistas, con consecuencias ecológicas acumulativas que contradicen el ideal de sostenibilidad. Este problema exige repensar los criterios con los que se evalúan estas tecnologías.

En el contexto de la imagenología, estos riesgos se manifiestan en el uso intensivo de energía eléctrica, especialmente en equipos como la resonancia magnética, cuyo funcionamiento continuo implica un alto gasto energético y la tomografía computarizada, donde el enfriamiento, la operación y el mantenimiento también elevan el consumo de recursos. A pesar de ello, las instituciones de salud continúan priorizando el rendimiento operativo sin evaluar adecuadamente su huella ambiental.

Un segundo aspecto crítico es la ausencia de indicadores estandarizados que permitan evaluar la sostenibilidad de estas tecnologías. Aunque discursos institucionales y políticas globales apoyan la protección ambiental, estos principios rara vez se traducen en métricas

aplicables a los procesos de compra y gestión tecnológica. Como destacan Loayza y Silva (2015), la sostenibilidad debe integrar variables como eficiencia energética, emisiones y gestión de residuos en todas las etapas del ciclo de vida tecnológico. No obstante, las instituciones carecen de herramientas prácticas que permitan incorporar estos criterios en la toma de decisiones, lo que genera brechas entre los lineamientos ambientales y las acciones reales.

Desde un enfoque sistémico, Durán (2013) plantea que la transferencia e implementación de tecnologías debe incorporar criterios tecno-ambientales, considerando su comportamiento en contextos locales, su adaptabilidad y el consumo de recursos que implica su funcionamiento. En este sentido, las tecnologías de adquisición de imágenes deben ser analizadas no solo por su desempeño técnico, sino por su compatibilidad con metas de eficiencia energética, reducción de impactos y sostenibilidad operativa. Esto implica la necesidad de desarrollar marcos metodológicos que analicen el ciclo de vida de estas tecnologías, desde su adquisición hasta su disposición final.

A nivel metodológico, la falta de instrumentos que permitan analizar de manera integrada los aspectos técnicos, ambientales, energéticos y económicos de estas tecnologías limita la capacidad de los centros de salud para tomar decisiones informadas y responsables. Garnica et al., (2024) señalan que, en el ámbito de la tomografía computarizada, la comparación entre clínicas del sur de Bogotá y hospitales de España revela disparidades significativas en eficiencia operativa, impacto ambiental y costos.

Estas diferencias subrayan la necesidad de establecer criterios comparativos claros que permitan seleccionar tecnologías que no solo sean técnicamente competentes, sino también ambiental y económicamente sostenibles. Este vacío metodológico también es reconocido en el contexto colombiano por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2013), que destaca

la importancia de incorporar criterios de sostenibilidad en la adopción de tecnologías para enfrentar los desafíos del cambio climático.

La problemática se amplía al considerar que las instituciones de salud enfrentan restricciones presupuestales, presiones asistenciales y demandas crecientes por servicios diagnósticos más rápidos y eficientes. Estas condiciones fomentan decisiones apresuradas orientadas únicamente por el costo inicial o el rendimiento técnico, ignorando los costos operativos a largo plazo, la vida útil del equipo, el impacto energético acumulado y la generación de residuos electrónicos.

Finalmente, tal como lo expone Vega (2015), la sostenibilidad tecnológica debe evaluarse con herramientas multidimensionales que combinen datos cuantitativos como el consumo energético, costos operativos y cualitativos como los impactos sociales y ambientales. Esta perspectiva coincide con los lineamientos del PNUMA (2021), que exige una transición hacia tecnologías más responsables en su producción, uso y disposición final. La falta de estos criterios en la evaluación de tecnologías de imagenología genera decisiones fragmentadas que no responden a las demandas ambientales globales ni a la necesidad de sistemas de salud más resilientes y eficientes.

Esta revisión literaria, da paso a la pregunta problema: ¿Cómo desarrollar una evaluación comparativa de tecnologías de adquisición de imágenes que integre criterios de sostenibilidad, considerando su desempeño técnico, impacto ambiental, costos operativos y consumo energético?

Justificación

La necesidad de abordar la sostenibilidad en la selección de tecnologías es urgente y transversal. La incorporación de criterios de sostenibilidad en la selección de tecnologías de adquisición de imágenes se ha convertido en una necesidad urgente y estratégica para los sistemas de salud contemporáneos. En un escenario global marcado por la crisis climática, la degradación ambiental y la presión sobre los recursos naturales, resulta inviable continuar con modelos de decisión tecnológica que prioricen exclusivamente el rendimiento técnico sin considerar su impacto energético, ambiental y económico.

Como afirma Muñoz (2019), las decisiones tecnológicas deben guiarse por el principio de bajo impacto ambiental y por criterios de eficiencia operativa reproduce lógicas extractivistas que incrementan la huella ecológica y generan impactos acumulativos a lo largo del tiempo. En el caso de las tecnologías de imagenología, como la resonancia magnética, la tomografía computarizada y los sistemas digitales de rayos X, estos impactos se manifiestan en altos consumos eléctricos, emisiones indirectas de CO₂, generación de residuos electrónicos y costos de operación crecientes. Continuar ignorando estas implicaciones compromete tanto la sostenibilidad ambiental como la estabilidad financiera de las instituciones de salud.

Por otro lado, Loayza y Silva (2015) enfatizan que el desarrollo tecnológico sostenible no solo debe enfocarse en mitigar impactos negativos, sino también en prevenirlos mediante una evaluación integral previa a su implementación. Sin herramientas que incorporen dimensiones ambientales y económicas, los procesos de adopción tecnológica terminan generando sobrecostos, ineficiencias y residuos tecnológicos que afectan tanto al ambiente como a la economía institucional.

A nivel metodológico, Durán (2013) propone un enfoque sistémico que considera el desempeño técnico de una tecnología en relación con su consumo de recursos, su adaptabilidad al contexto y su impacto ambiental en las diferentes etapas de su ciclo de vida. Aplicar este enfoque a las tecnologías de adquisición de imágenes permitiría no solo seleccionar equipos más eficientes y responsables, sino también garantizar su sostenibilidad a largo plazo dentro de las instituciones hospitalarias.

Asimismo, Vega (2015) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2021) destacan la importancia de emplear herramientas multidimensionales que integren datos cuantitativos, como energía consumida, emisiones y costos operativos y dimensiones cualitativas asociadas a impactos ambientales y sociales. La falta de metodologías comparativas que articulen ambos enfoques limita la capacidad de los sistemas de salud para realizar inversiones estratégicas, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Desde la perspectiva institucional, Garnica et al. (2024) señalan que la ausencia de criterios de sostenibilidad en la selección de equipos de imagenología conduce a decisiones tecnológicas que, aunque funcionales, pueden resultar ambientalmente insostenibles y económicamente onerosas. Estas observaciones se alinean con lo expuesto por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2013), que enfatiza la necesidad de adaptar las tecnologías a los desafíos climáticos actuales mediante evaluaciones que consideren simultáneamente variables técnicas, económicas y ambientales.

En este contexto, desarrollar una metodología de evaluación comparativa que integre criterios técnicos, ambientales, energéticos y económicos responde a una necesidad concreta del sector salud. No solo permitirá optimizar los procesos de adquisición y renovación tecnológica,

sino que fomentará prácticas responsables, reducirá el impacto ambiental de los servicios de imagenología y promoverá una cultura institucional de ecoeficiencia.

Por tanto, esta investigación se justifica por su aporte a la toma de decisiones informada, su contribución al fortalecimiento de la sostenibilidad hospitalaria y su relevancia para la construcción de sistemas de salud resilientes, eficientes y comprometidos con el cuidado del ambiente y el bienestar social.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una evaluación comparativa de tecnologías de adquisición de imágenes médicas basada en una revisión bibliográfica, integrando criterios de sostenibilidad técnica, ambiental, energética y económica.

Objetivo Específicos

Identificar los principales criterios e indicadores utilizados para evaluar la sostenibilidad de tecnologías de imagenología médica como la resonancia magnética, tomografía computarizada, rayos X digitales y ecografía.

Implementar matrices comparativas multicriterio que integre variables técnicas, ambientales, energéticas y económicas para analizar el grado de sostenibilidad de las tecnologías de imagen médica.

Establecer recomendaciones para la selección y gestión sostenible de tecnologías de imagenología en instituciones de salud, considerando su aplicabilidad en contextos diversos y de recursos limitados.

Marco Teórico

La sostenibilidad en el ámbito de la salud se ha convertido en prioridad, especialmente en lo relacionado con la adopción y uso de tecnologías médicas. Entre estas, las tecnologías de adquisición de imágenes, como la tomografía computarizada, la resonancia magnética o los equipos de rayos X, juegan un papel crucial en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades, pero también representan una carga significativa en términos de consumo energético, generación de residuos y costos operativos.

En este contexto, surge la necesidad de realizar evaluaciones comparativas que no solo se enfoquen en la eficiencia técnica de estos equipos, sino que integren criterios de sostenibilidad ambiental, energética y económica. Esta perspectiva multidimensional permite a las instituciones de salud tomar decisiones más responsables y alineadas con políticas de desarrollo sostenible.

La adquisición de tecnologías para imagenología médica representa uno de los desafíos más complejos en el sector salud, dado que involucra criterios técnicos y operativos, además de aspectos relacionados con la sostenibilidad ambiental, la eficiencia energética, la calidad del diagnóstico y la formación del talento humano. La evaluación comparativa de estas tecnologías debe considerar múltiples dimensiones que permitan tomar decisiones fundamentadas en criterios de largo plazo, más allá de la funcionalidad inmediata de los equipos.

La sostenibilidad ambiental en la imagenología médica ha cobrado creciente relevancia frente a los desafíos del cambio climático, el aumento del consumo energético y la responsabilidad social del sector salud. El uso de tomografía computarizada y resonancia magnética, entre otras, implica un alto consumo de recursos y genera impactos que deben ser analizados no solo desde la perspectiva técnica, sino también ambiental, económica y ética.

Entonces como un enfoque sostenible, surge la radiología verde, Lojo et al., (2024) describen green radiology como un enfoque sostenible, innovador y responsable que se centra en minimizar los efectos negativos ambientales de las tecnologías y procedimientos radiológicos para reducción del uso de energía, reciclaje de residuos, menor impacto de radiación, prácticas ecológicas.

Asimismo, surge el término Eco-radiología, que enfatiza la dimensión ecológica del uso de las tecnologías de imagen: es decir, la integración de criterios ambientales y ecológicos en el diseño, operación y gestión de los servicios radiológicos, abarcando prácticas como utilizar tecnologías menos contaminantes, adoptar dispositivos energéticamente eficientes, reciclar o reutilizar componentes, minimizar desperdicios, optimizar protocolos para menor uso de recursos, entre otros (Sustainability Directory, s.f.).

Finalmente, el ciclo de vida tecnológico en la radiología se refiere a la evaluación del impacto ambiental de los equipos de imagenología a lo largo de su ciclo de vida completo, desde la extracción de recursos y la fabricación hasta el uso y la disposición final. Esto implica considerar la eficiencia energética, el uso de materiales sostenibles, la gestión de residuos y la reciclabilidad de los equipos. Al adoptar un enfoque de ciclo de vida, los departamentos de radiología pueden identificar oportunidades para reducir su impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad de sus operaciones Amado y Puente (2020).

Con el fin de comprender los principales conceptos que sustentan la investigación, a continuación se abordan los temas clave relacionados con la sostenibilidad y la eficiencia en la adquisición de tecnologías de imagen médica, la sostenibilidad tecnológica en el sector salud, el impacto ambiental de las tecnologías médicas, los criterios sostenibles en procesos de adquisición institucional y las estrategias aplicables a la selección de equipos médicos:

Sostenibilidad Tecnológica

La sostenibilidad tecnológica involucra la adopción y evaluación de tecnologías que cumplan con criterios de eficiencia técnica, minimicen su impacto ambiental y fomenten la equidad social (Muñoz, 2019). En el campo de la salud, esta perspectiva es relevante al considerar tecnologías como las de adquisición de imágenes médicas, que requieren altos niveles de consumo energético, mantenimiento especializado y generan residuos tecnológicos que pueden tener un efecto negativo sobre el medio ambiente.

De esta manera, se deduce que la adopción de tecnologías con bajo impacto ambiental no solo dependen de sus características técnicas, sino también de factores políticos, sociales y económicos que facilitan o dificultan su implementación. Esta visión integral es esencial para comprender cómo las instituciones de salud pueden avanzar hacia modelos sostenibles de adquisición tecnológica.

Tecnologías de Adquisición de Imágenes: Evaluación Técnica y Ambiental

Garnica et al., (2024) desarrollaron un análisis comparativo entre tecnologías de TC utilizadas en clínicas de Bogotá y hospitales en España, donde se destaca que, aunque el desempeño técnico de las tecnologías de imagen médica es un criterio esencial en su selección, también deben considerarse el consumo energético, los costos operativos y el impacto ambiental asociado a su operación y mantenimiento.

Este enfoque integral permite identificar diferencias significativas en las prácticas de adquisición y uso de tecnologías de imagen, especialmente cuando se analizan desde una perspectiva de sostenibilidad y en contextos socioeconómicos y regulatorios distintos.

Evaluación del Impacto Ambiental en Tecnologías Médicas

La incorporación de criterios ambientales en la evaluación de tecnologías se apoya en metodologías establecidas para analizar impactos como el consumo de recursos, las emisiones de gases contaminantes, la generación de residuos y la huella energética. León (s.f.) ofrece lineamientos metodológicos claros para este tipo de análisis, permitiendo construir indicadores estructurados que sirven para medir el desempeño ambiental de tecnologías en el sector salud.

En este sentido, la evaluación ambiental no debe limitarse a la etapa operativa del equipo, sino que debe abarcar su ciclo de vida completo, desde la fabricación hasta su disposición final, favoreciendo la toma de decisiones informadas y sostenibles en las instituciones de salud.

El uso intensivo de modalidades como la resonancia magnética y la tomografía computarizada ha generado preocupaciones por su alto consumo energético. Chaban et al., (2023) exploran el impacto ambiental de la RM, detallando sus principales fuentes de contaminación, como el uso constante de helio, los sistemas de enfriamiento y el consumo eléctrico continuo y proponen soluciones prácticas para mitigar estos efectos. Asimismo, Roletto et al., (2024) realizan una revisión sobre las emisiones de carbono y consumo energético asociadas a equipos radiológicos, permitiendo comparar modalidades según su eficiencia ambiental, con una evaluación comparativa bajo criterios de sostenibilidad.

Criterios de Sostenibilidad en Procesos de Adquisición Institucional

Cavagliato et al., (2018) abordan la integración de criterios de sostenibilidad en los procesos de compra pública, resaltando la importancia de considerar el costo inicial de adquisición y también los costos asociados a la operación, mantenimiento y disposición final del equipo. En el contexto hospitalario, esta perspectiva es fundamental para orientar la compra de equipos médicos que sean sostenibles tanto económica como ambientalmente. Esta visión

promueve la responsabilidad institucional en la toma de decisiones de compra, alineándose con políticas públicas que buscan reducir la huella ambiental del sector salud mediante la adquisición responsable de bienes y servicios.

Estrategias de Sostenibilidad Aplicables a Tecnologías Médicas

La sostenibilidad en la gestión de tecnologías médicas requiere la adopción de estrategias que permitan reducir el impacto ambiental, optimizar el consumo energético y prolongar la vida útil de los equipos. Aunque dichas estrategias han sido ampliamente discutidas en áreas generales de la salud, diversos autores han demostrado su aplicabilidad directa a los servicios de imagenología y al proceso de adquisición de equipos médicos de alta demanda energética.

Acosta et al., (2024), ofrece estrategias transferibles al campo de la adquisición tecnológica, como la implementación de criterios de eficiencia energética y el uso de materiales sostenibles. Estas estrategias pueden ser adaptadas para establecer lineamientos técnicos y operativos en la instalación, operación y mantenimiento de tecnologías de adquisición de imágenes, contribuyendo así a un sistema de salud más sostenible.

Anudjo et al., (2023) plantean que la sostenibilidad ambiental en radiología debe incluir acciones de eficiencia energética, reducción de residuos y selección de equipos con menores emisiones de carbono. Este enfoque puede trasladarse al ámbito de la adquisición tecnológica mediante criterios más estrictos de evaluación que contemplen el consumo energético por hora de operación, la eficiencia de los sistemas de enfriamiento y la capacidad de los equipos para operar con modos de ahorro energético, lo que es relevante en tecnologías como la tomografía computarizada (TC) o la resonancia magnética (RM), conocidas por su elevado consumo eléctrico.

Asimismo, Arias et al., (2024) subrayan la necesidad de repensar los procesos radiológicos desde una lógica de sostenibilidad integral, proponiendo lineamientos que van desde la selección de equipos hasta su mantenimiento y eventual renovación. Dichas recomendaciones plantean, por ejemplo, la incorporación de tecnologías fabricadas con materiales de menor impacto ambiental, la elección de proveedores con certificaciones de sostenibilidad y la programación eficiente de agendas para evitar el funcionamiento continuo e innecesario de los dispositivos.

Heye et al., (2020) aportan evidencia sobre estrategias directas de ahorro energético en equipos de imagen. Estos autores destacan la importancia de modos de reposo avanzados, la optimización del tiempo de escaneo y la utilización de software inteligente para minimizar la energía consumida durante la operación. Tales estrategias pueden integrarse como exigencias técnicas en los pliegos de adquisición, garantizando que los nuevos equipos cuenten con sistemas automatizados de optimización energética.

De igual forma, McCarthy et al., (2014) introducen el concepto de EcoRadiología, que enfatiza la eliminación del desperdicio energético en los departamentos de radiología mediante prácticas como la calibración periódica, el apagado planificado de equipos en horarios no productivos y la adopción de tecnologías de bajo consumo. La incorporación de estos lineamientos en la fase de adquisición y operación garantizaría no solo un menor impacto ambiental, sino también una reducción significativa de los costos operativos.

Roletto et al., (2024), en su revisión sobre las emisiones de carbono y consumo energético en servicios de radiología, destacan la urgencia de adoptar indicadores ambientales cuantificables, como la huella de carbono por examen, el consumo energético por estudio y el costo ambiental anual de operación. Estos indicadores pueden incorporarse directamente en

matrices comparativas que ayuden a evaluar la sostenibilidad de tecnologías antes de su compra, permitiendo decisiones más informadas y responsables.

Por su parte, Sumner et al., (2023) señalan que la ecologización de la radiología depende tanto del diseño de los equipos como de los procesos institucionales. El uso de protocolos automatizados, la estandarización de parámetros de escaneo y la implementación de software inteligente permiten reducir el número de estudios repetidos, lo que se traduce en un menor consumo de electricidad y menor desgaste del equipo, lo que evidencia que la sostenibilidad depende no solo de la tecnología adquirida, sino también de la forma en que se utiliza.

Finalmente, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2013) recomienda que toda adquisición tecnológica orientada a la adaptación sostenible incluya evaluaciones que integren aspectos técnicos, ambientales y económicos. Este principio es perfectamente aplicable a las tecnologías de imagen médica, donde la compra debe considerar el ciclo de vida del equipo, la facilidad de mantenimiento, el costo energético, el manejo de residuos electrónicos y la posibilidad de actualización tecnológica para prolongar su uso.

Adquisición Tecnológica en Imagenología: Criterios y Procesos

La adquisición de tecnología en imagenología es un proceso crítico para garantizar calidad diagnóstica, continuidad operativa y sostenibilidad institucional. Marín et al., (2022) plantean un enfoque integral en el que la selección de equipos debe fundamentarse en especificaciones técnicas claras, análisis de necesidades reales y criterios de sostenibilidad, especialmente en instituciones públicas donde los recursos son limitados y la eficiencia cobra un papel central. Entre los elementos más relevantes incluyen la evaluación del consumo energético, la vida útil del equipo, la facilidad de mantenimiento y la capacidad de integración con los recursos existentes.

Este enfoque se alinea con lo expuesto por Amado y Puente (2020), quienes proponen metodologías sistemáticas para la adquisición y renovación de equipos biomédicos, enfatizando la importancia de realizar diagnósticos institucionales previos y análisis comparativos entre tecnologías. Según estos autores, la incorporación de indicadores de eficiencia operativa, costos del ciclo de vida (LCC) y análisis de riesgos permite seleccionar tecnologías que respondan a necesidades clínicas con un uso racional de recursos económicos y energéticos.

Durán (2013) señala que todo proceso de transferencia o adquisición tecnológica debe integrar criterios técnico-ambientales que permitan comprender los impactos del ciclo completo del equipo: desde su fabricación, transporte e instalación hasta su operación y disposición final. Esta mirada sistémica resulta particularmente aplicable a la imagenología médica, donde equipos como TC, RM o radiología digital presentan altos consumos de energía, necesidad de infraestructura especializada y una considerable generación de residuos electrónicos al término de su vida útil.

De igual forma, Heye et al., (2020) aportan evidencia concreta sobre la necesidad de considerar el consumo energético como criterio de selección. Su estudio demuestra que los equipos de imagen, especialmente TC y RM, pueden presentar variaciones significativas en su demanda energética dependiendo del modelo, el software operativo y los modos de funcionamiento. Incorporar este tipo de comparaciones dentro de los pliegos de adquisición, evaluando watts por estudio, eficiencia en stand-by y capacidad de optimización energética puede traducirse en ahorros sustanciales tanto económicos como ambientales.

Asimismo, McCarthy et al., (2014) y Roletto et al., (2024) destacan que los servicios de radiología deben transitar hacia la Eco-radiología, la cual implica adoptar tecnologías que reduzcan el desperdicio energético, minimicen emisiones de carbono y faciliten procesos de

modernización en el tiempo. Estos lineamientos sugieren que un proceso de adquisición sostenible debe incluir indicadores como la huella de carbono por equipo, los costos energéticos anuales estimados y el potencial de actualización tecnológica, evitando obsolescencias prematuras.

Garnica et al., (2024), en su análisis comparativo de tecnologías de tomografía computarizada en Bogotá y España, refuerzan la importancia de considerar criterios técnicos, ambientales y operativos simultáneamente. Entre los criterios utilizados destacan la eficiencia energética, el rendimiento técnico, los modos de ahorro energético, el nivel de emisión de calor y la fiabilidad del equipo en entornos con limitaciones técnicas. Su estudio demuestra que la sostenibilidad no es un criterio aislado, sino un componente transversal que influye en la calidad del diagnóstico, los costos del servicio y el impacto ambiental.

Finalmente, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2013) establece que la evaluación y selección tecnológica debe integrar variables técnicas, económicas y ambientales como parte de los lineamientos nacionales para la adaptación al cambio climático. Esto implica que los procesos de adquisición en imagenología deben incorporar análisis multicriterio que permitan ponderar costos iniciales, costos operativos, impactos ambientales, disponibilidad de repuestos, requerimientos energéticos y adaptabilidad institucional.

Control de Calidad y Desempeño Técnico

La Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, s.f.) proporciona directrices fundamentales para garantizar la calidad en los procedimientos diagnósticos de medicina nuclear, haciendo énfasis en el control de calidad de la imagen, el mantenimiento periódico de los equipos y la verificación de protocolos técnicos, estos criterios aseguran que las tecnologías cumplan estándares internacionales en cuanto a precisión diagnóstica, eficiencia en el uso de

radiación y durabilidad de los dispositivos, lineamientos clave para evaluar el desempeño técnico de las tecnologías desde una perspectiva sostenible, donde la calidad de la imagen diagnóstica no se interponga en el uso responsable de recursos.

Sostenibilidad Ambiental en Servicios de Imagenología

Es urgente y necesario incorporar prácticas sostenibles en el manejo de tecnologías de imagen médica. La propuesta de radiología verde expuesta por Lojo et al., (2024) establece estrategias estructuradas para reducir la huella ecológica de estos servicios, abordando el uso eficiente de energía, la gestión de residuos, la optimización del uso del agua y la reducción de emisiones por radiaciones ionizantes.

Complementariamente, LinkedIn Advice (s.f.) sugiere buenas prácticas operativas para lograr procedimientos de imagen más sostenibles, como el uso racional del equipo, la planificación eficiente de estudios y la renovación tecnológica basada en análisis de ciclo de vida. Asimismo, Debnath et al., (2024), resaltan la importancia de aplicar un enfoque multi-actor para evaluar la sostenibilidad en imagenología, considerando no solo el impacto ambiental, sino también la percepción de los profesionales de la salud, los gestores y los fabricantes.

Innovación Tecnológica y Competencias Profesionales

Rodríguez et al., (2023) analizan la evolución tecnológica en radiología durante los últimos 15 años, identificando la creciente integración de innovaciones que exigen nuevas competencias profesionales. Entonces, la sostenibilidad no solo se mide por el desempeño técnico o el impacto ambiental, sino también por la capacidad del personal para operar, mantener y optimizar el uso de las tecnologías de manera ética y responsable.

De igual manera, Torregrosa (2024) refuerza esta idea al señalar que la sostenibilidad tecnológica en imagenología solo es viable cuando se combina con un equipo humano altamente

capacitado, capaz de adaptarse a los avances técnicos sin comprometer la calidad del servicio ni la seguridad del paciente.

Hacia una Evaluación Integral de Sostenibilidad en Imagenología

El enfoque comparativo propuesto por estos estudios revela que una evaluación integral de tecnologías de adquisición de imágenes debe considerar simultáneamente:

Rendimiento técnico y calidad diagnóstica.

Consumo energético y eficiencia operativa.

Generación y gestión de residuos.

Costos de operación y mantenimiento.

Capacitación y competencias del personal.

Adaptabilidad a contextos institucionales.

Estas dimensiones permiten construir modelos de análisis comparativo que reflejen no solo cuál tecnología es mejor desde el punto de vista técnico, sino cuál resulta más sostenible, viable y ética en un contexto determinado (Rodríguez, 2023).

Amado y Puente (2020) proponen una metodología para la adquisición y renovación de equipos basada en la identificación de necesidades clínicas reales, considerando criterios técnicos, funcionales, económicos y de sostenibilidad. Su enfoque destaca la importancia de alinear la gestión tecnológica con los objetivos estratégicos de las instituciones de salud, permitiendo decisiones informadas que prioricen el desempeño y el impacto a largo plazo de los equipos, que valoren la calidad técnica de los dispositivos de imagen, sino también su adaptabilidad, costos de mantenimiento y sostenibilidad operativa.

Anudjo et al., (2023) identifican indicadores de sostenibilidad aplicables a la práctica clínica radiológica y de radioterapia, incluyendo la reducción de emisiones, la gestión adecuada

de residuos, la optimización del consumo energético y la formación de personal en sostenibilidad. De otra parte, Sumner et al., (2023) proponen un enfoque práctico de ecologización de la radiología, mediante acciones como la digitalización de imágenes, la eliminación de productos químicos, el control del consumo energético y la reducción del uso de papel. Estas estrategias mejoran el desempeño ambiental de los servicios radiológicos, además de promover una cultura organizacional más comprometida con la gestión responsable de los recursos.

Eficiencia Energética en Radiología

La eficiencia en el consumo energético constituye uno de los pilares de la sostenibilidad tecnológica. McCarthy et al., (2014) introducen el concepto de EcoRadiología, proponiendo estrategias como el apagado automático de equipos, el uso racional del sistema PACS y la optimización de flujos de trabajo para minimizar el desperdicio energético. Estas prácticas son relevantes en el uso diario de los servicios de imagenología, donde los equipos suelen mantenerse en funcionamiento continuo, una adecuada gestión energética permite reducir significativamente la huella de carbono institucional.

Heye et al., (2020) investigan el consumo energético de tecnologías de TC y RM, proponiendo estrategias operativas para reducir tanto el impacto ambiental como los costos asociados, con medidas como la programación inteligente de estudios, la desactivación automática en periodos inactivos, y el monitoreo constante del desempeño energético. Estas recomendaciones permiten vincular el análisis técnico con la sostenibilidad económica y ambiental, causando una gestión eficiente de los recursos tecnológicos.

Las modalidades de imagen como la RM y la TC son altamente demandantes en consumo energético, Esmaili et al., (2014) en su estudio, identificaron áreas de mejora en la eficiencia

energética de servicios de imagenología, además proponen ajustes operativos y de infraestructura que podrían reducir significativamente el gasto energético sin afectar la calidad diagnóstica.

También, Woolen et al., (2022) ofrecen una revisión del impacto ambiental en radiología, identificando las principales fuentes de residuos y consumo y plantean prácticas para una transición hacia modelos más sostenibles, como la optimización de flujos de trabajo, la correcta disposición de materiales y la incorporación de procesos digitalizados.

Radiología y Cambio Climático: una Responsabilidad Emergente

Diversos estudios reconocen que la radiología debe asumir un rol proactivo frente al cambio climático. Schoen et al., (2021) hacen un llamado a la acción para que el desarrollo tecnológico en imagenología considere el impacto climático como un factor clave en la toma de decisiones. De forma similar, Areaply et al., (2022) plantean que el sector radiológico tiene una oportunidad única para liderar soluciones sostenibles, incorporando criterios ambientales en la adquisición, uso y renovación de equipos. Los dos trabajos coinciden en que la sostenibilidad no debe ser una preocupación secundaria, sino un eje transversal en el diseño de políticas institucionales de tecnología médica.

Sostenibilidad en Entornos de Bajos Recursos

Bwanga et al., (2024) abordan la sostenibilidad ambiental en servicios de radiografía en contextos con limitaciones económicas, específicamente en Zambia y Zimbabwe, explorando las prácticas, conocimientos y desafíos que enfrentan los radiógrafos, evidenciando la necesidad de adaptar las estrategias de sostenibilidad a las condiciones locales, es decir, que aunque los recursos sean limitados, existen oportunidades para implementar medidas sostenibles mediante la capacitación, el mantenimiento básico de equipos y el uso racional de los insumos, reforzando la idea de que la sostenibilidad también es viable en contextos de alta vulnerabilidad.

Procesos Tecnológicos Hospitalarios con Enfoque Ambiental

Loayza y Silva (2015) abordan los fundamentos técnicos de los procesos industriales sostenibles y su adaptación al entorno hospitalario, incluyendo la gestión de equipos médicos, donde resaltan que la sostenibilidad no solo depende del equipo en sí, sino de cómo se gestiona su adquisición, uso y disposición final, proponiendo integrar evaluaciones ambientales desde el diseño y planificación de servicios tecnológicos, promoviendo una reducción sistémica del impacto ambiental.

De forma complementaria, Durán (2013) desarrolla un enfoque sistémico para la incorporación de tecnologías, el cual incluye la evaluación simultánea de aspectos técnicos, funcionales y ambientales, para guiar decisiones en la adquisición de tecnologías médicas, especialmente en entornos donde la transferencia tecnológica debe considerar tanto la viabilidad operativa como el respeto al entorno.

Inteligencia Artificial como Herramienta de Sostenibilidad Diagnóstica

La incorporación de IA emerge como una estrategia clave para mejorar la calidad diagnóstica y la eficiencia operativa en imagenología médica, Tamayo et al., (2023) destacan cómo en Colombia se han comenzado a utilizar soluciones de IA para acelerar el procesamiento de imágenes y reducir la carga de trabajo, lo que también tiene beneficios en términos de ahorro energético y optimización de recursos.

Desde la perspectiva empresarial, GE Healthcare (2023) destaca que la IA ha permitido maximizar el rendimiento de los equipos diagnósticos, mejorar la accesibilidad al servicio radiológico y reducir los tiempos de espera. Este aumento de la eficiencia operacional contribuye directamente a la sostenibilidad del sistema, dado que los equipos funcionan durante períodos

más cortos y con mayor precisión, lo que disminuye su desgaste, el uso de energía y los costos de mantenimiento asociados.

Así mismo, David et al., (2025) profundizan en este impacto sostenible al demostrar que los nuevos algoritmos de reconstrucción inteligente pueden reducir significativamente las dosis de radiación utilizadas en estudios como la tomografía computarizada, sin comprometer la calidad diagnóstica. Esta reducción de la dosis implica no solo un menor riesgo biológico para los pacientes, sino también un menor consumo energético y una disminución de la huella ambiental asociada al funcionamiento de los equipos de alta potencia.

La literatura reciente también señala que la IA contribuye a la sostenibilidad diagnóstica mediante la mejora de la eficiencia operativa. Chaban et al., (2023), al analizar el funcionamiento de la resonancia magnética, destacan que los algoritmos de IA permiten optimizar los parámetros de adquisición, reducir el tiempo de exploración y minimizar el consumo energético de equipos que tradicionalmente requieren altos niveles de potencia para operar. De manera similar, Heye et al., (2020) identifican que la reducción del tiempo activo de equipos como el CT y la RM representa una de las estrategias más efectivas para disminuir tanto el gasto energético como los costos operativos del departamento de radiología.

Desde un enfoque ambiental, autores como Anudjo et al., (2023) y Woolen et al., (2022) subrayan que la IA puede desempeñar un papel clave en la transición hacia una radiología más sostenible al reducir la repetición de estudios, mejorar la precisión diagnóstica inicial y permitir la gestión predictiva del mantenimiento, lo que evita fallas prolongadas, optimiza el ciclo de uso de los equipos y disminuye las emisiones asociadas a la manufactura y reemplazo prematuro de tecnología.

Por otro lado, Sumner et al., (2023) plantean que la automatización inteligente disminuye los tiempos improductivos entre estudios e incrementa la eficiencia del flujo de trabajo radiológico, lo cual se traduce en un menor consumo energético asociado a la operación continua de los equipos. Asimismo, Schoen et al., (2021) explican que, frente a los desafíos del cambio climático, la IA tiene el potencial de contribuir a estrategias de mitigación mediante la reducción del uso de recursos y la implementación de análisis predictivos para la gestión sostenible del departamento radiológico.

La integración de la IA también tiene efectos significativos en contextos de recursos limitados. Bwanga et al., (2024) señalan que en países de bajos recursos, donde existe una escasez de equipos y personal especializado, la IA facilita la optimización de los dispositivos disponibles y mejora la calidad de los estudios sin necesidad de inversiones altas en infraestructura, lo que promueve un uso más eficiente y sostenible de la tecnología existente.

A nivel institucional, Garnica et al., (2024) demuestran que la implementación de sistemas que integran IA puede contribuir a equilibrar las disparidades de eficiencia entre instituciones, al permitir una gestión más estratégica de los tiempos de operación y del consumo energético, esto es relevante cuando se busca adoptar tecnologías de imagen médica que respondan no solo a criterios técnicos, sino también a exigencias ambientales y económicas.

Finalmente, las orientaciones ambientales globales también respaldan la incorporación de IA como herramienta para una gestión más sostenible. El PNUMA (2021) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2013) sostienen que la adopción de tecnologías innovadoras debe alinearse con modelos de consumo responsable y eficiencia energética, lo cual convierte a la IA en una aliada estratégica para garantizar prácticas diagnósticas más limpias, eficientes y coherentes con los objetivos de sostenibilidad.

En conjunto, la evidencia revisada demuestra que la IA no solo transforma la calidad y la velocidad del diagnóstico, sino que además constituye un elemento clave para la sostenibilidad en imagenología médica, al reducir consumos energéticos, optimizar recursos, minimizar residuos tecnológicos y mejorar la vida útil de los equipos. Su integración en los servicios de salud representa un avance tecnológico alineado con la responsabilidad ambiental, la eficiencia operativa y los principios contemporáneos de sostenibilidad diagnóstica.

Procesos Sostenibles desde una Perspectiva Institucional

Desde una perspectiva institucional, la sostenibilidad en los servicios de imagenología no puede limitarse únicamente a reducir consumos o mejorar la eficiencia operativa. Arias et al., (2024) proponen una reflexión integral sobre la necesidad de repensar los procesos radiológicos bajo una lógica de sostenibilidad, combinando la responsabilidad clínica, la eficiencia técnica y la conciencia ambiental con lineamientos aplicables también en entornos latinoamericanos donde los recursos son más limitados, con la idea de que la sostenibilidad debe ser un principio transversal en todas las etapas del servicio radiológico: desde la adquisición de tecnología, pasando por su uso diario, hasta su eventual renovación o disposición final.

En el ámbito institucional, esto implica reconocer que la gestión de tecnologías de imagen, no solo involucra la capacidad diagnóstica, sino también el impacto ambiental derivado de su operación continua, sus necesidades de enfriamiento, la producción de residuos electrónicos y los costos energéticos asociados. Arias et al., (2024) sugieren que integrar la sostenibilidad en estos procesos exige una revisión profunda de los flujos de trabajo, protocolos clínicos, sistemas de mantenimiento y políticas de renovación tecnológica.

Esta perspectiva es especialmente relevante en contextos latinoamericanos, donde los recursos financieros, energéticos y tecnológicos suelen ser más escasos, y donde los equipos

médicos frecuentemente deben operar por encima de su vida útil debido a limitaciones presupuestales. En estos escenarios, adoptar criterios de sostenibilidad no es únicamente una opción ética o ambiental, sino una estrategia de optimización institucional, que permite extender la vida útil de los equipos, reducir costos operativos, evitar interrupciones del servicio y mejorar la calidad de la atención sanitaria.

Arias et al., (2024) subrayan que para lograr este enfoque integral es necesario fortalecer la cultura organizacional, capacitar al personal y articular decisiones clínicas con políticas de sostenibilidad institucional. Esto implica que los servicios radiológicos deben dejar de concebirse únicamente como centros de producción diagnóstica y transformarse en unidades responsables del uso racional de recursos, alineadas con los objetivos globales de sostenibilidad y la responsabilidad social del sector salud.

En suma, los procesos sostenibles desde una perspectiva institucional requieren una integración real entre tecnología, gestión ambiental y responsabilidad clínica, especialmente en regiones donde las limitaciones de recursos hacen imprescindible optimizar cada dimensión del sistema radiológico. La propuesta de Arias et al. constituye un marco innovador y necesario para avanzar hacia servicios de imagenología más eficientes, conscientes y resilientes.

Prácticas Sostenibles y Recomendaciones Clínicas

Anudjo et al., (2023) señalan recomendaciones para incorporar la sostenibilidad ambiental en la radiología clínica y la radioterapia, donde se encuentran la reducción de residuos, la formación del personal en buenas prácticas sostenibles, y la adopción de políticas institucionales orientadas a la ecoeficiencia. Además, Brown y Forster (2022) abordan el rol ético del personal clínico, destacando cómo los radiólogos pueden contribuir a mitigar los efectos del cambio climático con decisiones cotidianas sostenibles, como la optimización del uso de

equipos, la prescripción racional de estudios y la participación en procesos institucionales de mejora ambiental.

El enfoque integral de sostenibilidad en imagenología implica entender la tecnología como una herramienta que debe estar alineada con principios ambientales, sociales y económicos, y que no debe limitarse al diseño o fabricación de equipos, sino extenderse a su ciclo de vida completo: adquisición, operación, mantenimiento y disposición. Esto permite a las instituciones de salud adoptar decisiones informadas, contextualizadas y éticas, contribuyendo a un modelo de atención médica más sostenible, eficiente y comprometido con la mitigación del impacto ambiental (Durán, 2013).

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (2010) proponen una metodología para identificar y priorizar tecnologías sostenibles en sectores clave, incluyendo la salud, que enfatiza la necesidad de alinear las decisiones tecnológicas con políticas de mitigación climática, promoviendo una planificación basada en indicadores ambientales, sociales y económicos, donde la adquisición de equipos de imagenología debe considerar solo criterios técnicos, financieros, viabilidad ambiental, eficiencia operativa y adaptabilidad a las necesidades locales.

Marco Metodológico

Esta investigación es de carácter documental y se basa en una revisión bibliográfica, orientada a analizar la incorporación de criterios de sostenibilidad en la evaluación de tecnologías de imagen médica. Se enmarca dentro de un diseño no experimental y de corte transversal, ya que no implica la manipulación de variables ni la intervención directa en entornos hospitalarios, sino el análisis de tecnologías existentes y de documentación técnica disponible en un momento determinado.

Se adopta un enfoque mixto, con predominancia cualitativa. El componente cualitativo permite explorar en profundidad aspectos complejos como el impacto ambiental, la sostenibilidad institucional y las dimensiones éticas asociadas al uso de estas tecnologías. El componente cuantitativo se incorpora a través de la construcción de una matriz de evaluación multicriterio, que integra indicadores medibles como el consumo energético, costos operativos y vida útil de los equipos, facilitando una comparación estructurada entre distintas modalidades tecnológicas.

Diseño Metodológico

El estudio tiene un carácter documental y comparativo, basado en la revisión sistemática de fuentes secundarias relevantes, como literatura científica especializada (2010–2025), normativas internacionales (OMS, IAEA, PNUD), guías técnicas, fichas de fabricantes y reportes institucionales sobre gestión sostenible en imagenología médica. El análisis de contenido se aplicará como técnica principal para categorizar e interpretar la información disponible, identificando patrones, dimensiones y buenas prácticas en sostenibilidad tecnológica.

Fases de la Investigación

Fase 1. Revisión Documental Sistemática

Se seleccionan, clasifican y analizan fuentes secundarias pertinentes a tecnologías de adquisición de imágenes médicas (RM, TC, RX, ecografía) y su evaluación desde criterios sostenibles. Se emplearán descriptores como: imagenología médica, consumo energético, sostenibilidad tecnológica, huella de carbono, evaluación comparativa.

Fase 2. Identificación y Categorización de Variables Clave

A partir de la literatura revisada, se definen los ejes de análisis:

Técnico: desempeño diagnóstico, vida útil, requerimientos de mantenimiento.

Ambiental: huella de carbono, generación de residuos, impacto ambiental.

Energético: consumo energético por estudio, eficiencia operativa.

Económico: costos operativos, costo por estudio, inversión inicial.

Fase 3. Diseño de la Matriz Comparativa Multicriterio

Se estructura una matriz con base en los indicadores identificados, integrando tanto variables cualitativas como cuantitativas. Esta herramienta permite comparar tecnologías desde una perspectiva integral y sostenible, considerando su aplicabilidad a contextos clínicos reales y diversos.

Fase 4. Análisis e Interpretación de Resultados

Se realiza una evaluación comparativa de las tecnologías analizadas, identificando fortalezas, debilidades, oportunidades de mejora y nivel de alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Se incluyen aportes recientes sobre el uso de inteligencia artificial como facilitadora de sostenibilidad operativa en imagenología médica.

Fase 5. Formulación de Recomendaciones

Se proponen orientaciones para la toma de decisiones responsables en la adquisición y gestión de tecnologías médicas, con énfasis en contextos de recursos limitados y criterios ético-ambientales.

Análisis de Resultados

Los resultados del análisis comparativo se estructuran según los cuatro ejes definidos en la metodología del estudio: técnico, ambiental, energético y económico. A partir de la matriz multicriterio diseñada en la investigación, se identificaron patrones, ventajas relativas y brechas de sostenibilidad entre las distintas tecnologías de imagen revisadas (TC, RM, RX digital y ecografía), integrando hallazgos señalados por autores como Garnica et al. (2024), Sumner et al. (2023) y Roletto et al. (2024), quienes destacan la necesidad de evaluaciones integrales en radiología.

Dimensión Técnica

Los análisis mostraron que las tecnologías con mayor grado de digitalización y automatización presentan ventajas significativas en estabilidad operativa, menor tasa de fallas y mayor eficiencia del flujo de trabajo. La literatura revisada indica que la capacidad de integración con sistemas digitales y la estandarización de protocolos reduce los tiempos de inactividad y la necesidad de repeticiones de estudios, lo cual se traduce en mejores prácticas institucionales y mayor continuidad del servicio.

Dimensión Ambiental

Los resultados coinciden con lo reportado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2021), evidenciando que los equipos con mayor eficiencia energética generan menor huella de carbono y menos residuos derivados del mantenimiento y del uso de insumos como placas o químicos. Se identificó que tecnologías basadas en procesos digitales minimizan residuos, mientras que los sistemas que requieren pasos intermedios (como CR o equipos antiguos de TC/RM) aumentan el impacto ambiental debido a su ciclo de vida más demandante.

Dimensión Energética

El análisis energético mostró que las tecnologías con menor consumo por estudio corresponden a ecografía y RX digital, mientras que la tomografía computarizada y la resonancia magnética presentan consumos significativamente más altos, tal como describen Roletto et al. (2024) en su evaluación del gasto eléctrico en radiología. La matriz comparativa permitió identificar que la eficiencia energética depende no solo del equipo sino también de prácticas institucionales de gestión energética y mantenimiento preventivo.

Dimensión Económica

Los resultados evidenciaron que los equipos con mayor eficiencia operativa tienden a generar menores costos a largo plazo, pese a requerir una inversión inicial más elevada. Este comportamiento es consistente con las recomendaciones del Ministerio de Ambiente (2013), que resalta la importancia de evaluar costos del ciclo de vida (LCC) y no solo el costo de adquisición. Tecnologías con vida útil prolongada, bajos requerimientos de mantenimiento y menores consumos eléctricos se proyectan como más rentables en el tiempo.

En conjunto, la comparación multicriterio reveló que las tecnologías digitales y energéticamente eficientes favorecen la sostenibilidad institucional, reducen el impacto ambiental y optimizan el consumo de recursos. La integración de criterios técnicos, ambientales, energéticos y económicos permitió obtener una visión integral del desempeño sostenible de cada tecnología, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente los relacionados con salud, energía limpia y acción climática.

Tabla 1*Evaluación de tecnologías de imagenología médica según eficiencia técnica*

Criterio	RM	TC	RXD	ECO	Autores
Precisión diagnóstica	10	8	6	5	Garnica et al., (2024); David et al., (2025)
Costo operativo	2	4	7	8	Heye et al., (2020); Amado y Puente (2020)
Consumo energético	3	5	8	9	Roletto et al., (2024); McCarthy et al., (2014)
Impacto ambiental	3	5	8	9	Sustainability Directory (s.f.)
Accesibilidad clínica	4	5	9	10	Bwanga et al., (2024); Tamayo et al., (2023)
Puntaje total	22	27	38	41	

Nota. Autoría propia

La tabla muestra que la RM lidera como la más eficiente por su alta resolución y capacidad de diagnóstico, seguida de la TC por su alta precisión diagnóstica y capacidad para detectar patologías complejas. RX y ECO tienen menor eficiencia técnica, lo que indica que, aunque útiles, no alcanzan la resolución de RM o TC para diagnósticos complejos. La RM tiene un consumo energético bajo, indicando un alto gasto relativo, la TC consume moderadamente, mientras que RX y ECO son mucho más eficientes energéticamente, lo que significa menor impacto en la factura eléctrica del hospital y menor huella de carbono.

Los puntajes asignados a cada criterio fueron obtenidos mediante revisión bibliográfica y análisis comparativo de estudios previos (Garnica et al., 2024; Heye et al., 2020). Cada criterio se valoró en una escala de 1 a 10, donde los valores más altos representan mejor desempeño o ventaja relativa. La suma de los puntajes por modalidad permite una evaluación comparativa integral de las tecnologías de imagenología según la eficiencia técnica.

La RM y TC son las más costosas de operar, debido a gastos de mantenimiento, refrigeración y personal especializado y la RX y ECO muestran menor costo operativo, siendo

más accesibles para hospitales con presupuesto limitado. Por último, la RM, a pesar de su excelencia técnica, obtiene un puntaje total más bajo porque su consumo energético, impacto ambiental y costo operativo son desfavorables y la ECO y RX muestran que, desde el punto de vista de sostenibilidad y balance general, son las mejores opciones en un hospital que busca eficiencia ambiental y económica sin renunciar completamente a la capacidad diagnóstica.

La Tomografía Computarizada (TC) y su aplicación en hospitales de mediano tamaño. La TC ofrece alta precisión diagnóstica y rapidez en la adquisición de imágenes, según Garnica et al., (2024) y David et al., (2025).

Tabla 2

Comparativa de tecnologías de imagenología médica desde el impacto ambiental y consumo energético

Criterio	RM	TC	RXD	ECO	Autores
Precisión diagnóstica	9	8	6	5	Garnica et al. (2024); David et al. (2025)
Costo operativo	2	3	8	9	Heye et al. (2020); Amado & Puente (2020)
Consumo energético	3	5	9	10	Roletto et al. (2024); McCarthy et al. (2014)
Impacto ambiental	3	5	9	9	Lojo et al. (2024); Sustainability Directory (s.f.)
Accesibilidad clínica	4	5	8	10	Bwanga et al. (2024); Tamayo et al. (2023)
Puntaje total	21	26	40	43	

Nota. Autoría propia

La tabla muestra que la RM es líder por su alta precisión diagnóstica, la TC se acerca, con buena resolución y aplicaciones clínicas y la RX Y ECO son adecuadas para diagnósticos básicos, pero menos precisas. En cuanto al consumo energético la RM consume más energía, con requerimientos de refrigeración y mantenimiento, la TC es moderada y la RX y ECO son más eficientes. En impacto ambiental la RM y TC generan más residuos y emisiones de carbono, la RX y ECO son más sostenibles, incluyendo reciclaje y bajo impacto ecológico.

Los valores asignados a cada criterio corresponden a una escala ordinal comparativa de 1 a 10, en la cual los puntajes más altos representan un mejor desempeño relativo de la tecnología de imagen médica evaluada. La puntuación se estableció a partir del análisis crítico de la literatura científica revisada, considerando la evidencia reportada sobre precisión diagnóstica, costos operativos, consumo energético, impacto ambiental y accesibilidad clínica de cada modalidad (RM, TC, RXD y ECO). Los puntajes reflejan tendencias generales identificadas en los estudios citados y no resultados de mediciones experimentales propias. El puntaje total corresponde a la suma simple de los valores obtenidos en cada criterio.

Asimismo, el enfoque ambiental resalta el bajo impacto y alta eficiencia energética de ECO y RXD. Estas tecnologías son coherentes con el concepto de radiología verde, al minimizar la huella ecológica sin comprometer la funcionalidad. RM, aunque técnicamente superior, presenta el menor rendimiento ambiental, confirmando la importancia de considerar el consumo energético en las decisiones de adquisición (McCarthy et al., 2014).

Los Rayos X Digitales (RXD), que presentan menor consumo energético y menor impacto ambiental, según McCarthy et al., (2014) y Woolen et al., (2022). Si bien su resolución diagnóstica es menor que RM o TC, su accesibilidad, bajo costo operativo y sostenibilidad la convierten en una opción estratégica para hospitales con recursos limitados. RXD permite un balance eficiente entre desempeño técnico y sostenibilidad, siendo ideal para exámenes de rutina y vigilancia médica general.

Tabla 3

Comparativa de tecnologías de imagenología médica basada en accesibilidad y costo operativo

Criterio	RM	TC	RXD	ECO	Autores
Precisión diagnóstica	9	8	6	5	Garnica et al., (2024); David et al., (2025)
Costo operativo	2	3	9	10	Heye et al., (2020); Amado y Puente (2020)
Consumo energético	3	4	8	9	Roletto et al., (2024); McCarthy et al., (2014)
Impacto ambiental	3	4	8	9	Lojo et al., (2024); Sustainability Directory (s.f.)
Accesibilidad clínica	4	6	9	10	Bwanga et al., (2024); Tamayo et al., (2023)
Puntaje total	21	25	40	43	

Nota. Autoría propia

Según la tabla la ECO obtiene el puntaje más alto por combinar bajo costo, eficiencia energética y accesibilidad. RM, aunque técnicamente superior, representa una opción menos sostenible. TC es intermedia, equilibrando desempeño y costos, entonces la tabla refuerza la necesidad de un enfoque multicriterio.

La comparación se realizó mediante una escala ordinal de 1 a 10, en la cual los valores más altos indican un mejor desempeño relativo de cada tecnología de imagenología médica en términos de accesibilidad y costo operativo, así como en los criterios técnicos y ambientales asociados. Los puntajes asignados se fundamentan en el análisis crítico de la literatura científica revisada, considerando información reportada sobre precisión diagnóstica, costos de operación, consumo energético, impacto ambiental y nivel de accesibilidad clínica de la resonancia magnética (RM), tomografía computarizada (TC), rayos X digitales (RXD) y ecografía (ECO). Los valores reflejan tendencias generales identificadas en los estudios citados y no corresponden a mediciones empíricas directas. El puntaje total resulta de la suma simple de los valores obtenidos en cada criterio.

En cuanto a la eficiencia económica y accesibilidad clínica, la ECO se posiciona como la tecnología más rentable, accesible y sostenible, mientras RXD conserva un buen equilibrio entre costo y cobertura. RM y TC, aunque indispensables en diagnóstico avanzado, son menos viables en entornos de bajos recursos debido a sus altos costos de operación y mantenimiento (Amado y Puente, 2020).

La ECO es la tecnología más eficiente en términos energéticos, de costos y generación de residuos (Sustainability Directory, s.f.). Aunque la resolución diagnóstica es limitada frente a RM o TC, su bajo impacto ambiental y facilidad de operación la convierten en una opción estratégica para atención primaria, servicios móviles y hospitales en contextos de recursos limitados.

Tabla 4

Comparación de tecnologías de imagenología desde criterios técnicos, económicos y ambientales

Criterio	RM	TC	RXD	ECO	Autores
Precisión diagnóstica	10	8	6	5	Garnica et al., (2024); David et al., (2025)
Costo operativo	2	4	8	9	Heye et al., (2020); Amado y Puente (2020)
Consumo energético	3	5	8	9	Roletto et al., (2024); McCarthy et al., (2014)
Impacto ambiental	3	5	8	9	Sustainability Directory (s.f.)
Accesibilidad clínica	5	6	9	10	Bwanga et al., (2024); Tamayo et al., (2023)
Puntaje total	23	28	39	42	

Nota. Autoría propia

La resonancia magnética (RM) continúa destacándose como la tecnología con mayor precisión diagnóstica, lo que la convierte en la opción preferida para exámenes complejos donde la exactitud es crítica. Sin embargo, esta ventaja técnica viene acompañada de desventajas significativas en sostenibilidad: su alto consumo energético y costos operativos elevados la hacen

menos viable para hospitales con presupuesto limitado o en contextos donde la eficiencia energética es prioritaria (Heye et al., 2020). Esto evidencia que, si bien RM es ideal para casos clínicos específicos, no siempre representa la mejor decisión desde un enfoque de sostenibilidad integral.

La comparación de las tecnologías de imagenología médica se realizó mediante una escala ordinal de 1 a 10, en la cual los valores más altos representan un mejor desempeño relativo según los criterios técnicos, económicos y ambientales evaluados. Los puntajes asignados se fundamentan en el análisis crítico de la literatura científica revisada, considerando evidencia reportada sobre precisión diagnóstica, costos operativos, consumo energético, impacto ambiental y accesibilidad clínica de la resonancia magnética (RM), tomografía computarizada (TC), rayos X digitales (RXD) y ecografía (ECO). Los valores reflejan tendencias generales identificadas en los estudios citados y no corresponden a mediciones empíricas directas. El puntaje total corresponde a la suma simple de los valores obtenidos en cada criterio.

Por otro lado, la tecnología ECO muestra un equilibrio notable entre desempeño y sostenibilidad. A pesar de que su precisión diagnóstica es menor que la de RM, ofrece bajo impacto ambiental, menor consumo de energía, y costos operativos reducidos, lo que la convierte en una opción altamente rentable y responsable desde el punto de vista ambiental (McCarthy et al., 2014). Además, su alta accesibilidad clínica asegura que un mayor número de pacientes pueda beneficiarse de servicios de diagnóstico confiables, siendo especialmente útil en hospitales con recursos limitados o infraestructura eléctrica restringida.

Este análisis resalta la importancia de adoptar un enfoque multicriterio en la selección tecnológica, donde no solo se considere la eficiencia técnica sino también la sostenibilidad económica, ambiental y operativa. La integración de estas dimensiones permite que las

decisiones hospitalarias sean más responsables, sostenibles y adaptables a distintos contextos, alineándose con políticas de radiología verde y reducción de la huella de carbono en el sector salud (Roletto et al., 2024).

Considerando un análisis integral de todos los equipos de imagenología y el enfoque de ciclo de vida tecnológico, como sugieren Amado y Puente (2020) en su estudio, si bien RM y TC son indispensables para diagnósticos complejos, las tecnologías RXD y ECO permiten equilibrar la eficiencia clínica con sostenibilidad ambiental y económica. La planificación de adquisición de equipos debe priorizar decisiones basadas en criterios de largo plazo y no solo en desempeño técnico inmediato.

El análisis integral demuestra que la planificación y adquisición de tecnologías médicas no debe basarse únicamente en el desempeño técnico inmediato, sino en criterios de sostenibilidad a largo plazo, que contemplen el costo del ciclo de vida, la eficiencia energética y el impacto ambiental total (Roletto et al., 2024). Esta visión prospectiva impulsa la transición hacia una radiología verde, donde la eficiencia clínica coexista con la responsabilidad ambiental y la optimización de los recursos institucionales.

Por tanto, se recomienda que las instituciones de salud adopten modelos de evaluación multicriterio sostenibles, capaces de ponderar los beneficios clínicos frente a los costos y externalidades ambientales. Esto permitirá tomar decisiones tecnológicas más responsables, fortalecer la resiliencia hospitalaria y contribuir a la meta global de reducir la huella ecológica del sector salud, en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por el PNUMA (2021).

Tabla 5

Evaluación multicriterio de tecnologías de adquisición de imágenes con enfoque de ciclo de vida tecnológico

Criterio	RM	TC	RXD	ECO	Autores
Precisión diagnóstica	9	8	6	5	Garnica et al., (2024); David et al., (2025)
Costo operativo	2	4	8	9	Heye et al., (2020); Amado y Puente (2020)
Consumo energético	3	5	8	9	Roletto et al., (2024); McCarthy et al., (2014)
Impacto ambiental	3	5	8	9	Sustainability Directory (s.f.)
Accesibilidad clínica	4	5	9	10	Bwanga et al., (2024); Tamayo et al., (2023)
Puntaje total	21	27	39	42	

Nota. Autoría propia

En la tabla se refleja que, desde la perspectiva del ciclo de vida tecnológico, el análisis de las tecnologías de adquisición de imágenes revela profundas diferencias entre los equipos de alta complejidad (RM y TC) y los de bajo impacto ambiental (RXD y ECO).

La evaluación multicriterio de tecnologías de adquisición de imágenes se realizó mediante una escala ordinal de 1 a 10, en la que los valores más altos representan un mejor desempeño relativo de cada tecnología en términos de precisión diagnóstica, costos operativos, consumo energético, impacto ambiental y accesibilidad clínica. Los puntajes se asignaron a partir del análisis crítico de la literatura científica revisada y reflejan tendencias generales identificadas en los estudios citados, considerando además el enfoque de ciclo de vida tecnológico, que incluye fabricación, uso y disposición final de los equipos. El puntaje total corresponde a la suma simple de los valores obtenidos en cada criterio.

En la etapa de fabricación, los equipos de resonancia magnética (RM) y tomografía computarizada (TC) requieren materiales de alta densidad y componentes electrónicos complejos

que involucran procesos industriales con alta huella de carbono (Amado y Puente, 2020).

Además, la producción de imanes superconductores y tubos de rayos X implica el uso de metales pesados y gases refrigerantes con alto potencial de calentamiento global (Chaban et al., 2023).

Durante la fase de uso, RM y TC siguen siendo las tecnologías con mayor consumo energético, alcanzando hasta 30–50 kWh por estudio (Heye et al., 2020), mientras que RXD y ECO utilizan entre 0.5–2 kWh, lo que representa una reducción superior al 90% en consumo de energía hospitalaria. Este dato coincide con los hallazgos de Roletto et al., (2024), quienes destacan que la optimización energética de equipos radiológicos puede reducir las emisiones de carbono de un hospital en más de un 25%.

Así, al evaluar todo el ciclo de vida, ECO obtiene el puntaje más alto (43), seguida de RXD (40), refleja su sostenibilidad integral. Estas tecnologías se alinean con los principios de la radiología verde, promovidos por Sustainability Directory (s.f.), donde se prioriza el uso eficiente de recursos, el diseño ecológico de equipos y la minimización de residuos hospitalarios.

Entonces, este enfoque integral permite comprender que la sostenibilidad tecnológica no se limita al uso del equipo, sino que abarca todas las fases de su existencia, desde la fabricación hasta la disposición, promoviendo decisiones de adquisición más responsables y orientadas al desarrollo sostenible hospitalario.

Conclusiones

Del análisis realizado se concluye que, aunque tecnologías como la resonancia magnética (RM) ofrecen la mayor eficiencia técnica y precisión diagnóstica, su elevado consumo energético y costos operativos muestran que la eficiencia no siempre coincide con la sostenibilidad. Esto evidencia la necesidad de considerar criterios ambientales y económicos antes de seleccionar tecnología médica, especialmente en contextos hospitalarios con presupuestos limitados. Priorizar únicamente la eficiencia técnica puede generar gastos innecesarios y aumentar la huella ecológica.

El equipo logró comprender que la sostenibilidad en radiología no depende únicamente de los equipos, sino de un enfoque integral que articula desempeño técnico, impacto ambiental, eficiencia energética y costos institucionales. Este proceso permitió fortalecer competencias analíticas y una visión más amplia sobre la importancia del uso responsable de la tecnología en salud.

El aprendizaje principal del grupo durante esta investigación es que la toma de decisiones sobre tecnología médica debe ser integral y ética, considerando no solo eficiencia y precisión, sino también sostenibilidad económica, ambiental y social. Además, se evidenció la importancia de evaluar cómo las políticas institucionales, la formación del personal y la implementación de estándares de ecoeficiencia influyen en la adopción de tecnologías sostenibles.

El estudio permitió al grupo identificar que las instituciones deben adoptar metodologías comparativas que integren criterios multidimensionales para garantizar decisiones de compra más responsables, tal como recomiendan Garnica et al., (2024). La matriz comparativa demostró su utilidad como herramienta de evaluación objetiva y flexible.

Los hallazgos reafirman que promover tecnologías energéticamente eficientes, minimizar residuos y optimizar procesos de mantenimiento son pasos fundamentales para avanzar hacia una radiología verde. Esto aporta a la mitigación del impacto ambiental y al cumplimiento de políticas de desarrollo sostenible en el sector salud.

El análisis evidenció que la literatura reciente coincide en la urgencia de incorporar criterios de sostenibilidad en la gestión tecnológica. Los resultados permitieron al grupo integrar de manera crítica las posturas de diversos autores y comprender cómo estos enfoques pueden aplicarse en entornos hospitalarios reales.

Como producto del estudio, el grupo concluye que la sostenibilidad tecnológica en radiología representa una oportunidad para mejorar la eficiencia operativa, reducir costos, disminuir la huella ambiental y promover decisiones institucionales informadas. Este proceso de investigación fortalece la capacidad de análisis y la comprensión del rol transformador que tiene la tecnología en el sistema de salud actual.

Finalmente, se reconoce que es posible alcanzar un equilibrio entre eficiencia diagnóstica y sostenibilidad mediante la selección cuidadosa de tecnologías como TC y RX, priorizando equipos adaptables, eficientes y de bajo impacto ambiental. Este enfoque permite a los hospitales optimizar costos, reducir huella de carbono y ofrecer atención médica de calidad, fomentando una visión integral y responsable que será fundamental para futuras investigaciones y la implementación de prácticas de eco-radiología.

Recomendaciones

Se recomienda adoptar herramientas comparativas similares a la matriz desarrollada en esta investigación, que consideren simultáneamente desempeño técnico, huella ambiental, costos del ciclo de vida y eficiencia energética. Estas matrices facilitan decisiones objetivas y transparentes en contextos clínicos y administrativos.

A su vez, realizar evaluaciones del ciclo de vida (LCA) antes de la compra o renovación de equipos, las tecnologías de imagen (TC, RM, RX y ecografía) deben evaluarse considerando su impacto desde la fabricación hasta la disposición final. Esto incluye transporte, consumo energético, mantenimiento, actualizaciones y generación de residuos. La inclusión del enfoque LCA contribuirá a reducir impactos acumulativos y promover la ecoeficiencia.

Asimismo, fomentar programas de gestión y reducción de la huella de carbono, las instituciones deben medir e informar emisiones derivadas de las tecnologías de imagen, siguiendo guías de organismos internacionales como PNUMA y PNUD. Esto permite identificar puntos críticos y planear estrategias de mitigación, incluyendo sustitución tecnológica y mejoras de infraestructura.

De igual forma, fortalecer la capacitación del personal en sostenibilidad tecnológica, radiólogos, tecnólogos, ingenieros biomédicos y gestores deben recibir formación continua sobre eficiencia energética, gestión de residuos, uso óptimo de equipos y buenas prácticas ambientales. La sostenibilidad debe convertirse en un componente transversal de la formación profesional.

También, es necesario ampliar el análisis a diferentes instituciones, regiones y niveles de complejidad para generar datos sólidos que permitan comparar tecnologías bajo criterios unificados. Esto mejoraría la precisión de la evaluación y la pertinencia de las decisiones de compra.

Además, actualizar normativas nacionales sobre evaluación tecnológica sostenible, que los entes reguladores incorporen criterios obligatorios de sostenibilidad en los procesos de habilitación, compra pública y certificación de equipos médicos, atendiendo a las recomendaciones del Ministerio de Ambiente (2013) y de organismos internacionales. Esto garantizará decisiones más coherentes con las metas del país en materia de cambio climático.

Referencias Bibliográficas

- ACTEDI. (2025). *ECR 2025: Planet Radiology*. <https://actedi.cat/es/actualidad/profesion-y-tecnologia>
- Amado, J., & Puente, M. (2020). *Metodología para la adquisición y renovación de equipos biomédicos en la Clínica Nuestra Señora de los Remedios* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Occidente]. Repositorio UAO. <https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/37560d93-e677-4dff-bd7f-2a34a70dff68/content>
- Anudjo, M., Vitale, C., Elshami, W., Hancock, A., Adeleke, S., Franklin, J., & Akudjedu, T. (2023). Consideraciones para la sostenibilidad ambiental en la práctica de radiología clínica y radioterapia: revisión sistemática y recomendaciones. *Radiography*, 29(6), 1440–1449. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2023.09.006>
- Arias, M., Iglesias, A., Iglesias, Á., Machado, D., Escobar, A., Nieto, B., Mañas, J., Herreros, M., & Nieto, Á. (2024). *Repensar procesos radiológicos en aras de la sostenibilidad. De qué hablamos y cómo lo hacemos*. Sociedad Española de Radiología Médica (SERAM). <https://piper.espacio-seram.com/index.php/seram/article/view/9948>
- Areaply, A., Omary, R., & Vandenberg, J. (2022). Scanning the planet: Radiology's grand opportunity to address climate change. *Journal of the American College of Radiology*, 19(4), 528–532. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2021.08.031>
- Bwanga, O., Chinene, B., Mudadi, L., Kafwimbi, S., Nyawani, P., Matika, W., Mushosho, E., Mutandiro, L., & Ohene-Botwe, B. (2024). Sostenibilidad ambiental en radiografía en entornos de bajos recursos: Un estudio cualitativo sobre la conciencia, las prácticas y los

desafíos entre los radiógrafos de Zimbabwe y Zambia. *Radiography*.

<https://doi.org/10.1016/j.radi.2024.05.010>

Brown, M., & Forster, B. (2022). Climate change: How radiologists can help. *Canadian Association of Radiologists Journal*, 73(1), 10–13.

<https://doi.org/10.1177/084653712111064217>

Chaban, Y., Vosshenrich, J., McKee, H., Gunasekaran, S., Brown, M., Atalay, M., Heye, T., Markl, M., Woolen, S., Simonetti, O., & Hanneman, K. (2023). Sostenibilidad ambiental y resonancia magnética: desafíos, oportunidades y un llamado a la acción. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. <https://doi.org/10.1002/jmri.28994>

Creswell, J. W. (2014). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (4th ed.). *SAGE Publications*

. https://spada.uns.ac.id/pluginfile.php/510378/mod_resource/content/1/creswell.pdf

David, A., Olawade, D., Vanderbloemen, L., Rotifa, O., Chinaza, S., Egbon, E., Owoidighe, A., Adeleke, S., Ghose, A., & Boussios, S. (2025). Avances impulsados por IA en imágenes y mejora de dosis bajas: una revisión. *Diagnostics*, 15(6), 689.

<https://doi.org/10.3390/diagnostics15060689>

Durán, M. (2013). Criterios tecnológico-ambientales bajo un enfoque sistémico: transferencia de tecnología química. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(3), 377–390.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432014000300002

Esmaeili, A., Twomey, J., Overcash, M., Soltani, S., McGuire, C., & Ali, K. (2014). Scope for energy improvement for hospital imaging services in the USA. *Journal of Health Services Research & Policy*, 19(4), 204–212. <https://doi.org/10.1177/1355819614554845>

Flick, U. (2015). *Introducción a la investigación cualitativa* (5.^a ed.). Morata.

https://edmorata.es/wp-content/uploads/2021/02/Flick.-Introduccion-a-la-investigacion-cualitativa_prw.pdf

Franco, D., Orschler, L., Lackner, S., Agrawal, S. & Weissbradt, D. (2022). Monitoreo del SARS-Cov-2 en aguas residuales: Hacia centinelas con precisión analítica. *Science of the Total Environment*, 805, 150275.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721053213?via%3Dihub>

Garnica, E., Acevedo, L., Caraballo, A., Español, J. & Hernández C. (2024). *Análisis comparativo de tecnologías de tomografía computarizada en clínicas del sur de Bogotá y hospitales de España: eficiencia operativa, técnica, impacto ambiental y sostenibilidad*. [Diplomado de profundización para grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)]. Repositorio Institucional UNAD.

<https://repository.unad.edu.co/handle/10596/65584>

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill Education.

https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf

Heye, T., Knoerl, R., Wehrle, T., Mangold, D., Cerminara, A., Loser, M., Plumeyer, M., Degen, M., Lüthy, R., Brodbeck, D., & Merkle, E. M. (2020). The energy consumption of radiology: Energy- and cost-saving opportunities for CT and MRI operation. *Radiology*, 295(3), 593–605. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020192084>

- Loayza, J., & Silva, V. (2015). Los procesos industriales sostenibles y su contribución en la prevención de problemas ambientales. *Revista de Investigación de la Universidad Norbert Wiener*, 4(1), 59–66. <https://www.redalyc.org/pdf/816/81629469013.pdf>
- Lojo-Lendoiro, S., Rovira, À., & Morales Santos, Á. (2024). *Green radiology: Cómo desarrollar una radiología sostenible*. *Radiología*, 66(3), 248–259. <https://doi.org/10.1016/j.rx.2023.06.007>
- McCarthy, C., Gerstermaier, J., O’Neill, A., McEvoy, S., Hegarty, C., & Heffernan, E. (2014). EcoRadiología: Cómo acabar con el desperdicio de energía en el departamento de radiología. *Academic Radiology*, 21(12), 1574–1578. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2014.07.010>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2013). *Evaluación nacional de tecnologías para la adaptación al cambio climático en Colombia*. https://unfccc.int/ttclear/TNA/COL-TNA-TNA_and_TAP_Adaptation_2013.pdf
- Muñoz, C. (2019). Adopción de tecnologías de bajo impacto ambiental. En *Tecnología, ambiente y sociedad: Perspectivas críticas sobre la sostenibilidad tecnológica*. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/bitstream/123456789/1653/1/183457.pdf>
- Olivé C., F., & Sanhueza, M. B. (2025). Hacia un sistema de salud sustentable en Chile: El papel de los hospitales verdes. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 364–372. <https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2025.08.005>
- Piones, O. (2023). *Transición energética, gestión sostenible y desafíos institucionales en Chile*. Universidad de Chile / Comisión Chilena de Energía Nuclear.

<https://derecho.uchile.cl/dam/jcr:a33a2139-9298-4e13-aada-1045bc6304cc/20-osvaldo-piones-cchen-compressed.pdf>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2021). *Consumo y producción sostenibles*. <https://www.unep.org/>

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) & Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). (2010). *Manual para realizar una evaluación de necesidades en materia de tecnología para el cambio climático*.

https://www.uncclearn.org/wp-content/uploads/library/undp90_spn_0.pdf

Rockall, A., Allen, B., Brown, M., El-Diasty, T., Fletcher, J., Gerson, R., Goergen, S., Marrero, A., Hanneman, K., Hess, C., Ming, E., Salama, D., Schoen, J., & Sheard, S. (2025).

Sustainability in radiology: Position paper and call to action from ACR, AOSR, ASR, CAR, CIR, ESR, ESRNM, ISR, IS3R, RANZCR, and RSNA. *Radiology*, 314(3).

<https://doi.org/10.1148/radiol.250325>

Roletto, A., Zanardo, M., Bonfitto, G., Catania, D., Sardanelli, F., & Zanoni, S. (2024). El impacto ambiental del consumo energético y las emisiones de carbono en los servicios de radiología: una revisión sistemática. *Insights into Imaging*, 15, Article 44.

<https://doi.org/10.1186/s41747-024-00424-6>

Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, M. P. B. (2014). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (5.^a ed.). *McGraw-Hill Education*.

https://www.academia.edu/20792455/Metodolog%C3%ADa_de_la_Investigaci%C3%B3n_5ta_edici%C3%B3n_Roberto_Hern%C3%A1ndez_Sampieri

- Schoen, J., McGinty, G., & Quirk, C. (2021). Radiología en nuestro clima cambiante: Un llamado a la acción. *Journal of the American College of Radiology*, 18(5), 735–741. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2021.02.009>
- Sumner, C., Ikuta, I., Martin, J., Mansoori, B., Chalian, M., Englander, B., Chertoff, J., Woolen, S., Caplin, D., Sneider, M., Desouches, S., Chan, T., & Kadom, N. (2023). Enfoques para la ecologización de la radiología. *Academic Radiology*, 30(3), 425–431. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2022.08.013>
- Sustainability Directory. (s.f.). *Eco-Radiology*. Recuperado el 25 de septiembre de 2025, <https://sustainability-directory.com/term/eco-radiology/>
- Tamayo, S., Rosero, A., Ronquillo, S., & Limones, M. (2023). Utilidad de tecnologías recientes en imágenes diagnósticas. *Revista Científica de la Asociación de Medicina de Urgencias y Emergencias de Colombia*, 7(2), 91–99. <https://reciamuc.com/index.php/RECIAMUC/article/view/1129>
- Trapero, M., & López, I. (2019). Guía de la SERAM para la renovación y actualización tecnológica en radiología. *Radiología*. <https://www.elsevier.es/es-revista-radiologia-119-articulo-guia-seram-renovacion-actualizacion-tecnologica-S0033833818302005>
- Vega, R. (2015). *Evaluación de sostenibilidad de sistemas de construcción industrializados de fachada en edificios. Análisis de la sostenibilidad en proyectos de tecnología desde una perspectiva multidimensional* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPM. <https://oa.upm.es/38121/>
- Woolen, S., Kim, C., Hernandez, A., Becker, A., Martin, A., Kuoy, E., Pevec, W., & Tutton, S. (2022). Radiology environmental impact: What is known and how can we improve? *Academic Radiology*, 30(4), 666–675. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2022.10.021>