

Hacia una radiología sostenible: Revisión bibliográfica sobre el impacto energético y ambiental de las tecnologías de imagen digital

Danna Valentina Cómbita Pinzón

María Catalina Diaz Gómez

Tania Liseth Peña Saavedra

Miguel Eudin Roa Pinto

Laura Daniela González Sierra

Asesor

Edna Rocío Jamaica Guío

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias de la Salud ECISA

Radiología e Imágenes Diagnósticas

2025

Resumen

El presente estudio evalúa el impacto ambiental asociado al consumo energético en los servicios de radiología digital y analiza estrategias orientadas a mejorar la sostenibilidad en los centros de salud. A través de una revisión bibliográfica desarrollada entre los años 2023 y 2024, se identificaron problemáticas relevantes como el uso de equipos obsoletos, prácticas operativas ineficientes, la ausencia de políticas energéticas institucionales y la limitada adopción de metodologías de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en el contexto latinoamericano.

Los resultados evidencian que modalidades como la tomografía computarizada y la resonancia magnética presentan un alto consumo energético, incluso en estado de espera, lo que incrementa de manera significativa los costos operativos y la huella ambiental de los servicios de imagenología. Asimismo, se identificó que la modernización tecnológica, la optimización de la infraestructura hospitalaria, la implementación de protocolos de bajo consumo energético y la incorporación de fuentes de energía renovable constituyen estrategias efectivas para reducir el impacto ambiental. De igual forma, la capacitación continua del personal técnico y administrativo se reconoce como un factor clave para promover el uso eficiente de los equipos, evitar repeticiones innecesarias de estudios y fortalecer una cultura organizacional orientada a la sostenibilidad. Se concluye que la integración de la sostenibilidad ambiental dentro de los procesos de aseguramiento de la calidad en radiología es fundamental para garantizar prácticas diagnósticas eficientes, responsables y alineadas con los objetivos de desarrollo sostenible, contribuyendo tanto a la protección del medio ambiente como a la optimización de los recursos del sector salud.

Palabras clave: Imagenología, Tecnología, Eficiencia Energética, Sostenibilidad, Radiología.

Abstract

This study evaluates the environmental impact associated with energy consumption in digital radiology services and analyzes strategies aimed at improving sustainability in healthcare institutions. Through a bibliographic review conducted between 2023 and 2024, key challenges were identified, including the use of obsolete equipment, inefficient operational practices, the absence of institutional energy policies, and the limited adoption of Life Cycle Assessment (LCA) methodologies in Latin America.

The findings indicate that modalities such as computed tomography and magnetic resonance imaging exhibit high energy consumption, even in standby mode, significantly increasing operational costs and environmental impact. The results also highlight that technological modernization, optimization of hospital infrastructure, implementation of low-energy consumption protocols, and integration of renewable energy sources are effective strategies to reduce environmental impact. Additionally, continuous training of technical and administrative staff is identified as a key factor in promoting efficient equipment use, preventing unnecessary repeat examinations, and strengthening a sustainability-oriented organizational culture. It is concluded that incorporating environmental sustainability into quality assurance processes in radiology is essential to ensure efficient, responsible diagnostic practices aligned with sustainable development goals, benefiting both environmental protection and healthcare resource optimization.

Keywords: Imaging, Technology, Energy Efficiency, Sustainability, Radiology.

Tabla de contenido

Introducción	6
Planteamiento del Problema.....	7
Justificación.....	9
Objetivos	11
Objetivo General	11
Marco Teórico.....	12
Radiología Verde.....	12
Consumo energético de los equipos de adquisición de imagen.....	13
Ciclo de vida de los equipos de adquisición de imagen	14
Consumo de energía en la sala de imágenes diagnósticas.	16
Acuerdo internacional en el sector salud.....	17
Metodología	18
Resultados	20
Comparativa de consumo energético por modalidad.....	20
Factores de optimización energética identificados	21
Modos de ahorro de energía y gestión operativa.....	21
Barreras institucionales para la sostenibilidad energética.	22
Análisis Comparativo	23
Recomendaciones.....	24
Conclusiones	26
Referencias bibliográficas	28

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Comparación Internacional de Estrategias de Sostenibilidad Energética en Radiología</i>	23
---	----

Introducción

La sostenibilidad ambiental en los servicios de radiología digital se ha convertido en un desafío prioritario para los sistemas de salud a nivel global. El creciente consumo energético de equipos como la tomografía computarizada (TC) y la resonancia magnética (RMN), sumado a la dependencia de sistemas de climatización y tecnologías de alta demanda eléctrica, ha evidenciado la necesidad de transformar los servicios de diagnóstico por imagen hacia modelos más eficientes y responsables. Mientras países como España, Canadá o Alemania avanzan en la implementación de políticas claras, auditorías energéticas, tecnologías renovadas y estrategias institucionales para reducir la huella de carbono, en Colombia persisten brechas significativas relacionadas con la obsolescencia tecnológica, la falta de lineamientos nacionales y la ausencia de indicadores energéticos.

Este análisis comparativo permite comprender cómo diferentes países han abordado la sostenibilidad radiológica mediante marcos regulatorios, programas institucionales y herramientas tecnológicas, ofreciendo modelos que pueden orientar la transición colombiana hacia una radiología más eficiente, moderna y ambientalmente consciente. La revisión evidencia que la sostenibilidad no depende únicamente de la tecnología, sino también de la gobernanza institucional, la medición del consumo energético, la capacitación del personal y el compromiso nacional con la eficiencia energética en salud.

Planteamiento del Problema

Durante la última década se ha presentado un importante desarrollo tecnológico que se utilizan en el área de la salud, y en imagen diagnóstica en particular, ha permitido una gran expansión de los medios y servicios que, mediante el tratamiento de imágenes, permiten el diagnóstico, seguimiento e incluso algunas veces el tratamiento de algunas patologías.

Los equipos de imágenes diagnósticas son grandes consumidores de electricidad en el sistema de atención, la ventilación, la calefacción y aire acondicionado en las estaciones de trabajo. (Woolen, 2023) Por lo que en cada institución se hace una lista de chequeo que clasifique cada equipo biomédico según su consumo energético y apegarse a la norma Colombiana NTC 60601-1-2 especifica requisitos para la seguridad básica y el desempeño esencial de equipos y sistemas electromédicos y la norma NTC ISO la cual da pautas para la gestión de la energía en organizaciones que incluyen hospitales (Velásquez, 2024).

La inadecuada praxis médica por mal posicionado el paciente o mala lectura del examen por la no determinación del médico radiólogo a si el examen cumple con las especificaciones técnicas da lugar a baja calidad y a costos económicos por indemnizaciones (Romero, 2016). La llegada de la tomografía axial computarizada y de la resonancia magnética han conseguido un avance significativo en la calidad diagnóstica. Sin embargo, su uso intensivo en estas causas un gran gasto energético dada la complejidad de los equipos, los sistemas de refrigeración, la infraestructura tecnológica y el tiempo de funcionamiento, que a menudo es largo incluso para las máquinas que están en reposo o paradas y por tanto consumen energía.

Esto lo han demostrado diferentes estudios a nivel internacional, evidenciado que los servicios de radiología son uno de los que más energía consumen dentro de un hospital, incluso sobre otras unidades clínicas. Países como España, Canadá o Alemania han redactado políticas

institucionales, auditorías energéticas o planes de sostenibilidad para hacer frente a la huella energética de los servicios de imagenología, introduciendo la gestión energética como elemento principal de la gestión hospitalaria. (Lojo-Lendoiro & Rodríguez, 2024, pp. 5–7). En el caso colombiano, la sostenibilidad energética en los servicios de radiología digital constituye un reto emergente. La mayoría de los centros de diagnóstico usan aparatos cuya vida útil recomendada ha expirado, presentan un alto grado de obsolescencia y no existen políticas formales para la gestión energética, lo que provoca un consumo de energía desmesurado, un aumento del gasto operativo y una mayor frecuencia en la aparición de fallos técnicos que tiene un efecto adverso en la calidad de las imágenes diagnósticas y aumenta el impacto medioambiental (Ortiz Pacheco, 2024, pp. 18–21).

Además, la escasa formación continua en prácticas para asegurar la sostenibilidad y el escaso aprovechamiento de las tecnologías emergentes conllevan un obstáculo en la optimización del consumo energético. Estas condiciones exponen la urgencia de sistematizar el análisis de los aspectos tecnológicos, operativos e institucionales en torno a la sostenibilidad energética de los servicios de la radiología digital del país, y permiten la generación de estrategias de reducción del impacto medioambiental sin dejar de ofrecer la calidad requerida frente a las capacidades diagnósticas. Habiendo referenciado esta problemática nos planteamos la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo mejorar la sostenibilidad energética en los servicios de radiología digital mediante la modernización tecnológica, la gestión eficiente de los recursos y la capacitación del personal?

Justificación

El creciente avance de las tecnologías de imagen diagnóstica, tanto la de rayos X como otras tecnologías de imagen, han convertido a la radiología digital en un pilar esencial en los sistemas de salud. Sin embargo, este desarrollo ha conllevado un aumento del consumo energético y del impacto ambiental relacionado con la utilización de máquinas de gran complejidad que no sólo requieren un largo periodo de preparación, sino que, al ser usadas de manera continua, trae un costo energético muy elevado. Además, el hecho de que el funcionamiento de los equipos de TC y RM suponga una fracción importante del coste general y de la huella de carbono de esta parte del sector salud (Woolen et al., 2023, pp. 2–3).

A nivel internacional, la sostenibilidad energética en la radiología ha sido una constante en las políticas institucionales y en auditorías energéticas, en tecnologías de renovación y en criterios ambientales de gestión. Ejemplo de modelos de "radiologías sostenibles" son los de países como España, Canadá y Alemania, que demuestran no sólo que la eficiencia energética repercute de manera positiva en el medioambiente, sino que también incrementa la eficiencia, es incluso un componente más de la calidad del servicio diagnóstico (Lojo-Lendoiro & Rodríguez, 2024, pp. 5–7).

En este sentido, el presente estudio analiza el impacto energético y ambiental de las tecnologías de imagen digital e identifica estrategias de tipo evidencial que ayudan a mejorar la sostenibilidad de los servicios de radiología en Colombia. El estudio busca contribuir a la generación de conocimiento que respalde la toma de decisiones institucionales que propenden por la modernización tecnológica, por el manejo eficiente de los recursos energéticos y por el uso de herramientas novedosas, como la inteligencia artificial, los sistemas de gestión energética y otros similares.

Desde lo social, la investigación aporta beneficios directos que contribuye a la disminución del impacto ambiental del sector salud y a la utilización más eficiente de los recursos públicos y privados dedicados a la atención de la salud. Una radiología energéticamente sostenible promueve la continuidad del servicio, disminuye los costes operativos y alargadamente mejora el acceso de la población a los servicios de diagnóstico de calidad, sin comprometer ni la seguridad del paciente ni el entorno ambiental.

Finalmente, para la forma de formación de los profesionales en radiología e imágenes diagnósticas, la investigación ayuda a dar a conocer una visión ética del ejercicio profesional en el cual la eficiencia energética, la responsabilidad ambiental y la calidad diagnóstica son elementos de ser considerados como interdependientes. De este modo, el estudio también contribuye a la instauración de cultura de la sostenibilidad en el ámbito de la salud, la cual haría frente a los retos del medio ambiente actual y sería coherente con el desarrollo sostenible.

Objetivos

Objetivo General

Analizar, partiendo de la literatura existente, los factores tecnológicos, operativos e institucionales que influyen en el consumo energético de los servicios de radiología digital y su impacto en la sostenibilidad ambiental.

Objetivos Específicos

Sintetizar la evidencia científica que relaciona el grado tecnológico de los equipos generadores de imágenes diagnósticas (RX, TC, RM) y la calidad del desempeño diagnóstico que pueden ofrecer a la sostenibilidad ambiental.

Identificar las variables operativas y flujos productivos que repercuten en el consumo energético innecesario en los servicios de radiología digital.

Verificar las normativas y guías técnicas que en el plano internacional se han puesto en marcha para la descarbonatación de los departamentos de imagenología.

Proyectar recomendaciones basadas en la evidencia, de gestión institucional para impulsar el uso eficiente y renovación de dispositivos tecnológicos amigables con el medio ambiente.

Explorar el potencial transformador que puede ofrecer la inteligencia artificial y la introducción de energías renovables como promotores de la sostenibilidad energética en el sector de las imágenes diagnósticas.

Marco Teórico

Radiología Verde

Planteamiento que busca mejorar y minimizar el impacto ambiental en los servicios de diagnóstico por imagen, centrándose en reducir el consumo de agua y energía, reciclar residuos propios del servicio como los medios de contraste, disminuir la radiación como repetir estudios y promover la sostenibilidad ambiental con prácticas ecológicas.

Los servicios de imágenes diagnósticas que, llevando a cabo su misión, trazan un plan de reducir el impacto ambiental aplicando la normatividad vigente gestionando el uso eficiente de la energía y otros recursos como el agua, el uso de materiales químicos, la disposición adecuada de desechos, reducir la emisión de radiaciones ionizantes y fomentar el uso de una radiología de bajo impacto ambiental.

A nivel mundial se promueven acuerdos para reducir el impacto ambiental en los sectores de radiólogos, fabricantes de equipos y organizaciones de salud. En el 2014 la Sociedad Europea de radiología lanzó un programa de radiología verde buscando promover la sostenibilidad ambiental con la práctica radiológica creando lineamientos, recomendaciones, promocionando la investigación y desarrollo de herramientas de evaluación. En el 2019 la Sociedad Internacional de Radiología se comprometió a incentivar la sostenibilidad ambiental en la práctica radiológica promoviendo la educación y la investigación. (Lojo-Lendoiro, 2023).

Los avances tecnológicos en la generación de imágenes diagnósticas y la calidad de la prestación de los servicios de salud han llevado a un aumento en los costos económicos y ambientales debido a la demanda de servicios de imagenología transversal y radiología intervencionista. Las políticas económicas en la salud a nivel global permiten equilibrar la atención radiológica económicamente con la ambiental. Eco Rad se refiere a combinar los costos

económicos y ambientales en un enfoque de salud planetaria optimizando la práctica radiológica integrando adquisición de imágenes con tecnologías ecológicas y operativas, promover modelos de pago que premien la radiología ecológica, elaborar presupuestos ecológicos que involucren a los pacientes, a la industria, a los pagadores externos y a los responsables gubernamentales.

(Northrup, 2025).

Consumo Energético de los Equipos de Adquisición de Imagen

La resonancia magnética (RM) consume más energía que el TAC por la naturaleza de mantener el imán superconductor enfriado y activo las 24 horas consume energía incluso en modo espera, mientras que el TAC solo funciona durante el escaneo. El equipo de resonancia magnética puede consumir durante un año 110400kWh. Un estudio dura entre 20 a 40 minutos incluso más. Mientras que el TAC un estudio se realiza en pocos minutos y el consumo principal está durante el escaneo por su naturaleza de radiación ionizante que es más eficiente en el uso diario.

En estudio hecho en Suiza se manifestó que tres equipos de tomografía y cuatro de RMN consumen 614825 kWh/ año. Además, se detalló que dos tercios de desperdicio de energía en tomografía es debido al estado inactivo e improductivo del sistema y un tercio de la energía del RMN es consumido por el estado de apagado debido a la necesidad de refrigeración continua. (Woolen, 2023) Prasana et detallaron que el consumo de energía en las estaciones de trabajo era de 137760 kWh/ año de la que el 76% de la energía representaba desperdicio. En EE. UU. se analizó que en el 1% al 10% de solicitudes de exámenes innecesarios se generaría un ahorro energético de 240 millones de kWh/ año. (Woolen, 2023).

La radiología digital depende de equipos altamente sofisticados que requieren un suministro continuo de energía para operar correctamente. Modalidades como la TAC y la RMN

consumen grandes cantidades de electricidad incluso en periodos de inactividad debido a sus sistemas de enfriamiento, generadores y servidores de procesamiento. Estudios recientes muestran que un servicio de imagenología puede consumir más energía que varias áreas combinadas de un hospital, lo que evidencia la magnitud del problema.

Por otro lado, la literatura muestra que la inteligencia artificial se ha convertido en una herramienta clave para mejorar la eficiencia operativa. Según Ueda (2024), los algoritmos modernos permiten optimizar protocolos, reducir tiempos muertos, evitar estudios repetidos y anticipar fallas mediante mantenimiento predictivo. Además, la sostenibilidad se reconoce actualmente como un componente esencial de los sistemas de calidad hospitalaria, ya que contribuye al uso responsable de recursos y a la reducción de la huella ambiental.

Ciclo de vida de los Equipos de Adquisición de Imagen

Los equipos de imágenes diagnósticas para su fabricación usan materiales llamadas (tierras raras) como el TC con el silicio (SiC) y el nitruro de galio (GaN) para los conductores de cobre, oro y aluminio para los electrodos usa óxido de indio y estaño y para los sensores usa óxido de titanio y óxido de zinc. los equipos de RM para el imán usa un elemento llamado niobitanio refrigerado con helio líquido a -269°C para las bobinas de gradiente se usa cobre, plata o aluminio y materiales semiconductores como el carburo de silicio.(Padilla, 2010) En Colombia el ciclo de vida incorpora dos etapas que son la precomercialización que se refiere a la concepción, desarrollo, fabricación importación y registro de tecnología médica; La postcomercialización se refiere a la planeación, selección, adquisición, instalación, uso clínico, mantenimiento y disposición final del equipo médico.(Padilla, 2010).

La obsolescencia es la disminución de la vida útil que posee un equipo que mantiene un nivel tecnológico adecuado que garantiza la adecuada prestación del servicio los ciclos de vida

dependen de su duración física de los componentes y dispositivos electrónicos o mecánicos y estos son sometidos a cambios y actualizaciones. La obsolescencia está sometida a los cambios tecnológicos que en medicina son continuos y a la intensidad de la carga de trabajo. En general el ciclo de vida de un equipo está entre:(Núñez, 2014) Rayos X convencional fijo, entre siete y diez años Rayos X portátiles, entre diez y doce años. Mamógrafo, entre ocho y diez años. Tomógrafo Computarizado, entre ocho y doce años. Resonador magnético, entre ocho y doce años. Ultrasonido, entre siete y nueve años. (Núñez, 2014).

El desuso de un equipo médico de imágenes diagnósticas se realiza considerando la normatividad vigente y las políticas internas de la institución sobre gestión de residuos hospitalarios. Resolución 482 de 2018 del ministerio de salud informando a la secretaría de salud para la cancelación de la licencia, el equipo debe ser desmantelado o inhabilitado, los componentes radioactivos deben ser gestionados por empresas autorizadas siguiendo los protocolos de seguridad radiológica, se debe documentar la baja y disposición del equipo. (Aristondo, 2019). En Colombia el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial cuenta con un documento que establece lineamientos para cada una de las etapas de disposición de residuos electrónicos, así como de cuidado y correcto manejo de algunos residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Los equipos médicos tienen una serie de componentes que son potencialmente peligrosos como el cobre, y el titanio-niobio presentes en los imanes de resonancia magnética el plomo utilizado en los monitores el mercurio utilizado en las pantallas LCD, el cadmio utilizado en baterías plásticos y resistencias, plásticos clorados utilizados en el cableado, retardantes de llama bromados utilizados en las carcasas de ordenadores y placas de circuitos. La Organización mundial de la salud (OMS) en su documento oficial de 2019 establece directrices sobre el desmantelamiento y disposición final de equipos médicos o eliminación

como son el enterramiento, depósito, descarga, vertido y colocación o liberación intencionada de estos dispositivos. (Aristondo, 2019).

La obsolescencia tecnológica es otro factor determinante: los equipos con más de diez años presentan mayor consumo energético, generan calor adicional, requieren más calibraciones y ofrecen menor calidad diagnóstica. En países con presupuestos limitados, esta situación se perpetúa debido al lento proceso de renovación tecnológica.

Consumo de Energía en la Sala de Imágenes Diagnósticas.

La demanda de energía de resonancia magnética, tomografía y equipos de RX es de difícil cuantificación por el cronograma de actividades que refiere a demanda del servicio con picos de potencia de 10kW a 100kW durante un estudio. Esto, porque no sólo se considera el funcionamiento de los equipos de imagenología sino también las instalaciones asociadas, como el aire acondicionado, los servidores de almacenamiento de imágenes (PACS) y los puestos de trabajo. Según Open Medscience (s. f.), la climatización puede llegar a suponer casi la mitad del gasto energético en un departamento de radiología, especialmente en los laboratorios donde la temperatura y la humedad deben ser controladas de forma estricta, como las salas de resonancia magnética. Mientras que la cuantificación de la demanda de energía para la climatización es continua y está sujeta a la época del año, verano o invierno. (LICIOTTI, 2023).

En este contexto, la literatura hace hincapié en la puesta en práctica de estrategias integrativas de gestión energética hospitalaria. Según Ortiz Pacheco (2024), la supervisión continua del consumo eléctrico a través de software especializado permite identificar los picos de demanda, las fugas energéticas y las oportunidades de mejora operativa. Estas herramientas permiten la toma de decisiones basadas en datos y contribuyen a una reducción de los gastos operativos, integrando así la sostenibilidad financiera y ambiental de las instituciones de salud.

Acuerdo Internacional en el Sector Salud

Las políticas internacionales en salud sostenible han adquirido un especial interés a raíz de las evidencias que sitúan al sector sanitario como uno de los principales generadores de gases de efecto invernadero. La Organización Mundial de la Salud ya ha manifestado la necesidad de que los sistemas de salud guíen la transición hacia la elaboración de modelos de bajo carbono, estableciendo criterios ambientales de la política de planificación y adquisición de tecnología sanitaria, de la prestación de servicios sanitarios (OMS, 2019).

En Europa, el Pacto Verde Europeo fija objetivos ambiciosos de neutralidad climática que toca de lleno al sector salud promoviendo la renovación tecnológica, las auditorías energéticas y los modelos de operación hospitalaria sostenible. Bonilla (2024) pone de manifiesto que estas políticas han sido un marco referencial para la normativa nacional y las guías técnicas en radiología, mostrando así una brecha importante frente a otros países, como en el caso de Colombia, que no tiene lineamientos obligatorios en sostenibilidad energética para los servicios de imagenología.

Estas pautas establecen cómo debe incrementarse la eficiencia energética, cómo debe crecer el uso de energías alternativas y cómo gestionar la basura hospitalaria.

Metodología

La investigación en la que se fundamenta es la revisión bibliográfica descriptiva y crítica, con un enfoque cualitativo-analítico, que se centró en el análisis de documentos científicos y técnicos relacionados con el consumo energético y la huella ambiental, la obsolescencia tecnológica y las estrategias de sostenibilidad aplicadas en los servicios de imagenología diagnóstica en especial en las modalidades de rayos X, tomografía computarizada (TC) y resonancia magnética (RM).

La búsqueda de información fue llevada a cabo de forma sistemática a lo largo del periodo de los años 2023 a 2024 en bases de datos científicas de reconocido prestigio, como PubMed, ScienceDirect, Scopus y Google Scholar. Se utilizaron diferentes descriptores en español e inglés relacionados con el tema del estudio, tales como ejemplo: “Green Radiology”, “Energy consumption in medical imaging”, “Sustainable radiology”, “Radiology department energy efficiency”, “Artificial intelligence and Sustainability” y sus respectivas versiones en español.

Los términos fueron combinados a partir de operadores booleanos para aumentar y refinar los resultados. Entre las ecuaciones empleadas encontramos combinaciones como: (Radiology OR Medical Imaging) AND (Energy Efficiency OR Sustainability), así como búsquedas concretas relacionadas con inteligencia artificial, consumo energético y sostenibilidad ambiental de la salud.

Los criterios de inclusión fueron los siguientes: artículos de investigación científica en los años de 2023 a 2024, en español e inglés, revisados por pares y que incluyeran referencias explícitas al consumo energético, la huella de carbono, la gestión energética, la gestión del medio

ambiente o las políticas de sostenibilidad en el sector de salud, concretamente en los servicios de la radiología y la imagenología.

Se excluyeron artículos de investigación que estuvieran centrados solamente en aspectos clínicos o diagnósticos, sin tener relación con el consumo energético o la huella de carbono. Se excluyó también la literatura gris sin aval científico (blogs, opiniones), los artículos duplicados, los textos archivados sin acceso, los artículos de investigación centrados solamente en la tecnología analógica o desfasada y que ya no están en el mercado.

La selección de documentos se desarrolló en cuatro fases sucesivas. Durante la primera fase de identificación se concentraron todos los registros que se habían las ecuaciones de búsqueda en las bases de datos seleccionadas. Posteriormente se procedió a la segunda fase de cribado, en la que a partir de la lectura de títulos y resúmenes se desecharon aquellas que las cuales no tenían relación directa con la finalidad del estudio. En la fase de elegibilidad se realizó la lectura exhaustiva de los textos seleccionados previamente, considerando su adecuación temática y el grado de rigurosidad metodológica.

Para finalizar, en la fase de inclusión, se determinó el conjunto final de artículos que conformarán, a partir de entonces, el corpus de análisis de la revisión bibliográfica.

Para lograr esto, se utilizó la técnica del análisis de contenido cualitativo, el cual permitió identificar categorías y patrones recurrentes asociados con el consumo energético, la eficiencia operativa, la obsolescencia tecnológica, la sostenibilidad de los procesos y la gestión institucional en radiología. Para complementar el análisis anterior, se llevó a cabo un análisis comparativo de los diferentes países con mayor referente de estudio sobre el contraste de los niveles del consumo energético en las distintas modalidades de imagenología.

Resultados

Los resultados de la revisión bibliográfica evidencian que el consumo energético en los servicios de radiología digital varía de manera significativa según la modalidad de imagenología, el nivel tecnológico de los equipos, la gestión operativa y el contexto institucional. A continuación, se presentan los principales hallazgos en concordancia con los objetivos del estudio.

Comparativa de Consumo Energético por Modalidad

La literatura es unánime en afirmar que la resonancia magnética (RM) es la modalidad con mayor coste energético dentro de la imagenología, ya que requiere mantener campos magnéticos durante la duración de la prueba, sistemas de criogenia en funcionamiento y sistemas de refrigeración complejos. Estudios internacionales apuntan a que equipos de RM pueden tener un consumo energético de entre 15 y 30 kWh por hora, aún con el equipo sin realizar pruebas (Woolen et al., 2023, pp. 2-4).

La tomografía computarizada (TC) es la segunda modalidad en la demanda de costes energéticos, en particular en equipos de generaciones pasadas, siendo el consumo asociado al tiempo de calentamiento más elevado y a sistemas de refrigeración menos eficientes. Sin embargo, las mejoras en las TC llevan a paradigmas de reducción del consumo gracias a modos de menor consumo energético y tecnologías de gestión óptima de la energía (Lojo-Lendoiro, & Rodríguez, 2024, pp. 10-12).

Los equipos de rayos X digitales tienen un coste energético considerablemente menor que la TC y la RM; sin embargo, su coste energético acumulado puede ser relevante dado que se encuentran en instituciones con alta carga asistencial y flujos de trabajo ineficientes, en particular

siendo el tiempo en que los equipos se encuentran encendidos, aun fuera de los tiempos de atención.

Factores de Optimización Energética Identificados

Uno de los elementos más significativos en lo que respecta a optimización, tal como se muestra en la literatura, ha sido la modernización tecnológica; los equipos de imagenología de la más alta gama incluyen sistemas de gestión energética que permiten ajustar automáticamente el consumo a partir de la demanda clínica, logrando así reducir el gasto eléctrico sin comprometer la calidad diagnóstica preestablecida (Woolen et al., 2023).

Del mismo modo, la adopción de sistemas de medición y gestión energética ha demostrado ser una muy buena alternativa que se puede implementar para identificar picos de consumo y pérdidas energéticas en tiempo real. Según Ortiz Pacheco (2024, pp. 30–33) las instituciones que incorporan indicadores de eficiencia energética logran maximizar la mejora en el control del gasto operativo.

Modos de Ahorro de Energía y Gestión Operativa

La evidencia científica viene a corroborar que el uso adecuado de modos de suspensión o de apagado programado de los equipos puede posibilitar ahorros energéticos importantes. En la RM, apagar el equipo durante mucho tiempo no siempre es una opción factible, más el uso de modos de bajo consumo puede implicar una disminución del consumo energético del 20 % a 30 % frente al uso continuado del dispositivo en estado activo (Lojo-Lendoiro & Rodríguez, 2024, pp. 14–16).

En equipos de TC y de rayos X digitales, la literatura indica que aprovechar el apagado del dispositivo fuera del horario laboral puede reducir el consumo energético de una jornada diaria entre un 10 % a un 25 %, dependiendo del volumen de estudios y del modelo de equipo

(Woolen et al., 2023).

Impacto de La Inteligencia Artificial en la Eficiencia Energética

Los autores hacen énfasis en que la inteligencia artificial se considera como una de las herramientas idóneas para la optimización energética en radiología. Se indican los algoritmos de reconstrucción acelerada como métodos útiles para disminuir los tiempos de adquisición y procesamiento de las imágenes, de forma que se reduce el tiempo de trabajo activo de los equipos y, por lo tanto, se produce una reducción del consumo eléctrico (Ueda, 2024, pp. 309-311).

Por otro lado, la inteligencia artificial también ayuda en la optimización de los protocolos, en la disminución de los estudios repetidos y al mantenimiento predictivo, evitando coloraciones injustificadas, facilitando una mayor eficiencia operativa y la prolongación de la vida del equipo.

Barreras Institucionales para la Sostenibilidad Energética

A pesar de los beneficios encontrados, la literatura ha evidenciado diversas barreras institucionales en la adopción de políticas de sostenibilidad en los servicios de radiología. La revisión ha encontrado que entre las más relevantes se encuentran los altos costos iniciales de la renovación tecnológica, el escaso incentivo económico, la falta de directrices nacionales y la escasa cultura organizacional vinculada a la sostenibilidad ambiental (Ortiz Pacheco, 2024, pp. 18–21). Por otro lado, la falta de formación continua del personal técnico y administrativo provoca un uso ineficiente de los recursos que aumenta el consumo energético y limita el impacto potencial de las estrategias de optimización. Por lo demás, los hallazgos evidencian que la sostenibilidad energética en radiología va más allá de la tecnología, sino que esta sostenibilidad también se articula con el personal, la gestión institucional y las políticas públicas.

Análisis Comparativo

Tabla 1

Comparación Internacional de Estrategias de Sostenibilidad Energética en Radiología

Pais	Marco normativo y políticas	Estrategias energéticas en radiología	Uso de tecnología e IA	Situación comparativa frente a Colombia
España	Normativas como el RD 56/2016 y el Código Técnico de Edificación; guías técnicas de SERAM	Auditorías energéticas obligatorias, programación de encendido/apagado, optimización operativa	Uso progresivo de sistemas inteligentes de gestión energética	Modelo avanzado con políticas integradas y lineamientos claros
Canadá	Políticas hospitalarias con metas de reducción de emisiones	Planes institucionales de eficiencia energética y auditorías periódicas	Uso extendido de inteligencia artificial y mantenimiento predictivo	Alto liderazgo institucional frente a la realidad colombiana
Alemania	Regulación nacional estricta en eficiencia energética	Renovación tecnológica continua e integración con sistemas de climatización eficientes	Equipos con altos estándares de eficiencia energética	Marco normativo vinculante ausente en Colombia
Chile	Lineamientos en radioprotección y gestión de residuos (OPS/OMS)	Avances incipientes en eficiencia energética	Uso limitado de tecnologías inteligentes	Contexto regional comparable, con desafíos similares
Colombia	Ausencia de normativas específicas en sostenibilidad energética	Iniciativas aisladas a nivel institucional	Bajo nivel de adopción de IA y gestión energética	Etapa inicial de desarrollo en radiología sostenible

Nota. Elaboración propia a partir de la revisión de la literatura científica y normativa internacional (Woolen et al., 2023; Lojo-Lendoiro & Rodríguez, 2024; Ortiz Pacheco, 2024; Ueda, 2024).

Recomendaciones

La sostenibilidad energética de los servicios de radiología digital se convierte en un reto prioritario para el mundo de la salud, buscando alinearse con los objetivos internacionales de descarbonización y de ser más eficientes. Las evidencias científicas más recientes demuestran que se tendrá que encontrar una forma de reestructurar la radiología en algo más sostenible que será de tipo multifactorial, combinando innovación tecnológica, cambios culturales, gestión institucional y políticas públicas (Siemens Healthineers, 2024; Rockall et al., 2025; European Radiology Experimental, 2024; Open Medscience, s. f.; Radiology, 2024; Oxford Academic, 2025).

Así, la sustitución de equipamiento obsoleto por aquel que pertenezca a los modelos de última generación homologado por su eficiencia energética debe ser una recomendación prioritaria; estos modelos de última generación incorporan modos de bajo consumo, tecnología avanzada de administración energética y refrigeración optimizada, lo que permite un considerable ahorro eléctrico en las tecnologías de alto impacto como la resonancia magnética y la tomografía computarizada, sin comprometer la calidad diagnóstica ni encarecer a medio y a largo plazo los gastos operacionales en hospitales y clínicas.

Simultáneamente, la incorporación de fuentes de energía renovable paneles solares reduce la dependencia de la red eléctrica convencional, disminuye la emisión de gases de efecto invernadero y mejora la resiliencia energética de los departamentos de imagenología priorizando los ODS del sector salud.

La formación continua del personal técnico y administrativo es uno de los ejes centrales. En la formación de protocolos de encendido y apagado, del uso eficiente de modos standby, del mantenimiento preventivo y de la implementación de prácticas medioambientales se pueden

acortar consumos innecesarios, mejorar la vida útil de los equipos y propiciar una cultura organizativa sostenible.

De igual manera, un avance significativo es la incorporación de IA en los flujos de trabajo. La IA permite mejorar la programación de los estudios, reducir el tiempo de inactividad, disminuir los procedimientos repetidos o innecesarios y mejorar la eficiencia operativa global, lo cual se traduce en ahorros energéticos considerables (PubMed, 2024).

Finalmente, las políticas institucionales deben afianzar estas medidas mediante auditorías energéticas, establecer indicadores de rendimiento ambiental, instaurar programas de reciclaje de residuos electrónicos y adoptar tecnologías digitales como el almacenamiento en la nube. Esta transformación permite reducir el consumo de soportes físicos (impresoras, películas), favoreciendo así el alineamiento de la operación con las tendencias sostenibles internacionales.

Conclusiones

La resonancia magnética es la técnica de imagenología que más energía requiere, dado el mantenimiento de campos magnéticos, dispositivos criogénicos y la refrigeración compleja. Este resultado evidencia que la sostenibilidad en imágenes radiológicas debe tomarse como una prioridad el avance técnico en la RM y en la TC, donde se consume más energía y donde las mejoras técnicas pueden producir parches mucho más relevantes.

La gestión operativa y la implementación de modos de suspensión y de hibernación programada son métodos económicos de ahorro energético, sobre todo en TC y rayos X digitales, y las evidencias indican que pueden disminuir del 10 al 30 % del consumo diario, lo que pone de manifiesto la relevancia de los protocolos de la institucionales claros y de la capacitación del personal para garantizar su aplicación sistemática.

La inteligencia artificial surge como un genuino agente descriptor capaz de mejorar en términos de eficiencia energética la radiología, ya que con inteligencia artificial se optimizan protocolos y se eliminan exploraciones repetidas, acortándose los tiempos de adquisición. Los resultados demuestran que la IA no solo reduce el consumo eléctrico, sino que, además, incrementa la vida útil de los aparatos, lo que la confirma como una auténtica herramienta orientada hacia la sostenibilidad.

Las barreras institucionales que se han podido comprobar (altos costos iniciales, ausencia de incentivos económicos, carencia de directrices que orienten las políticas energéticas sistematizadas a nivel nacional y escasa cultura organizacional) obstaculizan la puesta en marcha de políticas de sostenibilidad energética; lo cual refleja que la transición hacia una radiología sostenible no depende exclusivamente de la tecnología -valorada positivamente-, sino que se

encuentra encadenada a un marco institucional y político que impulse la inversión y fomente la cultura ambiental en los servicios de salud.

La comparación internacional demuestra disparidades importantes entre Colombia y otros países, como por ejemplos; Canadá, Alemania y España, que ya han desarrollado regulaciones estrictas, auditorías energéticas obligatorias, su uso extendido de Inteligencia artificial (IA), un contexto colombiano muy incipiente, donde persisten iniciativas individuales y ninguna política. Esto sugiere que la regulación nacional necesita ser robustecida y que las estrategias sostenibles deban ser promovidas.

La sostenibilidad energética en radiología es un reto multifactorial que requiere la articulación de la innovación tecnológica, la formación y capacitación del personal, la gestión de la entidad y las políticas públicas. Los resultados corroboran que solo con un enfoque holístico se podrá hacer coincidir los servicios de radiología con los objetivos internacionales en materia de descarbonización y eficiencia energética, asegurando la viabilidad ambiental y económica a largo plazo.

Referencias bibliográficas

- Aristondo, F. G. (2019). *Vida útil de los equipos médicos. EsSalud*.
https://www.essalud.gob.pe/ietsi/BOLETINES_TECNOLOGICOS/pdf/boletin_tecnologico_004_2019.pdf
- Boceta, J. P. (2017). *Auditoría energética de un hospital*. Madrid.
<https://repositorio.comillas.edu/jspui/bitstream/11531/26081/1/TFM000860.pdf>
- Bonilla, L. (2024). *Salud, sostenibilidad y políticas globales: el enfoque One Health y el Pacto Verde Europeo*. Editorial Académica.
- BONILLA, J. M. (2024). *El pacto verde europeo y la salud*. Comité Europeo de las Regiones.
<https://recs.es/wp-content/uploads/2024/02/cor-2023-03364-00-00-ac-tra-es.pdf>
- European Radiology Experimental. (2024). *The environmental impact of energy consumption and carbon emissions in radiology departments: A systematic review*. *European Radiology Experimental*, 8(1), Article 24. <https://doi.org/10.1186/s41747-024-00424-6>
- Lojo-Lendoiro, S. (2023). *Green radiology: cómo desarrollar una radiología*. Seram.
https://car.ca/wp-content/uploads/2025/08/SERAM_2025_02_green-radiology-espanol.pdf
- Lojo-Lendoiro, S., & Rodríguez, À. (2024). *Green radiology: Cómo desarrollar una radiología sostenible* (pp. 5–16). Sociedad Española de Radiología Médica (SERAM).
- Liciotti, e. (2023). *Diagnóstico energético en edificios de instituciones de salud*. Inti.
<http://biblioteca.cfi.org.ar/wp-content/uploads/sites/2/2024/02/informe-final-cfi-instituciones-de-salud.pdf>
- Liciotti, D. (2023). *Energy demand and efficiency in diagnostic imaging departments*. *Journal of Healthcare Engineering*, 2023, 1–9.

Northrup, B. E. (2025). *EcoRad: radiología sostenible y ecología de la economía*. British Institute of Radiology. <https://academic.oup.com/bjro/article/7/1/tzaf027/8280407>

Núñez, O. R. (2014). *Obsolescencia Programada en Equipos de Radiodiagnóstico*. Electr. Quimera. https://www.researchgate.net/publication/396266591_Obsolescencia_Programada_en_Equipos_de_Radiodiagnostico_OBSOLESCENCE_IN_DIAGNOSTIC_RADIOLOGY_EQUIPMENT

Ohene-Botwe, B. (2024). *Promoción de actividades de sostenibilidad en la práctica y la educación en radiografía clínica en países con recursos limitados*. *Radiography*, 30(3), 912–918. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2024.05.012>

Open Medscience. (s. f.). *Energy consumption in radiology departments*. Open Medscience.

Open Medscience. (s. f.). *Green radiology in medical imaging: Sustainable imaging pioneering a greener future in radiology*. <https://openmedscience.com/sustainable-imaging-pioneering-a-greener-future-in-radiology/>

Ortiz Pacheco, C. A. (2024). *Identificación de indicadores de gestión para la medición de la eficiencia energética en Colombia: Una revisión sistemática (Trabajo de grado)*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

Ortiz Pacheco, J. (2024). *Gestión energética hospitalaria y eficiencia operativa en servicios de salud*. Universidad Nacional de Colombia.

Oxford Academic. (2025). *Climate resilient and environmentally sustainable radiology: A framework for implementation*. *Radiology Advances*. <https://doi.org/10.1093/radadv/umaf014>

- Padilla, J. V. (2010). *Análisis del Ciclo de Vida de la Tecnología Médica*. Dialnet-An.
<file:///D:/Users/user/Downloads/Dialnet-AnalisisDelCicloDeVidaDeLaTecnologiaMedicaDesdeUna-3634321.pdf>
- Pérez, C. F. (2024). *Revisión de Disposición de Equipos Médicos: Desafíos y Oportunidades*. Universidad Tecnológica Centroamericana, Honduras. https://laccei.org/LACCEI2024-CostaRica/papers/Contribution_1159_final_a.pdf
- PubMed. (2024). *Digital innovations for sustainable radiology: Reducing waste, emissions, and inefficiencies in imaging workflows*. National Library of Medicine.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/41122428/>
- Romero, J. (2016). *Gestión de costos y control de errores en instituciones de salud*. Editorial Médica Panamericana.
- Siemens Healthineers. (2024). *Sustainability in medical imaging: Reducing energy consumption and carbon footprint*. <https://www.siemens-healthineers.com>
- Ueda, D. (2024). *Cambio climático e inteligencia artificial en salud: Revisión y recomendaciones hacia un futuro sostenible*. *Imagenología Diagnóstica e Intervencionista*, 10(3), 305–312. <https://doi.org/10.1016/j.idi.2024.04.006>
- Velásquez, J. A. (2024). *Gestión energética en equipos biomédicos bajo la norma NTC ISO 50001*. Editorial UNAL.
- Woolen, S. A., Heye, T., & Schoepf, U. J. (2023). *Environmental impact of radiology: What is known and how can we improve?* *Academic Radiology*, 30(1), 1–5.
<https://doi.org/10.1016/j.acra.2022.10.014>