

**Evaluación comparativa de tecnologías de adquisición de imágenes desde una perspectiva
de sostenibilidad en la región Caribe colombiana**

Karla Andrea Domínguez Pérez

Aury Janeth González Galarza

April Mitchell Guayara Chica

Gerson Daniel Naranjo Fuentes

Ailen Lourdes Rodríguez Córdoba

Asesor

Alberto Guzmán Avilés

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias de la Salud - ECISA

Tecnología en Radiología e Imágenes Diagnósticas

2025

Resumen

La gestión tecnológica sostenible es un pilar fundamental para garantizar la calidad, la seguridad y la eficiencia en los servicios de diagnóstico por imágenes. En la región Caribe colombiana, los centros hospitalarios enfrentan desafíos significativos relacionados con el mantenimiento de equipos, el consumo energético, la gestión de residuos tecnológicos y la necesidad de una renovación oportuna de las tecnologías. Estas barreras afectan negativamente tanto al medio ambiente como a la economía institucional, comprometiendo la sostenibilidad y la calidad de la atención en salud.

Con el propósito de abordar estas problemáticas, este estudio se orienta a la evaluación comparativa de tecnologías de adquisición de imágenes desde una perspectiva de sostenibilidad, centrándose en las modalidades de Tomografía Computarizada (TC) y Resonancia Magnética (RMN). Se integra un enfoque mixto, de carácter descriptivo y comparativo, que permite analizar la situación actual de estas tecnologías, identificar oportunidades de mejora y proponer directrices para fortalecer la sostenibilidad en los servicios de radiología diagnóstica.

Los resultados se estructuran en una matriz de evaluación de sostenibilidad tecnológica que facilita la comparación entre diversas modalidades de imagen (ecografía, rayos X, tomografía computarizada, resonancia magnética y radiología intervencionista) según su desempeño ambiental, económico y social. Con ello, se busca consolidar un modelo metodológico aplicable que contribuya al fortalecimiento de la gestión tecnológica hospitalaria y a la sostenibilidad del sistema de salud colombiano.

Palabras clave: gestión tecnológica, tomografía computarizada, resonancia magnética, sostenibilidad, región Caribe.

Abstract

Sustainable technology management is a fundamental pillar for ensuring quality, safety, and efficiency in diagnostic imaging services. In the Caribbean region of Colombia, healthcare facilities face significant challenges related to equipment maintenance, energy consumption, technological waste management, and the timely renewal of imaging technologies. These barriers negatively affect both the environment and institutional finances, compromising sustainability and the quality of patient care.

To address these challenges, this study focuses on the comparative evaluation of imaging acquisition technologies from a sustainability perspective, specifically analyzing Computed Tomography (CT) and Magnetic Resonance Imaging (MRI). A mixed-methods approach, both descriptive and comparative, is applied to assess the current performance of these technologies, identify improvement opportunities, and propose guidelines to strengthen sustainability in diagnostic radiology services.

The findings are organized into a technological sustainability assessment matrix that enables the comparison of different imaging modalities (ultrasound, X-ray, computed tomography, magnetic resonance imaging, and interventional radiology) based on their environmental, economic, and social performance. This contributes to the development of an applicable methodological model that strengthens hospital technology management and supports the sustainability of the Colombian healthcare system.

Keywords: technology management, computed tomography, magnetic resonance imaging, sustainability, Caribbean region.

Tabla de Contenido

Introducción	8
Planteamiento del Problema.....	10
Justificación.....	12
Objetivos	15
Objetivo General.....	15
Objetivos Específicos.....	15
Marco Teórico.....	16
Fundamentos Conceptuales de las Tecnologías de Imágenes Diagnósticas	16
Evolución Tecnológica y Principio de Funcionamiento	16
<i>Tomografía Computarizada (TC)</i>	16
<i>Resonancia Magnética (RMN)</i>	17
Dimensiones de la Sostenibilidad Tecnológica en Radiología	17
<i>Dimensión Ambiental</i>	17
<i>Dimensión Económica</i>	18
<i>Dimensión Social</i>	18
Retos de Sostenibilidad en la Región Caribe Colombiana.....	19
Evaluación Comparativa de Tecnologías Radiológicas.....	19
Hacia una Gestión Tecnológica Sostenible en Radiología.....	19
Marco Metodológico	21
Tipo y Diseño de Investigación.....	21
Población y Muestra	21

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información.....	22
<i>Revisión Documental</i>	22
<i>Análisis Comparativo</i>	22
Procedimiento.....	22
Consideraciones Éticas.....	23
Limitaciones del Estudio.....	23
Resultados Esperados.....	23
Resultados.....	24
Conclusiones.....	32
Referencias.....	34

Lista de Tablas

Tabla 1 *Evaluación Comparativa y Sostenible de Diagnóstico por Imágenes* 28

Tabla 2 *Modelo Comparativo de Consumo Energético Anual por Modalidad de Imagen* 30

Lista de Figuras

Figura 1	<i>Comparativo de Consumo Productivo vs Inactivo con Porcentaje de Eficiencia.....</i>	31
-----------------	--	----

Introducción

La sostenibilidad en los servicios de radiología se ha convertido en un eje fundamental para la gestión hospitalaria moderna, especialmente en regiones donde las limitaciones energéticas, económicas y ambientales impactan directamente la prestación de servicios de salud. En el ámbito de la adquisición de imágenes diagnósticas, tecnologías como la Tomografía Computarizada (TC) y la Resonancia Magnética (RMN) representan herramientas indispensables para la práctica clínica actual; sin embargo, su operación requiere altos niveles de consumo energético, infraestructura especializada y una gestión técnica adecuada que condiciona su sostenibilidad. Esta situación adquiere especial relevancia en la región Caribe colombiana, donde los sobrecostos eléctricos, la variabilidad tecnológica y las brechas en infraestructura biomédica influyen en la eficiencia y continuidad del servicio.

En este contexto, la presente investigación se centra en la evaluación comparativa de tecnologías de adquisición de imágenes desde una perspectiva de sostenibilidad, con el propósito de analizar cómo la TC y la RMN se desempeñan frente a criterios energéticos, ambientales, económicos y operativos. Para ello, se desarrollaron competencias clave en el análisis multicriterio, la revisión de literatura científica, la interpretación de indicadores técnicos y la construcción de matrices comparativas que permiten comprender el impacto real de estas tecnologías en el entorno hospitalario caribeño.

El estudio se basa en una revisión documental rigurosa de investigaciones recientes, normativas vigentes e informes técnicos nacionales e internacionales, que evidencian tendencias como la radiología sostenible, el uso eficiente de la energía y la gestión responsable de equipos biomédicos. A partir de este análisis, se plantean lineamientos orientados a fortalecer la

sostenibilidad institucional y a mejorar la toma de decisiones respecto a la adquisición, uso y mantenimiento de tecnologías de diagnóstico por imágenes.

En suma, este trabajo no solo aporta una comprensión técnica sobre la sostenibilidad de la TC y la RMN, sino que también invita a la reflexión ética y profesional del tecnólogo en imágenes diagnósticas frente a los desafíos actuales del sistema de salud. Su propósito es contribuir a la formación de profesionales capaces de evaluar tecnologías desde una mirada integral, fundamentada en la calidad, la eficiencia y el uso responsable de los recursos en el contexto de la región Caribe colombiana y en coherencia con los principios institucionales de la UNAD.

Planteamiento del Problema

La elección de tecnologías de adquisición de imágenes diagnósticas constituye uno de los mayores desafíos para las instituciones de salud en Colombia. No se trata únicamente de decidir qué equipo comprar, sino de responder a interrogantes más profundos: ¿cómo elegir la tecnología ideal para cada contexto hospitalario?, ¿en qué criterios deben basarse las decisiones de inversión tecnológica?, y ¿cómo equilibrar el beneficio clínico con la sostenibilidad ambiental y económica?

En la práctica, este dilema se expresa en la tensión entre modalidades de bajo costo y bajo consumo energético, como la ecografía; accesible, portátil, libre de radiación ionizante y con un gasto energético mínimo; y tecnologías de alta complejidad como la Tomografía Computarizada (TC) y la Resonancia Magnética (RMN). Estas últimas, aunque son insustituibles en el diagnóstico avanzado, implican elevados consumos energéticos, costos operativos significativos y una infraestructura técnica especializada (Lojo-Lendoiro et al., 2024; Hao, 2022).

La evidencia reciente señala que los equipos de TC y RMN requieren sistemas de refrigeración permanente y deben permanecer encendidos incluso durante los periodos de inactividad, lo que incrementa la huella de carbono hospitalaria (Merkle et al., 2023). Este fenómeno, sumado a la repetición de estudios por fallas técnicas o mala calidad de imagen, multiplica el impacto energético y ambiental del servicio radiológico.

En la región Caribe colombiana, este problema se intensifica por múltiples factores estructurales. Según XM Administradores del mercado eléctrico. (2020), el precio del kilovatio hora en otras zonas subió, en promedio, por encima un 30 % y en la región Caribe 40 %, muy por encima del resto del país, debido a pérdidas técnicas y deterioro de la infraestructura

eléctrica. A su vez, los hospitales de segundo y tercer nivel presentan deficiencias en sus redes de energía, ausencia de plantas de respaldo eficientes y sobrecarga en los circuitos eléctricos (Escobar, 2023).

A ello se suman limitaciones financieras derivadas de las deudas acumuladas entre EPS e IPS, las desigualdades regionales en el acceso a equipos de alta complejidad, la obsolescencia tecnológica, más del 50 % de los equipos biomédicos en Colombia superan los 10 años de uso (Gil Gómez, 2021), y el déficit de talento humano especializado en mantenimiento, gestión energética y radioprotección.

En este contexto, la sostenibilidad hospitalaria no puede concebirse únicamente desde la perspectiva económica, sino como un equilibrio entre la calidad diagnóstica, la eficiencia energética y la responsabilidad ambiental. El reto para las instituciones del Caribe colombiano consiste en incorporar criterios de sostenibilidad en la evaluación y adquisición de tecnologías médicas, alineando el desarrollo clínico con la reducción de la huella ecológica del sector salud.

De esta manera, surge la pregunta de investigación que orienta el estudio:

¿Cómo realizar una evaluación comparativa entre tecnologías de adquisición de imágenes como la TC y la RMN en Colombia, especialmente en la región Caribe, que permita equilibrar el beneficio clínico, la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental, económica y social?

Justificación

La elección de tecnologías de imágenes diagnósticas en Colombia no puede limitarse a criterios de disponibilidad o de costo inmediato, sino que requiere un análisis integral que contemple la sostenibilidad ambiental, la eficiencia energética, la viabilidad financiera y la equidad en el acceso. Este enfoque es especialmente relevante en el contexto hospitalario de la región Caribe, donde las instituciones enfrentan limitaciones críticas como altos costos energéticos, deficiencias en infraestructura, desigualdades regionales, obsolescencia tecnológica y vacíos regulatorios. Dichas condiciones inciden directamente en la calidad de la atención y en la seguridad de los pacientes.

La pertinencia de esta investigación se fundamenta en que los hospitales constituyen uno de los sectores de mayor consumo energético dentro del sistema sanitario, lo que incrementa su huella ambiental y los costos operativos. Según IYCSA (2024), “los hospitales, en particular, consumen grandes cantidades de energía para mantener sus operaciones, lo que puede tener un impacto significativo en el medio ambiente y en los costos operativos” (párr. 1). Esta situación se agrava en entornos donde los precios de la energía son elevados y la infraestructura eléctrica insuficiente, como ocurre en la región Caribe de Colombia.

Desde una perspectiva económica, la optimización del consumo energético representa una oportunidad sustancial de ahorro para las instituciones médicas. Gollini-Mihalopoulos et al. (2023) demostraron que la adopción de medidas de eficiencia energética en edificaciones hospitalarias puede reducir el consumo hasta en un 38,81 %, lo cual se traduce en beneficios financieros y operativos significativos. Esta reducción adquiere especial relevancia en el contexto caribeño, donde las tarifas eléctricas son considerablemente más altas que en otras regiones del país (Corficolombiana, 2023).

La necesidad de investigar este problema se justifica desde múltiples dimensiones. En primer lugar, desde la perspectiva social y de salud pública, garantizar un acceso equitativo y sostenible a tecnologías diagnósticas es fundamental para reducir las brechas territoriales y mejorar los desenlaces clínicos, especialmente en poblaciones vulnerables.

En segundo lugar, desde la perspectiva ambiental, la evidencia científica (Lojo-Lendoiro et al., 2024; Hao, 2022; Merkle et al., 2023) indica que el consumo energético de equipos como la Tomografía Computarizada (TC) y la Resonancia Magnética (RMN) contribuye significativamente a las emisiones de carbono del sector sanitario. Esto exige la implementación de estrategias de mitigación y de transición hacia modelos de “radiología verde” alineados con los compromisos globales de sostenibilidad.

En tercer lugar, desde la perspectiva económica y de gestión, los altos costos energéticos en la región Caribe, junto con las deudas acumuladas del sistema de salud, limitan la inversión en modernización tecnológica y mantenimiento de equipos. En consecuencia, se hace urgente diseñar modelos de evaluación que permitan optimizar los recursos disponibles y garantizar la sostenibilidad institucional.

Finalmente, desde la dimensión académica y científica, este estudio cobra relevancia porque aporta metodologías comparativas que integran criterios clínicos, energéticos y ambientales, contribuyendo a la generación de conocimiento aplicable tanto en la gestión hospitalaria como en la formulación de políticas públicas.

En suma, abordar este problema permitirá proponer lineamientos para una gestión tecnológica sostenible en imágenes médicas, orientada a equilibrar el beneficio diagnóstico con la eficiencia energética, la reducción de la huella de carbono, la sostenibilidad financiera de las instituciones y la equidad en el acceso a servicios de salud especializados. De no realizarse este

análisis, el país corre el riesgo de perpetuar modelos de adquisición tecnológica insostenibles que amplían las desigualdades regionales, incrementan los costos del sistema y profundizan los impactos ambientales.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el balance entre el beneficio diagnóstico y la eficiencia energética de las tecnologías de adquisición de imágenes en hospitales de la región Caribe colombiana, bajo criterios de sostenibilidad y seguridad radiológica.

Objetivos Específicos

Analizar los criterios técnicos, clínicos y normativos que guían la selección y uso de tecnologías de imágenes diagnósticas en instituciones hospitalarias, considerando los principios de justificación clínica y optimización técnica (ALARA).

Evaluar el desempeño energético y operativo de la TC y la RMN a partir de la revisión de literatura científica, normativa y técnica reciente, identificando estrategias de eficiencia aplicables al contexto hospitalario colombiano.

Comparar los costos operativos, de mantenimiento y renovación tecnológica entre TC y RMN, considerando variables económicas y de sostenibilidad institucional.

Identificar las brechas existentes en la región Caribe en materia de infraestructura, talento humano y digitalización, que limitan la adopción de tecnologías sostenibles en imágenes médicas.

Proponer lineamientos estratégicos orientados a la optimización energética, la sostenibilidad ambiental y la equidad tecnológica en los servicios de radiología diagnóstica en Colombia.

Marco Teórico

Fundamentos Conceptuales de las Tecnologías de Imágenes Diagnósticas

Las tecnologías de adquisición de imágenes diagnósticas constituyen uno de los pilares fundamentales de la medicina moderna. Desde el descubrimiento de los rayos X por Wilhelm Conrad Röntgen en 1895, la imagen médica ha evolucionado hacia modalidades que permiten observar con precisión estructuras anatómicas, procesos fisiológicos y alteraciones patológicas, contribuyendo a diagnósticos más tempranos, tratamientos más efectivos y seguimientos clínicos más seguros (Thiel et al., 2024).

Entre las modalidades más avanzadas se destacan la Tomografía Computarizada (TC) y la Resonancia Magnética (RMN), tecnologías que representan hitos en la evolución diagnóstica, pero que también implican altos requerimientos energéticos y desafíos de sostenibilidad.

Evolución Tecnológica y Principio de Funcionamiento

Tomografía Computarizada (TC)

La TC fue desarrollada por Hounsfield y Cormack en 1971 y supuso una revolución diagnóstica al generar cortes transversales del cuerpo mediante rayos X procesados por computadora. Su principal fortaleza radica en la rapidez, la precisión anatómica y la capacidad de reconstrucción tridimensional, características que la convierten en una herramienta indispensable en emergencias médicas, traumatología y oncología (Lojo-Lendoiro et al., 2024).

No obstante, el principio físico que la sustenta (el uso de radiación ionizante) la hace demandante en energía y con implicaciones de seguridad radiológica, especialmente en instituciones con protocolos de mantenimiento ineficientes.

Resonancia Magnética (RMN)

Por su parte, la RMN, introducida clínicamente en 1983, se basa en la alineación de los protones del cuerpo bajo un campo magnético intenso, generando imágenes de alta resolución sin radiación ionizante (Lauterbur & Mansfield, citados en Lojo-Lendoiro et al., 2024). Su capacidad para diferenciar tejidos blandos, analizar la función cerebral y estudiar patologías musculoesqueléticas la convierte en una de las tecnologías más avanzadas de la medicina moderna.

Sin embargo, la necesidad de mantener imanes superconductores refrigerados con helio líquido y de operar con campos eléctricos estables genera un consumo energético elevado incluso en estado de reposo, lo que repercute en la huella de carbono institucional (Merkle et al., 2023).

Dimensiones de la Sostenibilidad Tecnológica en Radiología

De acuerdo con Perdomo (2021), la sostenibilidad tecnológica integra tres dimensiones fundamentales: ambiental, económica y social. Estas dimensiones interactúan constantemente, y su análisis conjunto permite determinar la viabilidad integral de una tecnología médica.

Dimensión Ambiental

La dimensión ambiental considera el ciclo de vida de los equipos, desde su fabricación hasta su disposición final. En radiología, los equipos de TC y RMN consumen grandes cantidades de energía y generan residuos electrónicos y químicos que, sin una gestión adecuada, contribuyen al deterioro ambiental.

Thiel et al. (2024) señalan que entre el 40 % y el 91 % de la energía total consumida por estos equipos se utiliza durante los periodos de inactividad. Además, la eliminación inadecuada

de medios de contraste como el gadolinio o el yodo, sin tratamiento previo, representa una amenaza para los ecosistemas acuáticos (Superintendencia de Servicios Públicos, 2024).

Por ello, la Organización Panamericana de la Salud (2025) impulsa la adopción de políticas de “radiología verde”, orientadas a reducir el consumo energético, promover el reciclaje tecnológico y minimizar la huella ecológica hospitalaria.

Dimensión Económica

El aspecto económico aborda los costos de adquisición, mantenimiento, calibración, refrigeración y consumo eléctrico de los equipos. En la región Caribe, donde las tarifas de energía eléctrica son hasta un 40 % más altas que en el resto del país (XM Administradores del mercado eléctrico, 2020), estos costos se traducen en una presión financiera considerable para las instituciones.

Gollini-Mihalopoulos et al. (2023) demuestran que las medidas de eficiencia energética pueden reducir el consumo hospitalario hasta en un 38,81 %, generando ahorros que pueden destinarse a la modernización tecnológica y a la capacitación del personal especializado.

Dimensión Social

La sostenibilidad social se relaciona con la equidad en el acceso a servicios diagnósticos de calidad. La concentración de equipos de alta complejidad en las principales capitales del país limita el acceso oportuno para comunidades rurales o de bajos recursos, acentuando las desigualdades territoriales (Acosta, 2024).

Una gestión tecnológica sostenible no solo optimiza recursos, sino que democratiza la atención médica, promoviendo justicia sanitaria y fortaleciendo el derecho a la salud.

Retos de Sostenibilidad en la Región Caribe Colombiana

La región Caribe enfrenta un escenario energético y tecnológico particularmente desafiante. Las altas tarifas eléctricas, la infraestructura hospitalaria deficiente y la antigüedad de los equipos dificultan la implementación de prácticas sostenibles (Escobar, 2023; Gil Gómez, 2021).

Asimismo, las deudas del sistema de salud y la falta de inversión en innovación limitan la adopción de tecnologías modernas con eficiencia energética. Este contexto exige la formulación de estrategias adaptadas a las condiciones locales, donde la sostenibilidad se conciba no como un lujo, sino como una necesidad para la viabilidad institucional.

Evaluación Comparativa de Tecnologías Radiológicas

La evaluación comparativa es un enfoque metodológico que permite analizar el desempeño de las tecnologías considerando indicadores clínicos, energéticos, ambientales y económicos. Según la Organización Panamericana de la Salud (2025), una evaluación integral debe contemplar no solo la efectividad diagnóstica, sino también el impacto ambiental y los costos de operación a largo plazo.

En este sentido, la comparación entre las tecnologías de imágenes diagnósticas debe ir más allá de su rendimiento técnico: debe analizar su contribución a la sostenibilidad hospitalaria, su eficiencia energética, su adaptabilidad al contexto colombiano y su coherencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, especialmente el ODS 3 (Salud y bienestar) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables).

Hacia una Gestión Tecnológica Sostenible en Radiología

El desarrollo de un modelo de gestión tecnológica sostenible implica la integración de políticas institucionales, capacitación técnica y planificación estratégica. Las instituciones

hospitalarias deben establecer indicadores de eficiencia energética, planes de mantenimiento preventivo y protocolos de manejo de residuos que garanticen la continuidad operativa sin comprometer el entorno ambiental.

De esta manera, la evaluación comparativa entre las tecnologías de adquisición de imágenes no solo aportará datos sobre eficiencia diagnóstica o consumo eléctrico, sino que constituirá una herramienta de gestión para la toma de decisiones sostenibles en el sector salud colombiano, especialmente en la región Caribe.

Marco Metodológico

Este estudio se enmarca bajo un enfoque cualitativo, comparativo, orientado a comprender las diferencias y similitudes entre las tecnologías de adquisición de imágenes como la TC y RMN desde una perspectiva multidimensional: energética, ambiental, económica y social. Este enfoque permite analizar no solo los datos técnicos, sino también los contextos institucionales, los criterios de sostenibilidad aplicados y las percepciones del personal involucrado en la gestión tecnológica hospitalaria.

Tipo y Diseño de Investigación

El presente estudio adopta un diseño descriptivo-comparativo con un enfoque transversal.

El carácter descriptivo se fundamenta en la caracterización detallada de las tecnologías de adquisición de imágenes. Esto incluye la identificación y el análisis de sus atributos energéticos, operativos y de sostenibilidad en las instituciones de salud. A su vez, es comparativo dado que su propósito es analizar sistemáticamente las diferencias y similitudes encontradas entre las distintas modalidades tecnológicas evaluadas. Finalmente, el diseño es de corte transversal, ya que la recolección y el análisis de la información disponible y la revisión documental se realizarán en un momento específico del tiempo.

Población y Muestra

Se obtendrá del análisis del contenido de la literatura de autores consultados sobre equipos de adquisición de imagen TC y RMN en funcionamiento en la región Caribe colombiana.

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información

Revisión Documental

Se realizará una revisión de literatura científica, informes institucionales, bases de datos y normativas nacionales e internacionales relacionadas con eficiencia energética, sostenibilidad hospitalaria y gestión tecnológica. Las fuentes incluirán artículos indexados, informes técnicos (OMS, OPS, UNEP) y documentos institucionales (XM, MinSalud, Superservicios, etc.).

Análisis Comparativo

Se diseñará una matriz comparativa para analizar parámetros clave como:

Consumo energético (kWh por examen y por hora).

Tiempo promedio de uso y reposo de los equipos.

Costos de mantenimiento y operación.

Vida útil estimada.

Impacto ambiental y generación de residuos.

Este instrumento permitirá identificar la tecnología que presenta mejor equilibrio entre eficiencia energética, beneficio diagnóstico y sostenibilidad económica.

Procedimiento

Recolección y sistematización de información documental.

Construcción de la matriz comparativa entre las tecnologías de imágenes según variables de sostenibilidad.

Análisis cualitativo y cuantitativo descriptivo de los datos obtenidos.

Interpretación de resultados y elaboración de conclusiones relacionadas con eficiencia, sostenibilidad y gestión tecnológica.

Consideraciones Éticas

La investigación se fundamenta en los principios éticos de respeto, confidencialidad, honestidad científica y responsabilidad social. Se respetarán los derechos de autor y las políticas de uso de información de las fuentes consultadas. En caso de incluir información institucional, se garantizará el anonimato y la protección de datos sensibles.

De acuerdo con la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud de Colombia, este estudio se clasifica como sin riesgo, ya que no involucra intervención directa con seres humanos.

Limitaciones del Estudio

Entre las principales limitaciones se reconoce la disponibilidad desigual de datos energéticos en las instituciones hospitalarias, así como la falta de estandarización en los registros técnicos de consumo y mantenimiento. Sin embargo, estas limitaciones se compensan mediante la triangulación de fuentes documentales y la consulta de informes oficiales y literatura científica actualizada.

Resultados Esperados

Se espera obtener un panorama comparativo claro del consumo energético y del impacto ambiental de los equipos utilizados en la adquisición de imágenes diagnósticas, así como la identificación de oportunidades para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los servicios de radiología.

Los hallazgos servirán como base para proponer lineamientos estratégicos de gestión tecnológica sostenible, enfocados en la optimización energética, la reducción de la huella de carbono y la equidad en el acceso a servicios diagnósticos de alta complejidad.

Resultados

El análisis comparativo de las tecnologías de adquisición de imágenes permitió identificar patrones consistentes de desempeño clínico, sostenibilidad operativa y eficiencia energética, derivados exclusivamente de la interpretación sistemática de la literatura científica. En este sentido, los resultados presentados no constituyen apreciaciones personales, sino síntesis fundamentadas en los datos y conclusiones reportados por los autores consultados.

En primer lugar, la evaluación de los criterios clínicos y técnicos evidenció diferencias claras entre modalidades. Las tecnologías de mayor complejidad, como la Tomografía Computarizada (TC), la Resonancia Magnética (RMN) y la Radiología Intervencionista (RI), mantienen una prioridad clínica elevada debido a su capacidad diagnóstica avanzada, tal como se expone en los trabajos de Escobar et al. (2023) y Arias et al. (2024). No obstante, estas modalidades también presentan los mayores requerimientos infraestructurales y operativos, lo cual influye en su sostenibilidad en instituciones con limitaciones en infraestructura o disponibilidad de personal especializado, una situación señalada igualmente por Arias et al. (2024). En contraste, la ecografía y la radiografía convencional destacan por su menor complejidad técnica, mayor accesibilidad y estabilidad operativa, coincidiendo con lo señalado por Woolen et al. (2023).

En cuanto a la sostenibilidad ambiental, el análisis energético basado en la literatura muestra diferencias marcadas entre tecnologías. La RMN se caracteriza por un consumo energético significativamente elevado debido al funcionamiento continuo de sus sistemas de enfriamiento y gestión criogénica, comportamiento ampliamente documentado por Woolen et al. (2023). La TC, aunque con menor demanda que la RMN, también requiere niveles importantes de energía para garantizar la operación estable de sus componentes electrónicos y sistemas de

control térmico. En contraste, la ecografía exhibe el perfil más eficiente energéticamente, con un consumo reducido tanto en operación como en periodos de inactividad. La radiografía convencional y la mamografía mantienen valores intermedios, donde el consumo depende de la frecuencia de uso, el tipo de detector y la estabilidad de la red eléctrica.

Respecto a la dimensión económica, los puntajes asignados en este estudio se basan exclusivamente en la evidencia documentada por los autores revisados y no provienen de una evaluación económica directa propia. La literatura coincide en que las modalidades de mayor complejidad -incluyendo TC, RMN y RI - implican costos operativos y de mantenimiento más altos debido a sus necesidades de soporte técnico, calibración especializada y personal con mayor nivel de formación (Arias et al., 2024). Por el contrario, la radiografía convencional y la ecografía son descritos consistentemente como tecnologías con menores costos asociados y un uso más sostenible en contextos con restricciones presupuestales (Woolen et al., 2023).

Este comportamiento se ve reflejado en la matriz comparativa, cuyos puntajes se derivan exclusivamente de la literatura revisada.

Desde la perspectiva social y organizacional, los resultados muestran que las tecnologías de mayor sofisticación implican mayores requisitos en formación del talento humano, cumplimiento regulatorio, protocolos de seguridad y adecuación de infraestructura. Estas exigencias representan un desafío especialmente significativo para instituciones ubicadas en la Región Caribe, donde la estabilidad eléctrica, la disponibilidad de personal especializado y las brechas de equipamiento constituyen obstáculos estructurales. Estos hallazgos guardan coherencia con las consideraciones planteadas por Arias et al. (2024) sobre el efecto de las capacidades institucionales en la sostenibilidad tecnológica.

La integración de estos elementos en la matriz multicriterio (escala 1–5) permite visualizar de forma cuantitativa las diferencias entre modalidades. Las tecnologías de alta complejidad alcanzan las puntuaciones más elevadas en beneficio clínico, pero presentan puntajes más bajos en sostenibilidad económica y ambiental. En contraste, modalidades como la ecografía y la radiografía convencional exhiben puntuaciones más equilibradas, lo que evidencia su pertinencia en contextos donde se requiere optimizar la relación entre costo, consumo energético y beneficio clínico.

Finalmente, los hallazgos de este estudio convergen con las tendencias actuales de optimización energética en entornos hospitalarios, mostrando que la sostenibilidad de las tecnologías de imagen depende tanto de sus características técnicas como de la infraestructura energética que las soporta. El trabajo de Barrozo et al. (2020) presenta un análisis detallado del impacto energético y las emisiones asociadas a equipos de alto consumo como la Resonancia Magnética (RMN) y la Tomografía Computarizada (TC), y demuestra la viabilidad técnica y económica de integrar un sistema híbrido solar –eólico conectado a la red. Este enfoque permite reducir el consumo eléctrico convencional, disminuir la huella de carbono y garantizar continuidad de operación, aspectos críticos para regiones con variabilidad en el suministro como la Región Caribe. La pertinencia de este modelo energético refuerza los resultados de la presente investigación, pues muestra que la evaluación de tecnologías de adquisición de imágenes bajo criterios de sostenibilidad puede y debe ampliarse hacia soluciones energéticas que fortalezcan la eficiencia global del servicio. En este sentido, la integración de energías renovables no solo complementa el análisis ambiental y económico, sino que ofrece una alternativa viable para instituciones con limitaciones de infraestructura. De esta manera, los hallazgos permiten vislumbrar una propuesta estratégica: avanzar hacia un modelo integral de gestión tecnológica

que combine la selección informada de equipos con la adopción progresiva de infraestructura energética sostenible, garantizando un equilibrio real entre beneficio clínico, eficiencia operativa y responsabilidad ambiental en el contexto hospitalario colombiano.

Tabla 1*Evaluación Comparativa y Sostenible de Diagnóstico por Imágenes*

Tecnología	Viabilidad Técnica	Viabilidad Legal	Viabilidad Administrativa	Viabilidad Económica	Sostenibilidad Ambiental	Necesidad Clínica	Ponderación	Observaciones
Ecografía	5	5	5	5	5	4	29/30	Bajo consumo energético, mínima infraestructura requerida, bajo costo de adquisición y operación, gran aplicabilidad clínica, mantenimiento sencillo.
Rayos X	4	3	4	4	4	4	23/30	Consumo energético moderado, tecnología estable, requisitos legales por radiación ionizante, regulaciones de RETIE/RETILAP.
Mamografía	4	3	3	3	3	5	21/30	Fundamental para tamización en mujeres requiere mantenimiento especializado pero accesible.
Tomografía	3	3	3	2	2	5	18/30	Alta complejidad técnica, consumo

Computarizada (TC)									energético significativo, alto costo de instalación y operación, también requisitos legales por radiación ionizante, regulaciones de RETIE/RETILAP.
Resonancia Magnética (RMN)	2	4	2	1	1	5	15/30	Consumo energético alto, requiere planificación financiera y logística.	
Radiología Intervencionista (RI)	3	3	3	2	2	5	18/30	Consumo energético elevado, requiere personal especializado y equipos complejos, normativas específicas para procedimientos invasivos, planificación de horarios y recursos técnicos	

Nota. Esta tabla representa la matriz de evaluación de sostenibilidad tecnológica propuesta en el apartado “recolección de los datos”

de la Fase 3. Elaborada por Aury González (2025).

Tabla 2*Modelo Comparativo de Consumo Energético Anual por Modalidad de Imagen*

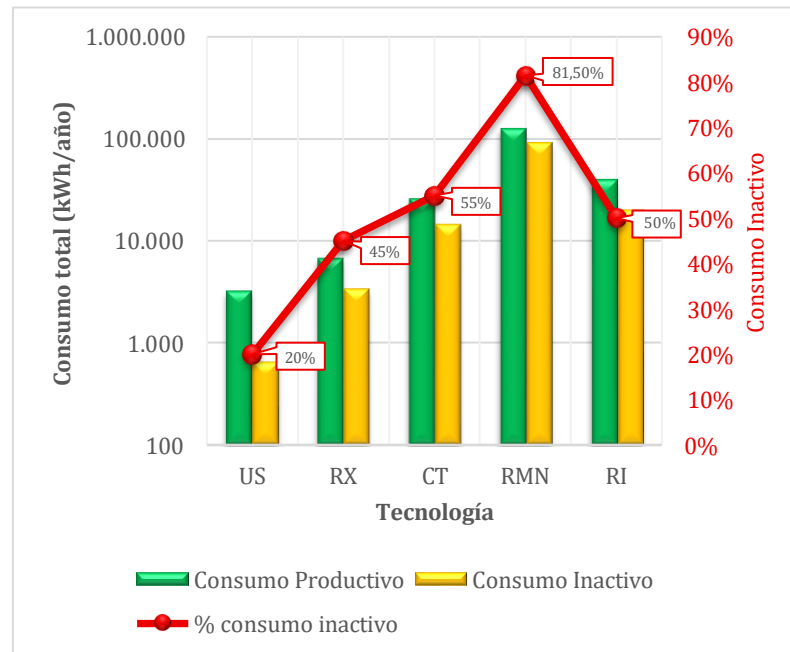
Tecnología	Consumo productivo (kWh)	Consumo en periodos inactivos (kWh)	Consumo inactivo %	Análisis técnico
Ecografía	3.249	650	20%	Modalidad de bajo consumo. Predominantemente productiva, sin necesidad de calentamiento de tubo ni sistemas intensivos de enfriamiento. La mayor parte del gasto ocurre durante el uso clínico en tiempo real.
Rayos X	6.732	3.366 (50% del total)	40% – 50% aprox.	Consumo moderado. Aunque la energía se utiliza principalmente en operación productiva, existe una proporción relevante de energía no productiva asociada al calentamiento de tubos, electrónica interna y permanencia en modo encendido para disponibilidad inmediata.
Tomografía Computarizada (TC)	26.226 (1.2 kWh x examen)	14.289	52 – 58% aprox.	Alta demanda energética. Requiere mantener sistemas de enfriamiento, electrónica interna, consola y Gantry activos por tiempos prolongados, lo que genera un elevado consumo en modo idle.
Resonancia Magnética (RMN)	82.700 – 171.100	91.530	72 – 91%	Consumo muy alto. Gran parte de la energía se usa en modos no productivos por sistemas de enfriamiento y helio; potencia instantánea elevada durante el scan. Gran oportunidad de ahorro usando modo bajo consumo o nuevas modalidades sin helio.

Radiología Intervencionista (RI)	35.000 – 45.000	17.500 – 22.500	50% aprox.	Modalidad de alto consumo. Parte del gasto energético corresponde a modo idle por preparación y standby de equipos. Valores estimativos basados en literatura y volumen típico de procedimientos.
---	-----------------	-----------------	------------	---

Nota. Esta tabla muestra valores estimados en el consumo eléctrico y forma parte del análisis estadístico descriptivo propuesto en la Fase 3. Elaborada por Aury González (2025).

Figura 1

Comparativo de Consumo Productivo vs Inactivo con Porcentaje de Eficiencia



Nota. La gráfica muestra un comparativo entre variables cuantitativas para identificar tendencias, frecuencias y promedios relacionados con el consumo energético entre tecnologías. Elaborada por Aury González (2025)

Conclusiones

El proceso investigativo permitió comprender que la sostenibilidad tecnológica en radiología debe analizarse desde una perspectiva integral, considerando dimensiones ambientales, energéticas, económicas y organizacionales. Este análisis evidenció que la evaluación de las tecnologías de imágenes no puede evaluarse únicamente por su precisión diagnóstica, sino por su impacto en el sistema de salud y su aporte al uso responsable de los recursos.

El desarrollo del modelo comparativo y el uso de enfoques multicriterio fortalecieron la capacidad para integrar variables y analizar tecnologías de forma objetiva. Esta experiencia reforzó la importancia de la evaluación basada en evidencia como herramienta para mejorar la toma de decisiones institucionales más eficientes y sostenibles.

La revisión de literatura y el análisis de equipos mostraron que la obsolescencia tecnológica, la falta de mantenimiento y la limitada capacitación del personal influyen directamente en la eficiencia operativa. Esto permitió reconocer la gestión tecnológica como un proceso continuo que requiere planeación estratégica y fortalecimiento de capacidades humanas.

El estudio facilitó la comprensión de que las alternativas energéticas sostenibles, como los sistemas solares o híbridos, representan estrategias viables para reducir el consumo eléctrico de equipos de alto impacto. Este aprendizaje integró conocimientos técnicos con consideraciones ambientales y de eficiencia institucional.

Finalmente, la investigación contribuyó a desarrollar una visión ética y responsable sobre el papel de la radiología en la sostenibilidad hospitalaria. Se evidenció que una radiología sostenible depende de la articulación entre liderazgo institucional, innovación tecnológica y

formación profesional, elementos esenciales para promover prácticas que favorezcan tanto la salud humana como la protección del entorno.

Referencias

- Acosta, J. (2024, 27 de abril). *Transformación tecnológica en la salud, desafío urgente para los directivos regionales*. Portafolio. <https://www.portafolio.co/tecnologia/transformacion-tecnologica-en-la-salud-desafio-urgente-para-los-directivos-regionales-603694>
- Arias González, M., Iglesias Arias, A., Iglesias Castañón, A., Machado Pereira, D., Escobar Villalba, A., Nieto Baltar, B., Mañas Uxó, J., Herreros Villaraviz, M., & Nieto Parga, Á. (2024). Repensar procesos radiológicos en aras de la sostenibilidad. De qué hablamos y cómo lo hacemos. *Seram*, 1(1). <https://piper.espacio-seram.com/index.php/seram/article/view/9948/8414>
- Barrozo Budes, F. A., Valencia Ochoa, G., Obregón, L. G., Arango-Manrique, A., & Núñez Álvarez, J. R. (2020). *Energy, economic, and environmental evaluation of a proposed solar-wind power on-grid system using HOMER Pro®: A case study in Colombia*. *Energies*, 13(7), 1662. <https://doi.org/10.3390/en13071662>
- Corficolombiana. (2023). *Informe de Gestión y Sostenibilidad*. <https://www.corfi.com/documents/20123/1458853/informe-de-gestion-y-sostenibilidad-corfi-2023.pdf>
- Escobar, J. (2023, 27 de agosto). *Alerta en el sector salud por hospitales que no manejan bien el suministro de electricidad y podrían sufrir graves incendios*. Infobae. <https://www.infobae.com/colombia/2023/08/28/alerta-en-el-sector-salud-por-hospitales-que-no-manejan-bien-el-suministro-de-electricidad-y-podrian-sufrir-graves-incendios/>
- Gil Gómez, L. D. (2021). *Estandarización del proceso de obsolescencia de la tecnología biomédica utilizada en la Clínica CES*. Biblioteca Digital UDEA.

<https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/00ab66ee-b82d-485c-90a4-0f50b6f8e598/content>

Gollini-Mihalopoulos, C., Berbey-Alvarez, A., & Henríquez, F. (2023). Análisis energético del edificio N°1 de la Universidad Tecnológica de Panamá: simulación y optimización del consumo de energía eléctrica a través de soluciones de eficiencia energética. *Tecnología en marcha*, 36(1). https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822023000100140

Hao, Y. (2022). Indicadores económicos, el consumo de energía renovable y desarrollo humano sobre el cambio climático. *Frontiers in Energy Research*, 10, Artículo 841497. <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2022.841497/full>

Hospitecnia. (2018). La economía circular en el sector de la salud. *Revista de Arquitectura, Ingeniería, Gestión hospitalaria y sanitaria*. <https://hospitecnia.com/sites/default/files/158828545351588285453.pdf>

IYCSA. (2024, febrero 21). *Eficiencia energética en hospitales: reduciendo el impacto ambiental*. Iyca.es. <https://iyca.es/eficiencia-energetica-en-hospitales/>

Lojo-Lendoiro, S., Rovira, À., & Morales Santos, Á. (2024). Green radiology: cómo desarrollar una radiología sostenible. *Radiología*, 66(3), 248–259. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0033833823001443?via%3Dihub>

McAlister, S., McGain, F., Petersen, M., Story, D., Charlesworth, K., Ison, G., & Barratt, A. (2022). The carbon footprint of hospital diagnostic imaging in Australia. *Lancet Regional Health – Western Pacific*, 24 (100459). [https://www.thelancet.com/journals/lanwpc/article/PIIS2666-6065\(22\)00074-8/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanwpc/article/PIIS2666-6065(22)00074-8/fulltext)

- McKee, H., Brown, M. J., Kim, H. H., Doo, F. X., Panet, H., Rockall, A. G., Omary, R.A & Hanneman, K. Planetary health and radiology: why we should care and what we can do. *Radiology*, 311 (2). <https://pubs.rsna.org/doi/full/10.1148/radiol.240219>
- Merkle, E. M., Bamberg, F., & Vosshenrich, J. (2023). The impact of modern imaging techniques on carbon footprints: relevance and outlook. *European urology focus*, 9(6), 891-893. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405456923002080>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2025, 15 de julio). *La deuda acumulada de las EPS que asciende a \$32 billones de pesos, evidencia el colapso del modelo actual de intermediación y la necesidad inaplazable de reformar de manera estructural el sistema de salud*. Minsalud. <https://www.minsalud.gov.co/CC/Noticias/2025/Paginas/deuda-acumulada-de-EPS-asciende-a-32-billones-de-pesos.aspx>
- Organización Panamericana de la Salud. (2025). *Evaluación de tecnologías de salud*. <https://www.paho.org/es/temas/evaluacion-tecnologias-salud>
- Perdomo, J. (2021). *La perspectiva ambiental en las evaluaciones económicas de tecnologías sanitarias*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/362834338_La_perspectiva_ambiental_en_las_evaluaciones_economicas_de_tecnologias_sanitarias
- Redón, S., Londoño, L., Berbis, M.A., Ferrer, M., Aguilar, R. y Garcés, E. (2024, 22-25 de mayo). *Cómo reducir la huella de CO2 en un hospital comarcal* [Ponencia]. 37 Congreso de Nacional de la SERAM, Barcelona, España. <https://www.piper.espacio-seram.com/index.php/seram/article/view/9815/8281>

- Roletto, A., Savio, A., Masperi, A., Bonfitto, G. R., Pala, F., Migliorisi, C., & Zanoni, S. (2025). *Energy usage assessment and energy savings estimation in a radiology department in Italy. Energies, 18*(8), 1936. <https://doi.org/10.3390/en18081936>
- Roletto, A., Zanardo, M., Bonfitto, G. R., Catania, D., Sardanelli, F., & Zanoni, S. (2024). The environmental impact of energy consumption and carbon emissions in radiology departments: a systematic review. *European Radiology Experimental, 8*, Article 35. <https://eurradiolexp.springeropen.com/articles/10.1186/s41747-024-00424-6>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2024). *Informe nacional de disposición final de residuos sólidos 2023*. Superservicios. <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Nacional-de-Disposicion-Final-de-Residuos-Solidos-2023.pdf>
- Thiel, C. L., Vigil-Garcia, M., Nande, S., Meijer, C., Gehrels, J., Struk, O., Thornander, S., Pullella, D., Omary, R. A., Carver, D. E. & Scheel, J.R. (2024). Environmental Life Cycle Assessment of a U.S. Hospital-based Radiology Practice. *Radiology, 313* (2). <https://pubs.rsna.org/doi/abs/10.1148/radiol.240398>
- Velásquez Ferreira, J. E., & Arias Patiño, S. (2025). *Estudio de prefactibilidad para la adquisición de un tomógrafo para el Hospital Departamental San Rafael ESE de Zarzal (Valle del Cauca)* [Trabajo de grado, Universidad EAFIT]. Repositorio Institucional EAFIT. <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/f4f8b92d-4b0b-41e2-991b-e5b63afe81b4/content>
- Woolen, S. A., Becker, A. E., Martin, A. J., Knoerl, R., Lam, V., Folsom, J., Eusemann, C., Hess, C. P., & Deshpande, V. (2023). Ecodesign and operational strategies to reduce the

carbon footprint of MRI for energy cost savings. *Radiology*, 307(4), e230441.

<https://doi.org/10.1148/radiol.230441>

XM Administradores del mercado eléctrico (2020, 6 de febrero). *En Colombia, factor de emisión de CO2 por generación eléctrica del Sistema Interconectado: 164.38 gramos de CO2 por kilovatio hora*. XM. <https://www.xm.com.co/noticias/en-colombia-factor-de-emision-de-co2-por-generacion-electrica-del-sistema-interconectado>