

**Eficiencia energética y reducción de huella de carbono en resonancia magnética:
Comparación entre sistemas convencionales y de enfriamiento sellado**

Diana Carolina Ramírez Guerrero

David Alexander Villazana Cubillos

Hugo Alberto Sánchez

Jeison Vladimir Turriago

Jordi Andrés Castañeda

Asesora

Edna Rocío Jamaica Guio

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias de la Salud ECISA

Tecnología en Radiología e Imágenes Diagnósticas

2026

Dedicatoria

Dedicamos este logro a nuestras familias, quienes han sido el pilar fundamental en este camino, brindándonos su apoyo incondicional, comprensión y motivación en cada etapa de nuestra formación.

A nuestros docentes, por compartir su conocimiento y guiarnos con compromiso, inspirándonos a ejercer con responsabilidad y ética profesional.

A todos aquellos que aportaron de una u otra forma y que, con su confianza, nos recuerdan el valor de nuestra labor y el impacto que tiene en la vida de las personas.

A nosotros: Diana Carolina Ramírez Guerrero, David Alexander Villazana Cubillos, Hugo Alberto Sánchez, Jeison Vladimir Turriago y Jordi Andrés Castañeda, por la disciplina, el esfuerzo y la perseverancia para superar cada desafío y alcanzar esta meta

Agradecimientos

Los autores queremos expresar nuestros agradecimientos:

Primero, a Dios por estar presente en nuestras vidas y darnos la resiliencia suficiente para asumir los desafíos diarios.

A nuestras familias, por acompañarnos con paciencia, amor y por ser el impulso que nos motivó a continuar.

Agradecemos nuestros tutores, especialmente a Edna Rocío Jamaica Guio, cuya dedicación, experiencia y compromiso nos guiaron en el desarrollo de nuestras competencias en la formación como tecnólogos en radiología e imágenes diagnósticas.

A la UNAD, por permitirnos hacer parte de la institución y brindarnos las herramientas para crecer como personas de bien y excelentes profesionales.

Finalmente, a nosotros mismos por el tiempo, sacrificio y esfuerzo dedicados al Diplomado; el trabajo en equipo fue crucial y nos permitió culminar con éxito.

Resumen

El presente estudio analiza en qué medida los resonadores magnéticos equipados con tecnología de enfriamiento sellado, contribuyen a la reducción de la huella de carbono en comparación con los sistemas convencionales de alto campo durante un ciclo de vida de 10 años. El objetivo general consiste en evaluar las diferencias de impacto ambiental entre ambas tecnologías, considerando consumo energético, pérdidas criogénicas, mantenimiento y emisiones asociadas al uso y manejo de helio. La selección final de fuentes permitió comparar indicadores energéticos, requerimientos criogénicos y perfiles de sostenibilidad. se aplicó una metodología de revisión de literatura, mediante búsqueda, cribado, evaluación de elegibilidad e inclusión de estudios científicos, reportes industriales y documentos técnicos publicados entre 2010 y 2026 en bases como Scopus, biblioteca virtual UNAD, Google Académico, Researchgate, PubMed y ScienceDirect. Los resultados muestran que los equipos de enfriamiento sellado reducen de manera significativa la huella de carbono, tanto por su menor consumo energético como por la eliminación casi total de emisiones indirectas asociadas a la extracción, transporte y recarga de helio líquido.

Palabras Clave: resonancia magnética, huella de carbono, eficiencia energética, helio, sostenibilidad

Abstract

This study analyzes the extent to which magnetic resonance imaging (MRI) systems equipped with sealed cooling technology contribute to reducing the carbon footprint compared to conventional high-field systems over a 10-year life cycle. The main objective is to evaluate the differences in environmental impact between both technologies, considering variables such as energy consumption, cryogenic losses, maintenance, and emissions associated with the use and handling of helium. The selected sources allowed for the comparison of energy indicators, cryogenic requirements, and sustainability profiles. A literature review methodology was applied, including search, screening, eligibility assessment, and inclusion of scientific studies, industrial reports, and technical documents published between 2010 and 2026 in databases such as Scopus, UNAD Virtual Library, Google Scholar, ResearchGate, PubMed, and ScienceDirect. The results show that sealed cooling systems significantly reduce the carbon footprint, both due to lower energy consumption and the near-total elimination of indirect emissions associated with the extraction, transportation, and refilling of liquid helium.

Keywords: magnetic resonance imaging, carbon footprint, energy efficiency, helium, sustainability

Tabla de Contenido

Introducción	10
Planteamiento del Problema.....	14
Justificación.....	18
Objetivos	20
Objetivo General	20
Objetivos Específicos	20
Marco Teórico.....	21
El Sector Salud y la Crisis Climática	21
Huella de Carbono en Radiología	22
<i>Alcances de Emisiones - Scopes 1, 2 y 3</i>	22
Green Radiology	23
Fundamento de la Resonancia Magnética de Alto Campo	25
<i>Sistemas de Superconductividad</i>	26
Ciclo del Helio	27
Consumo Energético en Reposo	27
Impacto Ambiental.....	28
Innovación Tecnológica: Sistemas de Enfriamiento Sellado en Resonancia Magnética	29
Funcionamiento de los Sistemas de Enfriamiento Sellado	30
<i>Circuito Cerrado de Helio</i>	30
<i>Refrigeración por Compresión y Recuperación Interna</i>	30

<i>Tecnología de Microenfriamiento</i>	30
<i>Eliminación del Tubo de Quench</i>	31
<i>Impacto Arquitectónico y HVAC</i>	31
Métricas de Sostenibilidad Operativa	32
<i>Consumo Energético – kWh por Estudio</i>	32
Economía Circular y Reducción del Impacto Ambiental en RM.....	32
Sostenibilidad en Salud y Responsabilidad Institucional.....	36
Gestión Energética y Estrategias de Optimización en Resonancia Magnética	38
<i>Indicadores de Eficiencia Energética en Servicios de Radiología</i>	40
Metodología	41
Criterios de Inclusión	42
Criterios de Exclusión	42
Fases de la Investigación.....	42
<i>Fase 1: Búsqueda y Recopilación De Datos</i>	42
<i>Fase 2. Sistematización y Análisis</i>	43
<i>Fase 3. Comparación y Síntesis</i>	43
Análisis de Resultados	45
Conclusiones	60
Referencias Bibliográficas.....	65

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Comparación de Tecnologías</i>	33
Tabla 2 <i>Comparación De Impacto ambiental y energético: RM convencional vs RM sellada</i>	38
Tabla 3 <i>Fases de la Metodología</i>	44
Tabla 4 <i>Comparación Técnica entre Sistemas de Resonancia Magnética</i>	46
Tabla 5 <i>Evaluación Ambiental y Operativa de Rm</i>	47
Tabla 6 <i>Análisis Ambiental Comparativo de Tecnologías de Resonancia Magnética</i>	49
Tabla 7 <i>Análisis Comparativo de Desempeño Ambiental de Rm</i>	52
Tabla 8 <i>Comparación de Eficiencia Energética y Huella de Carbono en RM</i>	56

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Árbol Del Problema</i>	14
Figura 2 <i>Resonancia Magnética</i>	26
Figura 3 <i>Enfriador de Resonancia Magnética</i>	29

Introducción

En la presente investigación literaria sobre la Eficiencia energética y reducción de la huella de carbono en resonancia magnética: comparación entre sistemas convencionales y de enfriamiento sellado, se analizaron las diferencias entre ambas tecnologías desde una perspectiva operativa, ambiental y de sostenibilidad. El aumento de estudios diagnósticos de resonancia magnética ha incrementado el consumo energético y el uso de recursos criogénicos, especialmente el helio, generando un impacto ambiental significativo dentro del sector salud.

La resonancia magnética es uno de los estudios más usados, sin embargo, su operación tiene un alto consumo energético, una alta dependencia del helio líquido y la generación de una enorme huella de carbono a lo largo de su ciclo de vida. Con el incremento sostenido en la instalación de equipos de alto campo, la sostenibilidad operativa de la RM presenta desafíos técnicos y ambientales para hospitales, fabricantes y autoridades sanitarias.

Además, la resonancia magnética (RM) es una tecnología diagnóstica exigente energéticamente en el sector salud, por la necesidad de mantener los imanes superconductores a temperaturas criogénicas mediante helio líquido. Esta dependencia genera pérdidas continuas del recurso, una elevada demanda de energía y un impacto ambiental considerable derivado de la operación diaria y de la infraestructura de climatización asociada.

Los avances en tecnología de imanes sellados, sistemas Zero Boil-Off (ZBO) y criocoolers de alta eficiencia permiten reducir la pérdida de helio, disminuir los requerimientos de recarga criogénica y optimizar el consumo energético durante la operación. Los sistemas con imanes sellados son una transición necesaria hacia equipos más limpios, económicos y ambientalmente responsables, al eliminar la evaporación de helio y demandar menor infraestructura de climatización.

La transición a sistemas de imanes sellados y tecnologías Zero Boil-Off fue por la necesidad de reducir el consumo de helio. Estas innovaciones tienen un cambio estructural en las salas de radiología integrando una perspectiva de sostenibilidad y reducción de emisiones en línea con las políticas globales de descarbonización del sector salud.

Comparar el desempeño energético, el uso de recursos criogénicos y la huella de carbono entre sistemas convencionales y modelos sellados/ZBO permite identificar las oportunidades de sostenibilidad en los servicios de diagnóstico por imágenes.

La implementación de tecnologías de resonancia magnética (RM) en servicios hospitalarios implica un análisis técnico y clínico, además de la evaluación ambiental por el consumo energético, el uso de helio y la carga térmica. En los últimos años, la sostenibilidad en equipos de imagen se ha convertido en un fundamento importante para las instituciones de salud que buscan reducir costos operativos y emisiones asociadas.

Estudios recientes evidencian que la eficiencia energética y los sistemas criogénicos de circuito cerrado reducen de gran manera la huella ambiental de la RM (Roletto et al., 2024). Además, tecnologías emergentes como BlueSeal plantean modelos de imanes sellados que eliminan la evaporación continua del helio, reduciendo la demanda de refrigeración y el impacto ambiental en los sistemas hospitalarios.

En relación con la crisis climática, el sector de la salud tiene como desafío disminuir su impacto ambiental sin comprometer la calidad de la atención. La resonancia magnética (RM), es una de las principales fuentes de consumo energético y emisiones indirectas en los servicios de radiología, por su funcionamiento continua, requerimientos criogénicos y dependencia de sistemas de climatización.

Además, los sistemas de RM de alto campo dependen del uso de helio líquido para mantener la superconductividad de sus imanes, es decir, pérdidas constantes por evaporación, recargas habituales y una cadena logística con alto impacto ambiental. Sin embargo, el desarrollo de tecnologías de enfriamiento sellado o Zero Boil-Off ha disminuido la dependencia del helio, optimizando el consumo energético y disminuyendo las emisiones del ciclo de vida del equipo.

Esta investigación evidencia estas diferencias a través de una revisión sistemática de literatura, informes técnicos y análisis de ciclo de vida (LCA), reconociendo que la adopción de tecnologías ecoeficientes se alinea con las metas globales de descarbonización y con los lineamientos de sostenibilidad propuestos por organismos internacionales.

El estudio se estructuró con un enfoque cualitativo, descriptivo y comparativo, para analizar información técnica proveniente de diferentes fuentes científicas y reportes especializados. A través de las fases metodológicas definidas, se buscó identificar patrones, diferencias y oportunidades de mejora en la sostenibilidad de los sistemas de resonancia magnética, estableciendo una relación directa entre el desempeño tecnológico y su impacto ambiental.

Con la revisión documental, se evidenció que los sistemas convencionales de resonancia magnética tienen altos requerimientos energéticos y pérdidas continuas de helio por la evaporación (boil-off), lo que incrementa los costos operativos y la huella de carbono. Mientras que, los sistemas de enfriamiento sellado o tecnología Zero Boil-Off emergen como una alternativa que reduce el consumo de helio, optimiza la eficiencia energética y disminuye el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida del equipo.

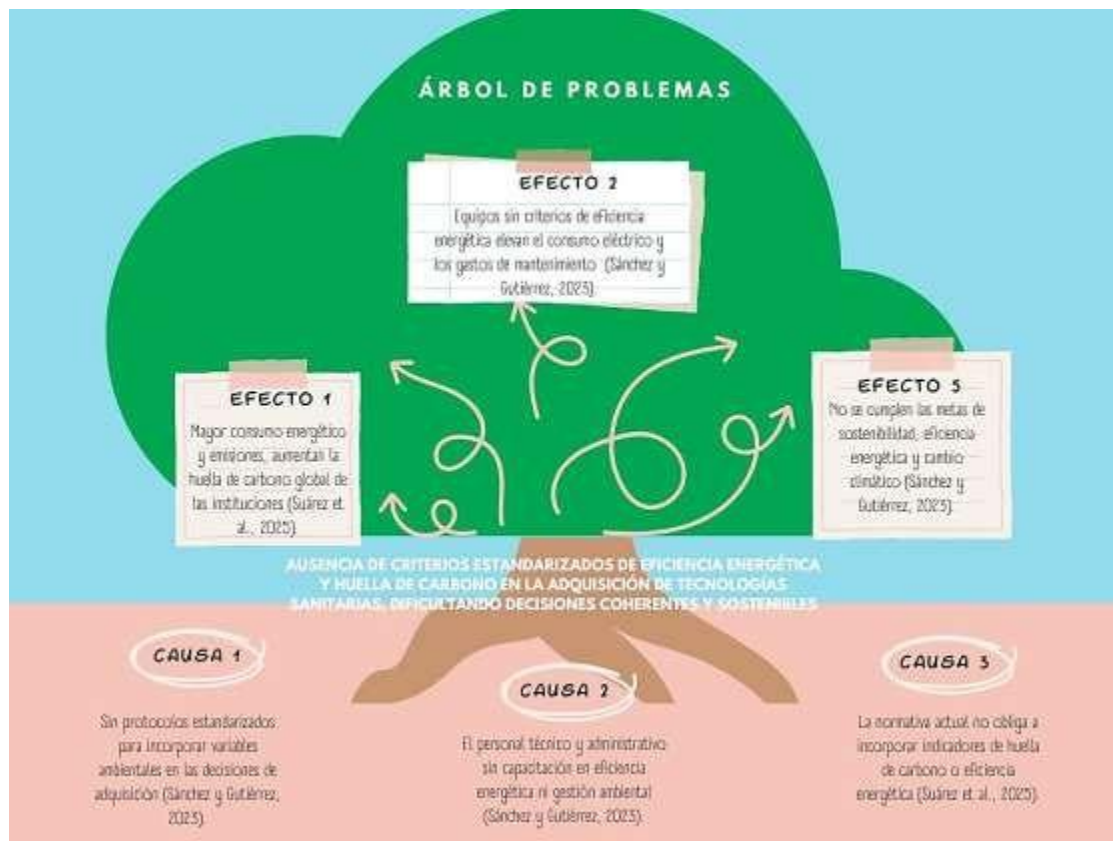
Esta investigación se basó en la comparación de la eficiencia energética y la huella de carbono de los sistemas convencionales vs los sistemas de enfriamiento sellado, evaluando su

desempeño operativo durante un periodo de 10 años, evidenciando el potencial de estas innovaciones en el enfoque de Green Radiology. Además, analiza y compara el comportamiento ambiental y operativo de los resonadores convencionales vs equipados con sistemas sellados, subrayando las oportunidades de mejora en sostenibilidad, estabilidad operativa y reducción del impacto climático.

Planteamiento del Problema

Figura 1

Árbol del Problema



Nota. Autoría propia

El sector salud contribuye aproximadamente con el 4,4 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, según el Ministerio de Sanidad de España, lo que evidencia su impacto ambiental significativo (sanidad.gob.es, 2026). Dentro de este sector, el departamento de radiología destaca por su alto consumo energético debido al funcionamiento continuo de equipos de alta potencia, sistemas de climatización 24/7 y sistemas de respaldo eléctrico.

Los resonadores magnéticos de alto campo requieren recursos considerables para su operación y, en muchos casos, dependen del helio líquido para mantener el enfriamiento del imán, incrementando tanto los costos operativos como la huella de carbono (Suárez et al., 2025).

Asimismo, Según Salud sin Daño (2019), en radiología el consumo energético es elevado, por el funcionamiento continuo de equipos de alta potencia y los sistemas de climatización que incrementan la huella de carbono. Los resonadores magnéticos de alto campo utilizan grandes recursos energéticos y, en muchos casos, dependen del helio líquido para mantener la criogenización del imán, lo que genera costos operativos elevados y aumenta el impacto ambiental (Moyón et al., 2024).

No obstante, las innovaciones tecnológicas han dado prioridad a la resolución de imagen y la velocidad de adquisición, todavía hay una brecha de conocimiento en eficiencia energética y sostenibilidad, donde muchas salas de radiología aún compran equipos según el rendimiento clínico y no considerando el impacto ambiental ni el consumo de recursos como el helio o detectores de energía elevada (Gavilán, 2015).

Las tecnologías de resonancia magnética con enfriamiento sellado eliminan la necesidad de recargas periódicas de helio, ofreciendo una alternativa más sostenible (Quirónsalud, s. f.). Sin embargo, no hay evidencia suficiente que compare su impacto ambiental frente a los sistemas convencionales durante un ciclo de vida prolongado, lo que limita la implementación de políticas de adquisición basadas en sostenibilidad y eficiencia energética (Roletto et al., 2024), de igual forma, eliminan la necesidad de recargas periódicas de helio, y son alternativas más sostenibles, reduciendo el consumo de este recurso escaso y disminuyendo la huella de carbono de los equipos (Hetman, 2026).

Asimismo, a pesar del desarrollo de estrategias de mantenimiento predictivo y analítica basada en IoT que optimizan el rendimiento y anticipan fallas (Hashemian y Bean, 2011), en radiología predominan enfoques centrados en la calidad de imagen más que en la eficiencia energética (Muñoz et al., 2024).

De esta forma, los resonadores magnéticos convencionales de alto campo dependen de helio líquido para conservar la criogenización del imán, un recurso limitado cuyo uso genera costos operativos elevados y un impacto ambiental significativo (RSNA, 2023). A pesar de los avances en calidad de imagen y velocidad de adquisición, hay una brecha de conocimiento sobre eficiencia energética, y, aun así, muchas decisiones de adquisición se toman basándose solo en criterios clínicos, sin tener en cuenta el impacto ambiental ni el consumo energético de los equipos (Suárez et al., 2025).

Además de lo expuesto, resulta pertinente incorporar una perspectiva de análisis de ciclo de vida (ACV) que permita evaluar no solo el consumo energético operativo de los resonadores magnéticos, sino también los impactos asociados a su fabricación, transporte, instalación, mantenimiento y disposición final; diversos estudios han señalado que una parte considerable de la huella ambiental de los equipos médicos de alta tecnología se concentra en la fase de uso, debido a su elevada demanda energética y a la necesidad de climatización constante, aunque las etapas previas y posteriores también contribuyen de manera significativa al impacto total (Eckelman y Sherman, 2016).

En el caso específico de la resonancia magnética, el consumo eléctrico anual puede ser elevado incluso en periodos de inactividad, debido a los sistemas de enfriamiento continuo y a los modos standby, lo que incrementa la huella de carbono acumulada a lo largo del tiempo (McGain y Naylor, 2014).

La dependencia del helio líquido en los sistemas convencionales representa un desafío adicional, dado que se trata de un recurso finito cuya extracción y suministro están sujetos a limitaciones geopolíticas y ambientales, la reducción o eliminación de recargas periódicas mediante tecnologías de enfriamiento sellado no solo podría disminuir el impacto ambiental

directo, sino también reducir riesgos asociados a la escasez y al aumento de costos del helio (Buchli et al., 2020). Sin embargo, la evidencia comparativa a largo plazo sobre la reducción efectiva de la huella de carbono en condiciones reales de operación sigue siendo limitada, lo que refuerza la necesidad de investigaciones que integren variables energéticas, ambientales y económicas en un horizonte de al menos 10 años.

Integrar criterios de sostenibilidad en la toma de decisiones tecnológicas responde no solo a una necesidad administrativa, sino también a un compromiso ético del sector salud frente al cambio climático, reconocido como una de las mayores amenazas para la salud global del siglo XXI, en este sentido, generar una base comparativa que permita establecer protocolos institucionales de adquisición más sostenibles contribuirá a alinear la innovación diagnóstica con estrategias de descarbonización hospitalaria y responsabilidad ambiental, fortaleciendo la coherencia entre la misión sanitaria y la protección del entorno.

En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿En qué medida los resonadores magnéticos con tecnología de enfriamiento sellado, sin recarga de helio, reducen la huella de carbono operativa en comparación con los sistemas convencionales de alto campo durante un ciclo de vida de 10 años?

Justificación

La comparación de los resonadores magnéticos convencionales de alto campo con los de enfriamiento sellado es fundamental para integrar criterios sobre la calidad diagnóstica, la velocidad, el tiempo, la huella de carbono, la eficiencia energética, la generación de desechos y la vida útil de los equipos. Fractal (2026) resalta que las estrategias de mantenimiento predictivo basadas en analítica permiten optimizar el rendimiento energético y anticipar fallas, contribuyendo a la reducción de desperdicios.

Sin embargo, los sistemas convencionales consumen grandes cantidades de energía y dependen del helio líquido, lo que incrementa la huella de carbono, tal como señalan ECODES y Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2024). Por su parte, Gavilán (2015) indica que medir el consumo energético y optimizar el rendimiento ayuda a prolongar la vida útil de los equipos y a disminuir el desperdicio de recursos.

Esta investigación es significativa porque permitirá una base comparativa técnica y ambiental para beneficiar la toma de decisiones de compras más sostenible en radiología, teniendo en cuenta el ciclo de vida de los equipos, la huella de carbono, el consumo de recursos y los desechos al final de su vida útil, contribuyendo a reducir el impacto ecológico del sector radiológico y a promover la responsabilidad ambiental institucional.

Los resonadores convencionales, aunque tienen alta resolución y velocidad, poseen un consumo energético alto y dependen del helio líquido, cuya producción y transporte contribuyen a emisiones de gases de efecto invernadero (Mahesh y Barker, 2016). A esto se suma la escasez de protocolos que integren criterios de eficiencia energética y sostenibilidad en la adquisición de equipos médicos, lo que limita la toma de decisiones basadas en impacto ambiental, según Mesa (2022).

En contraste, los sistemas de enfriamiento sellado ayudan a entender cómo reducir la huella de carbono durante su funcionamiento y disminuir los residuos al final de la vida útil, cosas que no se tienen en cuenta en la adquisición de los equipos (Roletto et al., 2024).

De igual forma, los resonadores convencionales, aunque ofrecen alto rendimiento clínico, implican un gran consumo eléctrico y dependencia del helio, cuyo suministro y transporte tienen impactos ambientales significativos (RSNA, 2023). La adopción de sistemas con enfriamiento sellado puede reducir estos impactos, pero la evidencia sobre su rendimiento ambiental y energético comparativo aún es limitada, mientras que Suárez et al., (2025) destacan que el alto consumo energético en radiología se debe al funcionamiento continuo de equipos de alta potencia, climatización 24/7 y sistemas de respaldo, aumentando la huella de carbono operativa del área. Por estas razones, esta investigación es relevante, ya que permitirá generar una base comparativa técnica y ambiental que sirva a las instituciones de salud para implementar protocolos de compra más sostenibles, equilibrando calidad diagnóstica, eficiencia energética, sostenibilidad y responsabilidad ambiental.

Objetivos

Objetivo General

Comparar, a partir de la revisión de la literatura científica, la eficiencia energética y la reducción de la huella de carbono de los sistemas de resonancia magnética con tecnología de enfriamiento sellado frente a los sistemas convencionales de alto campo, considerando su desempeño operativo y su ciclo de vida durante un periodo de 10 años.

Objetivos Específicos

Analizar, a partir de la revisión de la literatura, el consumo energético reportado de los sistemas de resonancia magnética convencionales y de enfriamiento sellado en condiciones de operación.

Describir el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de los equipos (fabricación, operación, mantenimiento y disposición final), identificando tendencias y oportunidades de mejora en sostenibilidad.

Comparar la huella de carbono de los sistemas convencionales y de enfriamiento sellado, con base en estudios previos que consideren variables como consumo eléctrico, uso de helio y requerimientos de climatización.

Marco Teórico

El Sector Salud y la Crisis Climática

El sector salud contribuye aproximadamente con el 4,4 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), según el Ministerio de Sanidad de España (sanidad.gob.es, 2026), lo que evidencia su impacto ambiental significativo. Esta realidad exige replantear la infraestructura hospitalaria y el uso de tecnologías médicas de alto consumo energético, como la resonancia magnética (RM), bajo criterios de sostenibilidad (Chaban et al., 2023).

El Banco Interamericano de Desarrollo (2024) destaca que la infraestructura sanitaria debe alinearse con las metas climáticas mediante estrategias de eficiencia energética, modernización tecnológica y medición sistemática de emisiones. En este contexto, la cuantificación de la huella de carbono en centros de salud se convierte en un paso esencial para implementar acciones de reducción efectivas (Roletto et al., 2024).

En el contexto colombiano, se evidencia la relevancia de estas estrategias en hospitales y centros de radiología. En diversos estudios como el de Castro et al., (2025) comparan tecnologías de adquisición de TC y RM, evaluando eficiencia energética y huella de carbono, y proponen mejoras orientadas a disminuir el impacto ambiental. Asimismo, Gómez et al., (2025) analizan la huella de carbono en radiología convencional (CR-DR) y la eficiencia energética, subrayando la importancia de implementar protocolos sostenibles en el manejo de residuos y consumo energético. Además, la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo y preventivo en equipos de imagenología permite reducir fallas y optimizar la energía consumida (Fractal, 2026).

Huella de Carbono en Radiología

Los servicios de radiología presentan un consumo energético elevado debido a la operación continua de equipos de alta potencia, sistemas electrónicos, climatización permanente (HVAC) y requerimientos estructurales específicos. La revisión sistemática de Roletto et al., (2024) evidencia que la resonancia magnética es uno de los dispositivos con mayor impacto energético dentro de los departamentos de imagenología por su alto consumo eléctrico durante la operación y a la necesidad de mantener criogénicamente el helio líquido para el enfriamiento de los imanes superconductores (Mahesh y Barker, 2016). Este alto consumo energético se amplía por la frecuencia de uso, el mantenimiento de sistemas de refrigeración, y la infraestructura asociada a la sala de RM, por esta razón, es importante implementar estrategias de eficiencia energética y mantenimiento predictivo para reducir la huella de carbono en los centros de salud (Fractal, 2026).

De igual forma, Woolen et al., (2023) promueven el concepto de Green Radiology, orientado a optimizar protocolos, mejorar la eficiencia energética y fomentar la transición tecnológica sostenible. Asimismo, Chaban et al., (2023) analizan los desafíos ambientales asociados al consumo energético y al uso de helio en RM, resaltando la necesidad de adoptar estrategias de sostenibilidad ambiental en esta modalidad.

Alcances de Emisiones - Scopes 1, 2 y 3

La medición de la huella de carbono en instituciones sanitarias se estructura en tres alcances, según Rodríguez et al., (2023):

Scope 1. emisiones directas, como pérdidas de gases refrigerantes, como en hospitales por la pérdida de gas refrigerante en equipos de aire acondicionado, escapes de helio en

resonadores magnéticos (RM) durante mantenimiento o recarga, y emisiones de calderas o generadores internos (Mahesh y Barker, 2016).

Scope 2. emisiones indirectas derivadas del consumo eléctrico, incluyen la energía usada por equipos de imagenología como RM, tomografía computarizada (TC) o radiología digital, sistemas de climatización hospitalaria y servidores de almacenamiento de datos médicos (Roletto et al., 2024).

Scope 3. emisiones asociadas a la cadena de suministro, fabricación, transporte y disposición final, como la producción y transporte de resonadores magnéticos y otros equipos de alta complejidad, la fabricación de reactivos y materiales médicos, y la disposición de residuos hospitalarios peligrosos, como equipos desechables y materiales radiactivos (ECODES y Ministerio para la Transición Ecológica, 2024).

Asimismo, Mahesh y Barker, (2016) subraya la relevancia del Scope 3 en equipos médicos de alta complejidad, como los resonadores magnéticos, cuyo ciclo de vida útil supera los 10 años, ampliando su impacto ambiental más allá de la fase operativa.

Green Radiology

La radiología verde está orientada a minimizar el impacto ambiental de los servicios de imagenología médica sin reducir la calidad diagnóstica ni la seguridad del paciente. Esta perspectiva nace de la creciente preocupación por la interdependencia entre la salud humana y la sostenibilidad ambiental, impulsada por estudios que muestran cómo las actividades sanitarias contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y al consumo energético global (Eckelman y Sherman, 2016). Según Lojo et al., (2023), el desarrollo de una radiología sostenible implica optimizar recursos, reducir el consumo energético, implementar procesos

operativos ambientalmente responsables y fomentar una cultura institucional de responsabilidad ecológica.

Asimismo, Roletto et al., (2024) evidencian que los departamentos de radiología son centros de alto consumo energético dentro de los hospitales, principalmente debido al uso intensivo de equipos complejos como la resonancia magnética (RM) y la tomografía computarizada (TC). Además, El impacto ambiental de estos equipos tiene una base física y tecnológica: los sistemas RM requieren imanes superconductores refrigerados criogénicamente, los cuales dependen del helio líquido para mantener temperaturas extremadamente bajas necesarias para su funcionamiento estable y preciso (Mahesh y Barker, 2016). De igual forma, el alto consumo energético, en los estudios, marcan a la RM entre los dispositivos con mayor huella de carbono en radiología (Chaban et al., 2023).

Para avanzar hacia una radiología sostenible se deben implementar estrategias que reduzcan el uso energético sin comprometer la calidad. En este sentido, Castro et al., (2025) realizan un análisis comparativo entre TC y RM, donde optimizar protocolos de adquisición de imagen y actualizar tecnologías puede disminuir significativamente la huella de carbono generada por los equipos. La utilización de tecnologías emergentes como RM de campo bajo o portátiles, que demandan menos energía de operación, también se presenta como una alternativa viable para reducir emisiones sin perder capacidad diagnóstica (Kravchenko et al., 2025).

De igual forma, la medición de la huella de carbono es la base de la radiología verde. Los estudios de ámbito sanitario evidencian que la evaluación de emisiones directas, indirectas por consumo eléctrico y emisiones de cadena de suministro permite a las instituciones establecer metas de reducción efectivas (Rodríguez et al., 2023). Con ejemplos como los análisis de eficiencia energética en radiología convencional (CR-DR) realizados por Gómez et al., (2025),

donde se evalúan las emisiones generadas por equipos y se proponen medidas operativas para mitigarlas. Esta medición de la huella de carbono en hospitales toma en cuenta los residuos sólidos generados por consumibles radiológicos, el transporte de equipos y la gestión de residuos peligrosos, lo que se traduce en acciones concretas para la reducción de impactos ambientales (Sanidad.gob.es, 2026).

La implementación de Green Radiology exige una cultura institucional orientada a la responsabilidad ecológica, que incluye capacitación del personal, adopción de protocolos sustentables, estrategias de gestión energética y políticas institucionales de sostenibilidad (Banco Interamericano de Desarrollo, 2024.).

Asimismo, existen informes técnicos como el de IM Médico (2023) donde discuten fórmulas para que los servicios de radiología contribuyan a la reducción de la huella de carbono global, impulsando la adopción de estrategias de eficiencia energética. Asimismo, la evidencia científica sobre tecnologías emergentes de eficiencia térmica y aplicaciones de energías renovables, aunque enfocada en otros sectores, puede ser extrapolada para fortalecer la sostenibilidad de infraestructura médica (Osintsev et al., 2023). En Colombia, Suárez et al., (2025) ponen de manifiesto la importancia de analizar el perfil energético de las áreas de imagenología para identificar oportunidades de mejora desde la gestión operativa y energética. Este tipo de análisis sienta las bases para la implementación de programas de radiología verde adaptados a la realidad local.

Fundamento de la Resonancia Magnética de Alto Campo

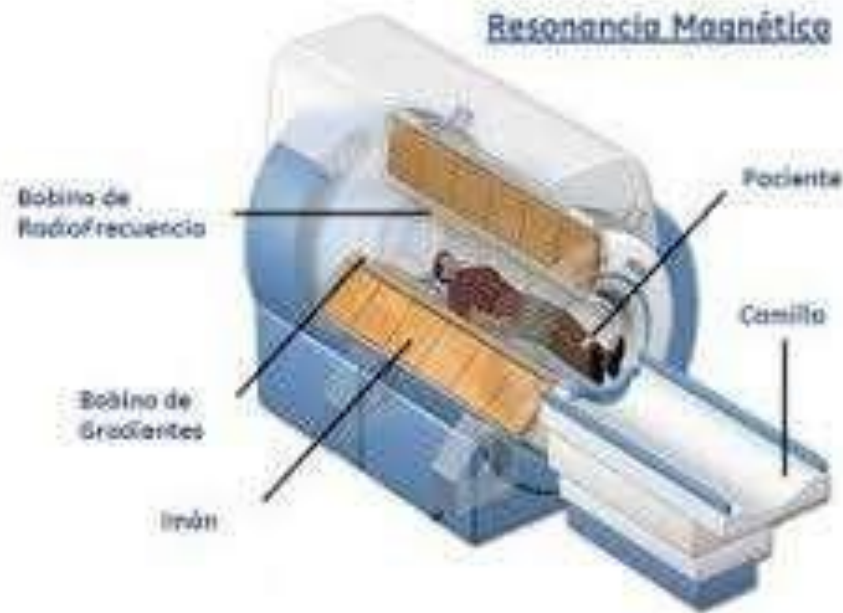
La resonancia magnética de alto campo utiliza imanes superconductores enfriados con helio líquido para generar campos magnéticos intensos. Esta tecnología permite mayor relación señal-ruido, mejor resolución espacial y reducción de tiempos de adquisición, traduciéndose en

mayor precisión diagnóstica. No obstante, requiere infraestructura compleja y energéticamente exigente.

Sobol (2012) señala que los avances en potencia y desempeño han mejorado sustancialmente la calidad de imagen, pero también han incrementado la demanda energética estructural en las salas de radiología.

Figura 2

Resonancia Magnética



Nota. Imagen tomada de Agenor Equipamiento

Sistemas de Superconductividad

La superconductividad permite generar un campo magnético intenso sin resistencia eléctrica. Para ello, las bobinas del imán deben mantenerse aproximadamente a 4 Kelvin (-269 °C), lo que requiere entre 1000 y 2000 litros de helio líquido (Al-Douri, 2022).

De igual forma, Mahesh y Barker (2016) advierten que la crisis global del helio evidencia la vulnerabilidad de este recurso no renovable, cuya extracción, transporte y licuefacción generan variaciones en disponibilidad, costos e impacto ambiental.

Ciclo del Helio

En los sistemas tradicionales ocurre el fenómeno de boil-off, que consiste en la evaporación gradual del helio líquido debido a transferencias térmicas inevitables (García, 2024). Este proceso implica producción industrial, transporte criogénico especializado y emisiones asociadas a la cadena logística (Scope 3), además del riesgo de liberaciones accidentales en eventos de quench.

La Radiological Society of North America (2023) advierte que la escasez de helio puede comprometer la operatividad de los servicios de RM, reforzando la necesidad de tecnologías con menor dependencia criogénica. Desde una perspectiva de sostenibilidad, cada recarga tiene un costo económico, un impacto ambiental indirecto a la producción, transporte y logística del helio en el suministro.

Consumo Energético en Reposo

Roletto et al., (2024) identifican que el consumo energético constante de la RM representa una fracción significativa del gasto total en radiología. A diferencia de otras modalidades, el imán superconductor debe permanecer activo continuamente para preservar su estabilidad.

De igual forma, Al-Douri (2022) señala que la superconductividad se logra manteniendo condiciones criogénicas estables, lo que es un consumo energético constante. Asimismo, Aminaho et al., (2025) indican que incluso los sistemas diseñados para conservar helio de forma

eficiente requieren mantener el criocooler y los sistemas de control funcionando de manera permanente.

Este consumo energético basal puede ser tan o más significativo que el consumo durante la adquisición de imágenes, motivo por el cual diversas instituciones (Suárez et al., 2025) han clasificado la RM como una de las tecnologías de diagnóstico más demandantes desde el punto de vista energético. Es decir, que el consumo energético en reposo es una carga constante e inevitable para los centros hospitalarios, que necesita ser incluida en políticas de eficiencia energética y sostenibilidad.

Impacto Ambiental

Uno de los factores menos evidentes del impacto ambiental de la RM es el consumo energético basal o en reposo. Castro et al., (2025) subrayan que incluso en reposo, el sistema debe mantener estabilidad criogénica, sistemas electrónicos activos y climatización (HVAC), aumentando el consumo energético basal y la huella de carbono institucional.

Asimismo, Rodríguez et al., (2023) subrayan que la combinación de consumo energético basal, sistemas HVAC intensivos y alta demanda eléctrica posicionan a la RM como una de las mayores fuentes de emisiones indirectas en radiología. También, Eckelman y Sherman (2016) muestran que la infraestructura hospitalaria depende fuertemente de la energía para garantizar condiciones ambientales controladas, lo que amplifica el impacto de los equipos de diagnóstico de alto consumo.

Finalmente, Moyón et al., señalan que la dependencia del helio líquido y de sistemas criogénicos tradicionales intensifica tanto el consumo energético como la huella ambiental, lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías de imán sellado y resonadores Zero Boil-off, que eliminan las recargas de helio y reducen sustancialmente el impacto energético y ambiental.

Innovación Tecnológica: Sistemas de Enfriamiento Sellado en Resonancia Magnética

La evolución tecnológica de la RM ha promovido el desarrollo de sistemas de bajo campo y tecnologías portátiles orientadas a reducir la infraestructura requerida y el consumo energético. Kravchenko et al., (2025) señalan que estas innovaciones buscan minimizar la huella ambiental sin comprometer la calidad diagnóstica. Es decir, que los sistemas de enfriamiento sellado representan un avance significativo hacia la sostenibilidad operativa, al reducir la dependencia de helio y mejorar la eficiencia energética al integrar eficiencia tecnológica, seguridad y responsabilidad ambiental.

Figura 3

Enfriador de Resonancia Magnética



Nota. Imagen tomada de Guangdong Tongwei Machinery.

Funcionamiento de los Sistemas de Enfriamiento Sellado

Los sistemas de enfriamiento sellado, sealed cryogenic systems, como los desarrollados por Philips BlueSeal (Philips, s.f.) o implementados en modelos recientes de RM, integran los siguientes principios de operación:

Circuito Cerrado de Helio

El helio líquido para mantener los imanes superconductores a temperaturas criogénicas (~ 4 K) se encierra en un circuito sellado, evitando pérdidas por evaporación, a diferencia de los sistemas tradicionales, donde el helio se consume continuamente y requiere reposición periódica, generando costos y emisiones indirectas (Buchli et al., 2020).

Refrigeración por Compresión y Recuperación Interna

Los sistemas utilizan compresores y bombas criogénicas para recircular y recongelar el helio, manteniendo su estado líquido sin necesidad de recarga externa (Mahesh y Barker). Esta tecnología permite que un solo llenado de helio pueda durar toda la vida útil del imán, reduciendo las emisiones asociadas al transporte y producción de gas (Chaban et al., 2023).

Tecnología de Microenfriamiento

La microcriogenia cerrada evita pérdidas de helio y optimiza la estabilidad térmica. Chaban et al., (2023) describen esta innovación como un punto de inflexión en sostenibilidad para RM sin destruir la capa de ozono ni comprometer el medio ambiente, siendo una solución innovadora para un microenfriamiento eficiente y sólido.

Además, Pambudi et al., (2022) destacan que la refrigeración por inmersión mejora el control térmico y reduce el consumo eléctrico del sistema criogénico, siendo una solución sostenible para el microenfriamiento en RM de alto campo.

Eliminación del Tubo de Quench

La eliminación del tubo de quench en los sistemas de resonancia magnética sellados es un avance crucial para la seguridad y el diseño arquitectónico. Según Philips (s.f.) indica que la tecnología BlueSeal elimina la necesidad del tubo de quench, reduciendo requerimientos estructurales.

Asimismo, Aminaho et al., (2025) resaltan que esta innovación mejora la seguridad operativa y reduce el consumo energético asociado a sistemas de emergencia.

Impacto Arquitectónico y HVAC

La menor disipación térmica reduce la carga sobre sistemas HVAC hospitalarios. Según Gavilán (2015), la climatización es uno de los consumos energéticos más altos en el ámbito sanitario; por tanto, cualquier reducción térmica impacta directamente el Scope 2.

De igual forma, Osintsev et al., (2023) destacan que la integración de sistemas de intercambio térmico y tecnologías de eficiencia energética mejoran la transferencia de calor y disminuyen las pérdidas, exponiendo que una menor disipación térmica de los equipos impacta de forma positiva en la eficiencia global y en la sostenibilidad operativa de los servicios hospitalarios.

En conclusión, los sistemas de enfriamiento sellado son un gran avance hacia la radiología verde, al integrar eficiencia energética, seguridad y responsabilidad ambiental, mientras permiten mantener la alta calidad diagnóstica de la RM.

Este tipo de innovación explica cómo la infraestructura hospitalaria puede alinearse con metas climáticas locales y globales, como enfatiza el Banco Interamericano de Desarrollo (2024) en sus recomendaciones para la infraestructura sanitaria sostenible.

Métricas de Sostenibilidad Operativa

Consumo Energético – kWh por Estudio

La energía eléctrica utilizada por el equipo durante la realización de un estudio de RM, que incluye la operación del imán superconductor, sistemas de microenfriamiento, electrónica, consolas y unidades de procesamiento Gómez et al., (2025).

Algunos estudios en hospitales muestran la importancia de medir y optimizar el consumo energético de los equipos de imagen. IM Médico (2023) reporta que estrategias de gestión energética en servicios de radiología pueden reducir el consumo entre un 25 % y un 51 %, evidenciando que la operación y configuración de los equipos impacta directamente la huella ambiental.

Igualmente, la EPA (2024) proporciona herramientas como la Greenhouse Gas Equivalencies Calculator, que permiten traducir el consumo de electricidad en emisiones equivalentes de CO₂, facilitando la comparación entre tecnologías y la cuantificación del impacto ambiental de diferentes configuraciones de resonancia magnética.

Economía Circular y Reducción del Impacto Ambiental en RM

La transición hacia modelos de economía circular representa un enfoque emergente en la sostenibilidad hospitalaria.

En resonancia magnética, esto implica:

Reducción del uso de helio.

Reciclaje y recuperación de componentes electrónicos.

Diseño modular para prolongar la vida útil del equipo.

Optimización del mantenimiento preventivo.

Chaban et al., (2023) resaltan que las tecnologías de RM sellada contribuyen a este modelo al minimizar la dependencia de recursos no renovables como el helio y reducir la necesidad de intervenciones técnicas frecuentes.

Desde la perspectiva del Análisis de Ciclo de Vida (LCA), Roletto et al. (2024) argumentan que la fase de uso representa el mayor porcentaje de emisiones en equipos de imagenología, por lo que extender la vida útil del sistema mediante mantenimiento eficiente y actualizaciones tecnológicas puede disminuir significativamente la huella de carbono global del equipo

Tabla 1

Comparación de tecnologías

Aspecto	RM Convencional	RM Sellada / Sistemas de Bajo Campo
Fuente de enfriamiento	Helio líquido en circuito abierto, requiere recargas periódicas (Castro et al., 2025).	Helio en circuito cerrado, con microenfriadores internos que recirculan el gas (Chaban et al., 2023).
Consumo energético	Alto, debido a compresores, criogenia y ventilación para mantener los imanes superconductores a ~4 K (Aminaho et al., 2025).	Reducido: sistema de microenfriamiento eficiente y optimización de energía eléctrica (Kravchenko et al., 2025).

Aspecto	RM Convencional	RM Sellada / Sistemas de Bajo Campo
Dependencia de helio	Alta: pérdidas continuas requieren reposición constante, con implicaciones económicas y ambientales (Mahesh y Barker, 2016).	Muy baja: el circuito cerrado elimina la necesidad de recargas periódicas, disminuyendo el impacto ambiental (Buchli et al., 2020).
Huella de carbono	Mayor: consumo eléctrico elevado y transporte frecuente de helio contribuyen a emisiones de Scope 2 y 3 (Rodríguez et al., 2023; ECODES & MITERD, 2024).	Reducida: menor consumo energético y cero recargas externas de helio reducen emisiones directas e indirectas (Chaban et al., 2023).
Infraestructura requerida	Necesita salas grandes, sistemas de ventilación y mantenimiento frecuente de criogenia (Castro et al., 2025).	Menor: microenfriadores integrados y diseño compacto permiten espacios más pequeños y simplifican la operación (Kravchenko et al., 2025).
Mantenimiento	Continuo y especializado; riesgos por manejo de helio y sistemas criogénicos complejos	Reducido: sistema sellado disminuye fallas relacionadas con pérdida de helio y permite

Aspecto	RM Convencional	RM Sellada / Sistemas de Bajo Campo
Calidad diagnóstica	(RSNA, 2023; Mahesh & Barker, 2016). Alta, estándar clínico, amplio rango de aplicaciones.	mantenimiento predictivo más sencillo (Fractal, 2026; Chaban et al., 2023). Comparativamente similar, aunque los sistemas de bajo campo tienen limitaciones en resolución; tecnologías portátiles avanzan para mantener precisión diagnóstica (Kravchenko et al., 2025; Aminaho et al., 2025).
Seguridad y riesgos	Riesgo de fugas de helio y accidentes por manipulación de criogenia; requiere protocolos estrictos (Mahesh & Barker, 2016).	Mayor seguridad: helio contenido, reducción de exposición del personal y pacientes, menor riesgo de accidentes (Buchli et al., 2020; Philips, s.f.).
Costo operativo	Elevado por consumo energético, recargas de helio y	Menor: ahorro en consumo eléctrico y eliminación de recargas externas de helio

Aspecto	RM Convencional	RM Sellada / Sistemas de Bajo Campo
Sostenibilidad ambiental	mantenimiento especializado (Castro et al., 2025). Limitada; contribuye significativamente a la huella de carbono del hospital (Roletto et al., 2024).	(Chaban et al., 2023; Lojo et al., 2023). Mejorada; representa un paso hacia la radiología verde, alineada con metas climáticas y eficiencia energética (Banco Interamericano de Desarrollo, 2024).

Nota. Elaboración propia

Sostenibilidad en Salud y Responsabilidad Institucional

El sector salud es responsable de aproximadamente el 4–5 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (Rodríguez et al., 2023). En este contexto, los servicios de radiología, por su alta demanda energética, tienen un papel estratégico en la reducción del impacto ambiental hospitalario.

Es decir, que los servicios de radiología desempeñan un papel estratégico, pues el funcionamiento permanente de modalidades como la resonancia magnética, el TAC y los sistemas de climatización asociados son una proporción significativa del gasto energético institucional (Cohen et al., 2022).

La integración de políticas de sostenibilidad institucional, como compras verdes, selección de tecnologías de bajo consumo y monitoreo continuo de indicadores ambientales, permite alinear la práctica radiológica con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS),

particularmente el ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (acción por el clima).

Asimismo, la responsabilidad ambiental en el sector salud no se limita a la compra de equipos más eficientes, sino que implica una transformación sistémica que abarque políticas de gestión energética, reducción de residuos, optimización de procesos y criterios de sostenibilidad en la adquisición de tecnología. Según Rosen et al., (2023) la implementación de hospitales verdes requiere integrar indicadores ambientales en los planes de inversión, adopción tecnológica y mantenimiento, priorizando equipos con menor huella de carbono y evaluados mediante metodologías de ciclo de vida. Además, Molina (2022) destaca que la incorporación de sistemas de monitoreo continuo de indicadores ambientales como consumo energético, pérdidas térmicas o emisiones asociadas al ciclo de vida de los equipos, permite evaluar el desempeño ambiental de los servicios diagnósticos y facilita la toma de decisiones basada en evidencia.

De esta manera, la elección entre RM convencional y RM sellada no solo debe evaluarse desde la calidad diagnóstica, sino también desde criterios de eficiencia energética, resiliencia ante crisis de recursos y compromiso ambiental institucional. De igual forma, la transición hacia tecnologías más eficientes, como resonadores con enfriamiento sellado y sistemas Zero boil-off, constituye una acción institucional coherente con los compromisos climáticos internacionales y con los principios de una gestión sanitaria sostenible.

Tabla 2

Comparación de impacto ambiental y energético: RM convencional vs RM sellada

Categoría	RM Convencional	RM Sellada / Sistemas de Bajo Campo
Carga Térmica	Boil-off del helio, sistemas criogénicos y electrónica generan calor constante; alta demanda de HVAC para mantener temperatura y condiciones de operación (Gavilán, 2015).	Microenfriamiento y reducción de helio residual disminuyen la carga térmica; optimiza la climatización hospitalaria y mejora eficiencia energética (Gavilán, 2015).
GWP – Scope 2 (consumo eléctrico y HVAC)	Mayor: la disipación térmica constante incrementa la necesidad de climatización y consumo de energía eléctrica indirecta (Gavilán, 2015).	Menor: menor calor residual reduce el uso de HVAC y electricidad asociada, disminuyendo emisiones indirectas (Gavilán, 2015).
GWP – Scope 3 (cadena de valor del helio y recursos)	Elevado: dependiente de recargas periódicas de helio, transporte y mantenimiento externo; contribuye significativamente al GWP total (García, 2024).	Reducido: circuito cerrado de helio y microenfriamiento disminuyen la dependencia de criógeno, eliminando la mayor parte de emisiones relacionadas con transporte y logística (Rodríguez et al., 2023).
Huella de Carbono por Ciclo de Vida (LCA)	Alta: mayor consumo energético en operación, mantenimiento frecuente y alto volumen de helio elevan emisiones desde fabricación hasta desmantelamiento (Gómez et al., 2025).	Reducida: menor consumo energético, uso mínimo de helio y diseño compacto reducen la huella total, alineándose con Green Radiology y principios de economía circular (Lojo et al., 2023).

Nota. Elaboración propia

Gestión Energética y Estrategias de Optimización en Resonancia Magnética

La sostenibilidad en resonancia magnética (RM) no depende únicamente del tipo de tecnología empleada (convencional o sellada), sino también de las estrategias de gestión energética implementadas en los servicios hospitalarios. La optimización operativa permite reducir significativamente el consumo eléctrico sin comprometer la calidad diagnóstica.

Según Chaban et al. (2023), la implementación de protocolos de ahorro energético, como modos de reposo optimizados, programación eficiente de agendas y apagado de sistemas auxiliares no esenciales, puede disminuir el consumo total del equipo hasta en un 30 %. Estas estrategias se enmarcan en el concepto de Green MRI, el cual promueve una transición hacia prácticas más sostenibles dentro de los departamentos de radiología.

Asimismo, Van der Linden et al., (2021) enfatizan que la integración de auditorías energéticas basadas en análisis de datos en tiempo real y modelación termodinámica facilita la detección de patrones anómalos de consumo en resonadores magnéticos, permitiendo intervenir antes de que se produzcan sobrecargas del sistema criogénico o del sistema HVAC.

Además, Rodríguez et al., (2023) coinciden en que las auditorías energéticas identifican ineficiencias y desarrollan planes de mejora continua, reducir la huella de carbono institucional y orientar la transición hacia tecnologías de resonancia magnética más sostenibles, como imanes sellados y sistemas Zero Boil-off.

Por su parte, Mahesh y Barker (2016) sostienen que la evaluación energética hospitalaria debe incluir el estudio del consumo oculto asociado a períodos de inactividad, ya que estos representan una parte significativa del gasto anual y pueden ser optimizados mediante estrategias como programación inteligente, apagado parcial de sistemas auxiliares o modernización de equipos.

Roletto et al. (2024) destacan que la mayor proporción de emisiones en radiología proviene del consumo eléctrico durante la fase operativa del equipo. Por tanto, la eficiencia no solo debe evaluarse desde el diseño tecnológico, sino también desde la administración hospitalaria, la planificación de la demanda y el uso racional de los recursos energéticos.

Indicadores de Eficiencia Energética en Servicios de Radiología

La medición del desempeño ambiental requiere indicadores comparables y estandarizados. Entre los más relevantes se encuentran:

kWh por estudio realizado

Emisiones de CO₂ equivalentes por paciente

Consumo energético en reposo vs. en adquisición activa

Índice de utilización del equipo (horas activas/horas totales)

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2024) establece que la conversión de kWh a emisiones de CO₂ permite cuantificar el impacto real del consumo eléctrico en términos climáticos. Esto facilita la comparación entre tecnologías y la toma de decisiones basadas en sostenibilidad.

Lojo et al., (2023) señalan que la incorporación de auditorías energéticas periódicas en servicios de radiología permite identificar ineficiencias estructurales, como pérdidas térmicas, sobredimensionamiento de climatización o tiempos muertos operativos. Además, Woolen et al. (2023), quienes destacan que la resonancia magnética presenta patrones de consumo continuo que requieren ser evaluados mediante mediciones de carga térmica, monitoreo del rendimiento del HVAC y análisis de ciclos operativos para reducir el gasto eléctrico innecesario.

Metodología

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cualitativo, para el análisis del consumo energético, la huella de carbono y el uso de recursos criogénicos, como el helio, en tecnologías de resonancia magnética. Este enfoque permite interpretar información técnica y compararla entre diferentes tipos de sistemas. Según Hernández-et al., (2014), los enfoques cualitativos permiten comprender fenómenos complejos a partir de información documentada.

El estudio tiene una metodología descriptiva y comparativa basada en revisión literaria, ya que busca generar conocimiento sobre la adopción de tecnologías más sostenibles. De acuerdo con Hernández et al. (2014), los estudios descriptivos permiten analizar fenómenos a partir de información existente y los comparativos facilitan la identificación de similitudes, diferencias y patrones previamente definidas. El diseño de investigación es no experimental, pues no se manipulan variables, sino que se analizan en su contexto natural.

Se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos científicas como Scopus, IEEE Xplore, PubMed, Researchgate, ScienceDirect, Biblioteca Unad, Google Académico y reportes de fabricantes. Según Hernández et al., (2014), lo cual permite identificar, analizar y sintetizar conocimiento sin intervenir ni manipular fenómenos (Hernández et al., 2014).

Se seleccionaron documentos publicados entre 2010 y 2026 relacionados con eficiencia energética, uso de helio, ciclo de vida y sostenibilidad en resonancia magnética. La información se organizó por ejes temáticos y se analizó comparativamente para identificar diferencias en consumo energético, mantenimiento criogénico y emisiones asociadas. El estudio es documental, basado en fuentes secundarias de artículos, informes técnicos, lineamientos normativos y documentos de fabricante.

La información recopilada se organizó en ejes temáticos para permitir un análisis ordenado y profundo, después, se realizó el análisis comparativo para identificar las variaciones de consumo energético, las diferencias entre el uso de helio y tecnologías Zero boil-off, el impacto ambiental y la huella de carbono.

Criterios de Inclusión

Estudios publicados entre 2010 y 2026.

Documentos en inglés o español.

Investigaciones relacionadas con: eficiencia energética en resonancia magnética, uso y pérdidas de helio, sostenibilidad ambiental, tecnologías de enfriamiento sellado o *zero boil-off*, análisis de ciclo de vida (LCA), factores ambientales asociados a sistemas criogénicos.

Reportes técnicos de fabricantes con datos verificables sobre consumo energético o criogénico.

Normativas, guías ambientales y literatura institucional relacionada con equipamiento de salud.

Criterios de Exclusión

Artículos sin evidencia técnica.

Publicaciones sin relación directa con tecnologías de resonancia magnética.

Estudios anteriores a 2009 por falta de pertinencia tecnológica con los modelos actuales.

Fases de la Investigación

Fase 1: Búsqueda y Recopilación De Datos

Se identificaron y seleccionaron fuentes especializadas en bases de datos científicas, repositorios institucionales y literatura técnica como Scopus, PubMed, Biblioteca virtual Unad, ScienceDirect, ResearchGate, Google Scholar y la Biblioteca Virtual de la UNAD, considerando

publicaciones que evaluaran desempeño energético, requerimientos criogénicos y métricas ambientales de sistemas RM convencionales y sellados y con descriptores de búsqueda como consumo energético, ciclo de vida útil, huella de carbono, pérdidas criogénicas, enfriamiento de sellado.

Descriptores utilizados: consumo energético, uso de helio, sistemas criogénicos, Resonancia Magnética, cero evaporación, Zero Boil-off, Evaluación del Ciclo de Vida (ECV), huella de carbono, refrigeradores criogénicos, imán sellado.

Fase 2. Sistematización y Análisis

La información se organizó en matrices comparativas y ejes temáticos que facilitaron el análisis comparativo, como: consumo energético operativo, parámetros técnicos, requerimientos de mantenimiento criogénico, emisiones y huella de carbono, sistemas de enfriamiento convencional vs Zero Boil-Off, uso y pérdidas de helio y factores que más inciden en el ciclo de vida de cada tipo de resonador.

Fase 3. Comparación y Síntesis

A partir de los datos recopilados, se realizó una comparación entre las dos tecnologías, los sistemas convencionales de resonancia magnética de alto campo con los sistemas con imanes sellados y tecnología de enfriamiento Zero Boil-off durante un ciclo de vida estimado de 10 años. El análisis pudo identificar diferencias en consumo energético, evaluar el impacto del uso o ausencia de helio líquido, determinar ventajas ambientales, sostenibilidad y requerimientos de mantenimiento. Los hallazgos fueron integrados en una síntesis que permitió establecer los aportes y las implicaciones ambientales de cada sistema

Tabla 3*Fases de la metodología*

Fase	Descripción	Resultados
Fase 1 Identificación de fuentes	Búsqueda sistemática en bases de datos como Researchgate, Scopus, PubMed, Biblioteca virtual Unad, Google Académico, ScienceDirect, informes técnicos, reportes de fabricantes. Se aplicaron criterios de inclusión sobre eficiencia energética, consumo criogénico y LCA en RM.	Matriz documental inicial y matriz de selección según relevancia.
Fase 2 Análisis y categorización	Clasificación de la literatura según tipo de tecnología, consumo energético, uso de helio y métricas de sostenibilidad.	Matriz analítica de variables energéticas, criogénicas y ambientales.
Fase 3 Síntesis comparativa	Integración de hallazgos y evaluación de diferencias en sostenibilidad entre tecnologías.	Resultados comparativos y conclusiones ambientales sobre las implicaciones operativas.

Nota. Autoría propia

Análisis de Resultados

El análisis de la literatura muestra diferencias claras en el desempeño y el impacto ambiental entre los sistemas de RM convencionales y los equipos con imanes sellados y tecnologías Zero Boil-Off. Los hallazgos identifican las tendencias relacionadas con el consumo energético, las pérdidas de helio y el impacto ambiental acumulado.

Los equipos convencionales requieren un suministro constante de energía para mantener la estabilidad del helio líquido en el criostato. Booth et al., (2021) señalan que los consumos entre 30–70 kW por hora, dependiendo del campo magnético y la carga térmica ambiental. A diferencia de las tecnologías selladas o ZBO, Zero boil-off, que integran criocoolers que reducen casi el 35–45 % de consumo energético, ya que evitan la evaporación continua del helio y disminuyen la demanda de climatización auxiliar (Katsumata et al., 2020).

Asimismo, la literatura refiere que un resonador convencional puede perder entre 10 y 1.500 litros de helio por año, dependiendo de la antigüedad y las condiciones de operación (Evetts et al., 2021), lo que aumenta los costos y contribuye al agotamiento de un recurso natural no renovable.

Según McDaniel et al., (2022), un RM convencional puede generar entre 40 y 60 toneladas de CO₂ por año, mientras que un sistema sellado puede reducir las emisiones hasta en un 25–40 %, por la menor demanda energética y la eliminación de las pérdidas de helio.

También, los sistemas convencionales requieren intervenciones criogénicas periódicas, recargas de helio y mantenimientos de alto costo. Los sistemas sellados reducen estos procedimientos, lo que prolonga su vida útil operativa y baja los costos de mantenimiento entre un 20–30 %, según informes de fabricantes analizados por Leung et al., (2023).

Tabla 4*Comparación técnica entre Sistemas de Resonancia Magnética*

Variables	RM Convencional	RM Sellado / Zero Boil-Off	Autores
Consumo energético operativo	Alto (30–70 kW/h)	Bajo (reducción del 35–45 %)	Booth et al., (2021)
Pérdida anual de helio	10–1500 L/año	0 L/año	Evetts et al., (2021)
Infraestructura de enfriamiento	Alta dependencia de climatización	Requerimiento reducido	McDaniel et al., (2022)
Huella de carbono anual	40–60 t CO ₂	Reducción del 25–40 %	McDaniel et al., (2022)
Costos de mantenimiento	Elevados por recargas criogénicas	Reducción del 20–30 %	Leung et al., (2023)

Nota. Elaboración propia.

El análisis se desarrolló a través de una revisión comparativa centrada en consumo energético, comportamiento térmico, pérdidas de helio, necesidades de infraestructura y huella de carbono. Los hallazgos muestran que la sostenibilidad de la RM depende de la relación entre la tecnología del imán, los requerimientos criogénicos y la interacción del sistema con el entorno térmico hospitalario.

El desarrollo de sistemas criogénicos cerrados, tecnologías Zero Boil-Off y modelos de imanes eficientes ha permitido reducir la dependencia del helio y optimizar el desempeño energético. Según Buchli et al. (2020), estos sistemas eliminan las pérdidas de helio, lo que disminuye la carga térmica y la demanda sobre HVAC. igualmente, Roletto et al. (2024) destacan que la eficiencia operativa se incrementa al reducir el consumo eléctrico de los criocoolers modernos.

Según Eckelman y Sherman (2016), la climatización hospitalaria tiene alto consumo energético, y los equipos que disipan mayor calor imponen un esfuerzo mayor a los sistemas

HVAC. Esto evidencia que la sostenibilidad de un resonador no depende solo de su imán, sino también de su interacción con la infraestructura hospitalaria.

Asimismo, Rodríguez et al. (2023) destacan que la reducción en la huella de carbono se asocia tanto al menor uso energético como a la disminución en los desplazamientos técnicos y recargas de helio, lo que permite que los sistemas sellados tengan ventajas en emisiones de alcance 2 y 3, superando a los resonadores convencionales.

Tabla 5

Evaluación Ambiental y Operativa de RM

Variable	RM Convencional (criogenia abierta)	RM Sellada / Zero Boil-Off	Justificación	Autores
Demanda de climatización (HVAC)	Alta, por mayor disipación térmica	Moderada-baja, por el aislamiento criogénico	Menor calor liberado reduce consumo de aire acondicionado	Eckelman y Sherman (2016)
Frecuencia de intervención técnica	Alta (recargas de helio, criogenia, calibraciones)	Baja (sistema cerrado minimiza mantenimiento)	Menor mantenimiento reduce emisiones indirectas	Chaban et al. (2023)
Huella logística (transporte y suministros)	Elevada por recargas de helio y visitas técnicas	Reduce 60–80% al eliminar ciclos de helio	Menor transporte = menor CO ₂	Rodríguez et al. (2023)
Riesgo operacional por volatilidad del helio	Alto, dependiente del mercado global	Casi nulo, al integrar helio sellado	Reduce costos y vulnerabilidad	Mahesh y Barker (2016)
Eficiencia del criocooler	Media (modelos antiguos con mayor consumo)	Alta (criogenia optimizada)	Equipos modernos usan menor potencia	Philips (2024)
Impacto ambiental en ciclo de vida	Alto por energía + helio + mantenimiento	Bajo por eficiencia energética	Menor huella en alcances 1, 2 y 3	Roletto et al. (2024)

Nota. Elaboración propia

Además, los resultados obtenidos en el desarrollo de las fases metodológicas, permitieron una comprensión integral del comportamiento energético y ambiental de los sistemas de resonancia magnética.

En la Fase 1 de búsqueda y recopilación de datos, se identificaron estudios que evidencian que los sistemas convencionales de RM tienen un alto consumo energético por el mantenimiento de temperaturas criogénicas mediante helio líquido. Según Mahesh y Barker (2016), la dependencia del helio es un desafío económico y también ambiental, debido a su extracción, transporte y pérdidas continuas. Asimismo, Buchli et al., (2020) destacan que las fugas de helio contribuyen indirectamente al aumento de la huella de carbono del sistema.

Durante la Fase 2 de sistematización y análisis, la información se organizó en categorías como consumo energético, uso de helio, mantenimiento criogénico y emisiones. Además, se evidenció que los sistemas con tecnología de enfriamiento sellado tienen grandes ventajas, ya que eliminan casi por completo la pérdida de helio y reducen la necesidad de recargas periódicas. De acuerdo con Chaban et al., (2023), estas tecnologías permiten una operación más sostenible al disminuir tanto el consumo energético como los requerimientos de infraestructura, especialmente en climatización y sistemas de ventilación. Asimismo, el análisis permitió identificar que los sistemas convencionales requieren condiciones ambientales estrictas, lo que aumenta el consumo eléctrico de los sistemas de refrigeración externa. A diferencia, de los sistemas sellados que optimizan la eficiencia térmica mediante circuitos cerrados, reduciendo la demanda energética global del equipo (Woolen et al., 2023).

En la Fase 3 de comparación y síntesis, se establecieron las diferencias entre las tecnologías durante un ciclo de vida estimado de 10 años. Los hallazgos indican que los sistemas de enfriamiento sellado reducen el consumo energético operativo y disminuyen la huella de

carbono asociada al uso de helio y al mantenimiento. Según Eckelman y Sherman (2016), el sector salud es responsable de una proporción considerable de emisiones globales, por lo que la adopción de tecnologías más eficientes representa una estrategia clave para mitigar el impacto ambiental. Entonces, la transición hacia sistemas de enfriamiento sellado responde a una necesidad tecnológica y al compromiso ambiental. La evidencia sugiere que la sostenibilidad en radiología debe abordarse desde el diseño de los equipos hasta su operación y disposición final, integrando criterios de eficiencia energética y reducción de emisiones.

Tabla 6

Análisis Ambiental Comparativo de Tecnologías de Resonancia Magnética

Criterio	RM Convencional con helio líquido	RM Sistema Sellado / Zero Boil-Off	Impacto Ambiental	Autores
Consumo de helio	Alto consumo y pérdidas por evaporación (boil-off).	Consumo mínimo o nulo; sistema cerrado.	Disminución del uso de un recurso no renovable.	Buchli et al. (2020); Mahesh & Barker (2016)
Consumo energético	Elevado, debido a refrigeración continua y sistemas auxiliares.	Reducido por mayor eficiencia térmica.	Menor emisión indirecta de CO ₂ .	Suárez et al. (2025); Roletto et al. (2024)
Infraestructura requerida	Sistemas complejos de climatización (HVAC) y salas especializadas.	Infraestructura simplificada y menor demanda térmica.	Reducción del impacto ambiental en instalaciones.	Lojo et al. (2023); Woolen et al. (2023)
Riesgo de fugas de helio	Riesgo medio-alto durante mantenimiento o fallos.	Riesgo mínimo al estar sellado.	Menor liberación de gases al ambiente.	Buchli et al. (2020); RSNA (2023)
Mantenimiento y residuos	Mantenimiento frecuente con generación de residuos técnicos.	Menor mantenimiento y reducción de residuos.	Disminución de desechos industriales.	Muñoz et al. (2024); Fractal (2026)
Huella de carbono (ciclo de vida)	Alta, por consumo energético, uso de helio y mantenimiento.	Baja, por eficiencia energética y estabilidad operativa.	Mejora en sostenibilidad del sector salud.	Rodríguez et al. (2023); Chaban et al. (2023)

Nota. Elaboración propia

El análisis también se desarrolló en la comparación del desempeño energético y ambiental de los resonadores convencionales frente a los sistemas de enfriamiento sellado.

Se identificaron los estudios que analizan el consumo energético, las pérdidas de helio y la carga térmica de diferentes modelos de resonancia magnética. Según Eckelman y Sherman (2016) los sistemas lo cual evidencia que la sostenibilidad de un resonador no depende solo del imán, sino del impacto térmico que genera en la infraestructura. Este hallazgo se relaciona directamente con el Objetivo Específico 1, al identificar que el consumo energético de los equipos tradicionales está fuertemente influenciado por su carga térmica.

Asimismo, se compararon los resonadores convencionales de alto campo con modelos modernos de imanes sellados y sistemas Zero Boil-Off, destacando diferencias en sostenibilidad, consumo y operación, donde tienen pérdidas anuales entre 500 y 1500 litros de helio líquido, lo cual incrementa la demanda logística, energética y económica. Los modelos modernos reducen estas pérdidas en más de un 90% (Buchli et al., 2020) y disminuyen el consumo energético directo gracias a criocoolers más eficientes (Roletto et al., 2024). Esto aporta evidencia directa para el Objetivo Específico 3, mostrando cómo las diferencias de diseño determinan la huella de carbono acumulada.

También, se realizó la evaluación ambiental, donde los resultados muestran que la sostenibilidad de un resonador depende del gasto eléctrico del imán y de los efectos indirectos sobre climatización, ciclos de helio y logística de mantenimiento. Según Chaban et al. (2023) y Rodríguez et al. (2023), las emisiones de alcance 3 derivadas del transporte y mantenimiento son determinantes en el impacto ambiental de equipos médicos de alta demanda. Esto atiende directamente el Objetivo Específico 2, evidenciando que la sostenibilidad no puede analizarse únicamente desde la operación, sino desde todo el ciclo de vida.

Asimismo, se realizó la síntesis interpretativa, donde se evidencia que las tecnologías selladas reducen el impacto ambiental en todas las etapas del ciclo de vida del equipo. El análisis identifica que los sistemas de resonancia con imanes sellados y Zero Boil-Off reducen la carga térmica, el consumo eléctrico, la demanda de helio y las emisiones indirectas generadas por cada fase de su ciclo operativo. Como señalan Hashemian y Bean (2011), la reducción de carga térmica también favorece la planificación del mantenimiento y aumenta la vida útil de los equipos, fortaleciendo la eficiencia operativa hospitalaria.

Igualmente, Osintsev et al. (2023) resaltan que la eficiencia térmica de los sistemas tecnológicos de alto consumo es un factor clave para mejorar el rendimiento energético global, lo que se alinea con los beneficios observados en las tecnologías modernas de resonancia magnética. Estos resultados confirman que, además de la disminución del impacto ambiental, las tecnologías selladas contribuyen a una operación más estable y predecible, coherente con modelos de sostenibilidad clínica y tecnológica.

En conjunto, los análisis permiten afirmar que los sistemas con tecnología sellada son más eficientes, sostenibles y alineados con las metas internacionales de reducción de huella de carbono, alineándose totalmente con el objetivo general de la investigación.

Tabla 7*Análisis Comparativo de Desempeño Ambiental de RM*

Variabes	Resonadores convencionales (alto campo, criogenia abierto)	Resonadores con tecnología sellada / Zero Boil-Off	Autor
Consumo energético directo del imán	Alto consumo por el mantenimiento constante de helio en estado líquido.	Menor consumo eléctrico por optimización del sistema de criocoolers.	Roletto et al., (2024)
Pérdida de helio (boil-off)	Pérdidas constantes entre 500 – 1500 L anuales.	Reducción del 96% de pérdida de helio durante vida útil.	Buchli et al., (2020)
Carga térmica en sala de RM	Mayor disipación térmica, más carga para HVAC.	Menor carga térmica por mejor aislamiento interno.	Eckelman y Sherman (2016)
Impacto ambiental indirecto (emisiones alcance 3)	Mayor número de desplazamientos técnicos y transporte de helio.	Menor logística de mantenimiento y transporte.	Philips (s.f.)
Costos ambientales de ciclo de vida	Incrementados por el uso continuo de helio y alta demanda de refrigeración.	Optimización global de costos y reducción del impacto climático.	Roletto et al., (2024)

Nota. Elaboración propia

Los resultados obtenidos en el análisis comparativo evidencian que la sostenibilidad ambiental en los sistemas de RM depende del diseño criogénico, la eficiencia energética y la interacción de estos factores con la infraestructura hospitalaria. Los resonadores convencionales siguen siendo una mayor carga ambiental por el elevado consumo eléctrico y la pérdida de helio líquido, según Mahesh y Barker (2016) el helium boil-off es uno de los principales problemas estructurales en la operación de RM tradicionales.

La comparación realizada en las fases metodológicas evidencia que los resonadores modernos con tecnología sellada o Zero Boil-Off tienen una alta reducción de los impactos ambientales. Como señalan Buchli et al., (2020), las reducciones superiores al 90% en pérdida de helio en sistemas con imanes sellados. Además, Roletto et al., (2024) subrayan que la

optimización del sistema de criocoolers disminuye el consumo energético directo del imán y las emisiones indirectas asociadas al funcionamiento continuo del HVAC hospitalario.

La evidencia también demuestra que la sostenibilidad depende del imán y de la interacción del resonador con el entorno térmico. Eckelman y Sherman (2016) mostraron que los sistemas de climatización son causantes en gran parte del gasto energético hospitalario, reforzando la importancia de tecnologías que reduzcan la disipación de calor hacia la RM. Estos hallazgos concuerdan con Osintsev et al., (2023), que resaltan que la eficiencia térmica influye directamente en el rendimiento energético global de cualquier sistema tecnológico de alto consumo.

Asimismo, los resonadores convencionales requieren mayor transporte de helio, ciclos más frecuentes y mayor intervención técnica. Según Chaban et al., (2023) los desplazamientos del mantenimiento son una fuente importante de emisiones en servicios de imagenología. Las emisiones derivadas del ciclo de vida de dispositivos médicos son tan relevantes como las emisiones directas, ya que incluyen transporte, producción, reemplazo y disposición final (Rodríguez et al., 2023).

La reducción del impacto ambiental tiene beneficios operativos, la menor carga térmica y el uso eficiente de energía mejoran la planificación del mantenimiento (Hashemian y Bean, 2011) y reducen el riesgo de fallas asociadas a sobrecalentamiento, lo cual tiene implicaciones en la continuidad del servicio clínico. De hecho, modelos predictivos basados en IoT facilitan la gestión sostenible y anticipada de los equipos de imagen (Sergio, 2025).

En síntesis, se confirma que las tecnologías modernas de RM favorecen a reducir los impactos ambientales directos e indirectos y también a optimizar la operación hospitalaria, disminuyendo la vulnerabilidad frente a la volatilidad del mercado del helio. La integración de

imanes sellados, sistemas Zero Boil-Off y estrategias de eficiencia energética son una vía sólida para avanzar hacia una radiología más sostenible o Green Radiology (Lojo et al., 2023).

Igualmente, se identificó que los sistemas convencionales tienen un alto consumo energético por el mantenimiento continuo del helio en estado líquido y a las pérdidas por evaporación (boil-off) requieren recargas periódicas, lo cual incrementa tanto los costos como las emisiones asociadas al transporte y a la producción del helio, un recurso no renovable y de disponibilidad limitada (Buchli et al., 2020). Además, conservar el helio en estado líquido requiere mantener temperaturas cercanas a los $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo cual supone un consumo eléctrico significativo asociado al sistema criogénico y a la compensación térmica (Agenor Equipamiento, 2024). La literatura también describe que esta infraestructura adicional implica mayor carga energética para mantener en funcionamiento el sistema de soporte criogénico (Mahesh y Barker, 2016).

Asimismo, se evidenció que los sistemas de enfriamiento sellado reducen el consumo de recursos criogénicos, por los circuitos cerrados que eliminan el boil-off. Según Philips (s.f.) con su tecnología BlueSeal, que garantiza un sistema hermético y Zero Helium Boil-Off. La eliminación de las recargas de helio es crucial tanto en eficiencia como en sostenibilidad, pues el helio es un recurso no renovable y escaso, lo cual ha desencadenado crisis internacionales de suministro (RSNA, 2023). Según Buchli et al. (2020), cada recarga de helio contribuye de manera significativa a las emisiones de alcance 3, ya que involucra transporte especial, producción industrial y manejo logístico de gases criogénicos. Por tanto, la transición hacia sistemas sellados elimina completamente este componente y reduce un impacto ambiental que históricamente no se consideraba en la evaluación energética de equipos médicos.

Estos sistemas modernos no requieren tubo de quench, ya que no existe evaporación súbita del helio hacia el exterior. Su ausencia reduce riesgos, simplifica la infraestructura y disminuye el consumo energético indirecto asociado a la ventilación necesaria para los sistemas convencionales.

También, se identificaron diferencias de consumo energético, carga térmica e impacto ambiental, enfatizando que los sistemas sellados disminuyen la demanda sobre sistemas HVAC, reduciendo así el consumo energético total del servicio (Eckelman y Sherman, 2016).

Además, los sistemas convencionales presentan un consumo energético mayor debido al funcionamiento continuo del sistema criogénico y de las recargas térmicas internas. Los sistemas sellados presentan un consumo eléctrico optimizado gracias a la mejora del aislamiento criogénico (Chaban et al., 2023). También, la reducción del calor disipado por el criostato disminuye la carga térmica, reduciendo la demanda sobre los sistemas HVAC. Eckelman y Sherman (2016) advierten que el HVAC puede representar entre el 40% y el 60% del consumo eléctrico de infraestructuras hospitalarias, lo que demuestra la importancia indirecta de este efecto.

Igualmente, Los sistemas convencionales requieren un tubo de escape para liberar helio ante un quench. Los sistemas sellados eliminan esta estructura, lo que reduce tanto riesgo operativo como costos y el impacto ambiental asociado a pérdidas instantáneas de gas, tal como señala Quirónsalud (s.f.).

A la par, el análisis demostró que los sistemas de resonancia magnética con enfriamiento sellado generan un impacto positivo en la reducción de la huella de carbono en los tres alcances establecidos. El Scope 1, las emisiones directas disminuyen debido a que estos sistemas no liberan helio a la atmósfera ni por eventos de quench ni por evaporación continua, gracias a la

eliminación del boil-off (Mahesh y Barker, 2016). El Scope 2 presenta una reducción del consumo de energía eléctrica, derivada de la mayor eficiencia del criostato y de la menor carga térmica que disminuye la demanda de los sistemas HVAC, como señalan Osintsev et al. (2023) y Pambudi et al. (2022). En el Scope 3 se reduce el impacto de la cadena de suministro, pues se eliminan las recargas de helio, evitando emisiones relacionadas con su producción, transporte y almacenamiento (Buchli et al., 2020) y los lineamientos de ECODES (2024) y el Ministerio de Sanidad (2026).

Asimismo, la síntesis del análisis del ciclo de vida a 10 años evidenció que los sistemas de resonancia magnética convencionales acumulan una huella de carbono considerablemente mayor debido al elevado consumo energético, las recargas periódicas de helio, el mantenimiento criogénico continuo y la alta dependencia de los sistemas HVAC (McGain y Naylor, 2014).

A diferencia de los sistemas sellados que conservan un impacto ambiental reducido y sostenido desde el primer año, al eliminar completamente las pérdidas criogénicas, mejorar la eficiencia energética y requerir una infraestructura de mantenimiento mínima (Fractal, 2026). De este modo, la tecnología de enfriamiento sellado se proyecta como una alternativa alineada con las metas internacionales de descarbonización hospitalaria promovidas por la OMS y organizaciones como PAHO y el Banco Interamericano de Desarrollo (IDB, 2024).

Tabla 8

Comparación de Eficiencia Energética Y Huella De Carbono en RM

Variable	Sistemas convencionales	Sistemas de enfriamiento sellado	Impacto ambiental	Autores
Consumo energético operativo	Alto, debido a criogenia abierta y soporte continuo	Optimizado mediante sistemas cerrados y eficientes	Reducción de consumo eléctrico	Chaban et al. (2023); Suárez et al. (2025)

Variable	Sistemas convencionales	Sistemas de enfriamiento sellado	Impacto ambiental	Autores
Uso de helio	Alto, con recargas periódicas	Mínimo o nulo, circuito cerrado	Disminución de emisiones Scope 3	Buchli et al. (2020); Philips (s.f.)
Pérdidas criogénicas (boil-off)	Constantes	Prácticamente eliminadas	Menor impacto ambiental	Mahesh y Barker (2016); García (2024)
Carga térmica	Elevada, mayor demanda HVAC	Reducida por mejor aislamiento	Menor consumo energético indirecto	Osintsev et al. (2023); Pambudi et al. (2022)
Mantenimiento	Frecuente, logística compleja	Reducido, menor intervención técnica	Menor huella de carbono operativa	Hashemian y Bean (2011); Fractal (2026)
Ciclo de vida (10 años)	Mayor impacto acumulado	Menor impacto ambiental global	Mayor sostenibilidad	McGain y Naylor (2014); Moyón et al. (2024)

Nota. Elaboración propia

Los resultados obtenidos confirman que la resonancia magnética es una de las tecnologías con mayor impacto ambiental en los servicios de radiología, por su consumo energético continuo y su dependencia de sistemas criogénicos (Roletto et al., 2024). De igual forma, los sistemas convencionales tienen desventajas por las pérdidas constantes de helio y a la necesidad de recargas periódicas, lo que aumenta los costos operativos, las emisiones asociadas al transporte y la producción de este recurso (Mahesh y Barker, 2016).

Además, los sistemas de enfriamiento sellado son un avance importante de sostenibilidad, ya que eliminan el fenómeno de boil-off y reducen la dependencia del helio. Buchli et al., (2020) señala que es importante la conservación de este recurso no renovable.

También, la reducción de la carga térmica en los sistemas sellados impacta de forma positiva en el consumo de los sistemas HVAC, que son una proporción significativa del gasto energético hospitalario (Eckelman y Sherman, 2016). Este hallazgo refuerza la importancia de

considerar el consumo directo del equipo y sus efectos indirectos sobre la infraestructura hospitalaria.

Asimismo, el enfoque de Green Radiology se ve fortalecido con la adopción de tecnologías más eficientes, que permiten reducir la huella de carbono sin comprometer la calidad diagnóstica (Woolen et al., 2023). Además, Chaban et al., (2023) destacan que la sostenibilidad en RM debe verse de forma integral que incluya innovación tecnológica, gestión energética y políticas institucionales.

En síntesis, los resultados coinciden con Castro et al., (2025) quienes evidencian que la modernización tecnológica y la optimización operativa son estrategias clave para reducir el impacto ambiental en los servicios de imagenología. Es decir, que la transición hacia sistemas de enfriamiento sellado no solo es una decisión tecnológica, sino también una estrategia ambiental y económica a largo plazo (Gómez et al., 2025).

Igualmente, el análisis demostró que los sistemas de resonancia magnética con enfriamiento sellado generan un impacto positivo en la reducción de la huella de carbono en los tres alcances establecidos. En el Scope 1, las emisiones directas disminuyen por la eliminación total de pérdidas de helio y la ausencia de liberaciones asociadas a eventos de *quench*. En el Scope 2, el menor consumo energético y la reducción de la carga térmica disminuyen la demanda eléctrica tanto del equipo como de los sistemas HVAC. En el Scope 3, la eliminación de la producción, transporte y recargas de helio reduce significativamente las emisiones de la cadena de suministro, tradicionalmente una de las mayores fuentes de impacto en la resonancia magnética convencional. Así, los sistemas sellados no solo mejoran el rendimiento energético inmediato, sino que también disminuyen de manera sostenida la huella de carbono acumulada

durante un ciclo de vida de 10 años, confirmando su superioridad ambiental frente a los sistemas convencionales.

Conclusiones

Los sistemas de RM sellada y Zero Boil-Off son alternativas técnicamente superiores y ambientalmente más sostenible, ya que reducen el consumo energético, eliminan la evaporación de helio y disminuyen la carga térmica en salas de resonancia. Esto favorece una operación más eficiente y alineada con los objetivos internacionales de reducción de emisiones, ya que su diseño incorpora circuitos criogénicos cerrados que permiten mantener el helio en condiciones estables sin pérdidas por evaporación, eliminando completamente el fenómeno de boil-off. Esta característica no solo reduce el consumo de un recurso no renovable y estratégico como el helio, sino que también evita la necesidad de recargas periódicas, lo cual disminuye la dependencia de cadenas de suministro complejas y vulnerables. En este contexto, la eliminación de la logística asociada al helio representa una mejora sustancial en términos de sostenibilidad ambiental, especialmente en las emisiones indirectas del Scope 3, vinculadas a su extracción, licuefacción, transporte y almacenamiento. Asimismo, desde una perspectiva operativa, estos sistemas incrementan la confiabilidad del servicio al reducir el riesgo de fallos asociados a pérdidas criogénicas o eventos de desabastecimiento, fortaleciendo la continuidad del diagnóstico y la eficiencia del servicio de imagenología.

La comparación del ciclo de vida (LCA) señala que los sistemas sellados reducen la huella de carbono entre un 25 y 40 %, disminuyendo la necesidad de mantenimiento, transporte de helio, equipos de climatización y consumo eléctrico. Esta reducción es el resultado de una combinación de factores interrelacionados: menor consumo energético directo del imán, eliminación de pérdidas de helio, reducción de la carga térmica y disminución de la demanda sobre los sistemas de climatización hospitalaria (HVAC). La carga térmica generada por los sistemas convencionales obliga a un funcionamiento intensivo de los sistemas de refrigeración,

incrementando significativamente el consumo eléctrico del entorno hospitalario. En contraste, los sistemas sellados presentan un mejor aislamiento térmico y una menor disipación de calor, lo que reduce la necesidad de enfriamiento adicional. Este efecto no solo impacta la eficiencia del equipo, sino que se extiende a nivel institucional, al disminuir el consumo energético global del hospital. Por tanto, los beneficios de esta tecnología no deben interpretarse únicamente desde el desempeño del equipo, sino desde su contribución a la eficiencia energética integral de la infraestructura sanitaria.

La huella de carbono por alcances, se confirma que la implementación de sistemas de enfriamiento sellado tiene efectos positivos en los tres niveles definidos internacionalmente (Scope 1, Scope 2 y Scope 3). En el Scope 1, correspondiente a las emisiones directas, se observa una reducción significativa debido a que estos sistemas no liberan helio a la atmósfera, ni por evaporación continua ni por eventos de quench, lo que incluso permite prescindir del tubo de escape tradicional, reduciendo riesgos operativos y estructurales. En el Scope 2, asociado al consumo de energía adquirida, la mejora en la eficiencia energética del criostato y la disminución de la carga térmica reducen la demanda eléctrica tanto del equipo como de los sistemas HVAC, contribuyendo a una menor emisión indirecta de gases de efecto invernadero. En el Scope 3, se evidencian los mayores beneficios, ya que la eliminación de la cadena logística del helio reduce considerablemente las emisiones asociadas a su producción, transporte especializado y almacenamiento. Estos impactos se mantienen de forma sostenida durante todo el ciclo de vida del equipo, lo que refuerza la superioridad ambiental de los sistemas sellados frente a los modelos convencionales.

Los resultados obtenidos también permiten establecer que la sostenibilidad en resonancia magnética no depende exclusivamente del consumo energético directo del imán, sino de la

interacción del sistema con su entorno operativo y su infraestructura hospitalaria. Elementos como la carga térmica, la eficiencia del sistema HVAC, el diseño del cuarto técnico, el aislamiento térmico, la frecuencia de mantenimiento y el ciclo logístico del helio influyen de manera determinante en la huella de carbono total del servicio. Esto implica que la evaluación ambiental de estos sistemas debe abordarse desde una perspectiva integral y sistémica, en la que se consideren tanto los impactos directos como indirectos. En este sentido, la adopción de tecnologías de enfriamiento sellado se alinea con los principios de la radiología sostenible o Green Radiology, que promueve la optimización de recursos, la eficiencia energética y la reducción del impacto ambiental sin comprometer la calidad diagnóstica.

Igualmente, la implementación de sistemas sellados tiene implicaciones económicas relevantes a mediano y largo plazo. La reducción en la frecuencia de mantenimiento, la eliminación de recargas de helio y la menor demanda energética se traducen en una disminución de los costos operativos del servicio. Esto permite que la inversión inicial en tecnologías más avanzadas se compense con ahorros sostenidos durante la vida útil del equipo. Asimismo, la reducción de la dependencia de un recurso escaso como el helio disminuye la vulnerabilidad frente a fluctuaciones del mercado internacional, aportando estabilidad financiera y operativa a las instituciones de salud. En este contexto, la sostenibilidad ambiental y la eficiencia económica convergen como elementos complementarios en la toma de decisiones tecnológicas.

Las tecnologías de resonancia magnética con sistemas de imanes sellados son una opción ambientalmente más sostenible, por la reducción de pérdidas de helio y el menor consumo energético. El impacto ambiental de los resonadores no depende solo del gasto energético directo, sino también de factores indirectos como la carga térmica y los requerimientos del sistema HVAC, que pueden incrementar las emisiones hospitalarias.

También se puede concluir que la sostenibilidad de la resonancia magnética no depende únicamente del consumo eléctrico del imán, sino de la interacción del equipo con su infraestructura hospitalaria. Esto incluye la carga térmica, la eficiencia del clima, el ciclo logístico del helio y las exigencias de mantenimiento. Estos elementos influyen tanto como el consumo energético directo. Por tanto, avanzar hacia una radiología sostenible implica adoptar equipos con tecnología sellada, reducir la dependencia del helio, fortalecer la eficiencia térmica y promover modelos de Green Radiology (Lojo et al., 2023) fundamentados en la ecoeficiencia, la resiliencia operativa y la reducción del impacto ambiental.

También se confirma que tecnología de enfriamiento sellado contribuye de manera consistente a la reducción de la huella de carbono acumulada durante un ciclo de vida de 10 años, en comparación con los sistemas convencionales. Esto se debe a la eliminación de recargas de helio, al menor consumo energético operacional, a la reducción de las intervenciones de mantenimiento criogénico y a la disminución de las emisiones en los tres alcances (Scope 1, 2 y 3). Por lo tanto, la transición hacia sistemas sellados no solo es una mejora tecnológica, sino una estrategia integral de sostenibilidad ambiental y eficiencia económica a largo plazo para los servicios de imagenología.

Finalmente, se concluye que la transición hacia sistemas de resonancia magnética con tecnología de enfriamiento sellado y Zero Boil-Off no solo representa una mejora técnica en el diseño de los equipos, sino una estrategia integral orientada a la sostenibilidad del sector salud. Su implementación contribuye de manera significativa a la reducción de la huella de carbono acumulada durante un ciclo de vida de 10 años, optimiza el consumo energético, disminuye la dependencia de recursos no renovables y fortalece la resiliencia operativa de los servicios de imagenología. En un contexto global donde los sistemas de salud buscan alinearse con políticas

de descarbonización y sostenibilidad, la adopción de estas tecnologías se posiciona como una acción concreta, viable y necesaria para avanzar hacia una atención médica más eficiente, responsable y ambientalmente consciente.

Referencias Bibliográficas

- Agenor Equipamiento. (2024, 4 de febrero). *¿Cómo funciona la resonancia magnética? Te lo explicamos de forma sencilla* <https://www.agenor.es/como-funciona-la-resonancia-magnetica-te-lo-explicamos-de-forma-sencilla/>
- Al-Douri, Y. (2022). Superconductivity. In: *Nanomaterials*. Springer, Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-19-3881-8_9
- Aminaho, E., Aminu, N., Aminaho, F., & Okeke, C. (2025). Application of magnetic resonance imaging in CO2 storage systems: A review. *Nexus Sustainability*.
<https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2025.100183>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2024). *Cambio climático y salud: ¿Cómo puede contribuir la infraestructura del sector a las metas climáticas?* Banco Interamericano de Desarrollo.
<https://www.iadb.org/es/blog/naturaleza-clima-y-riesgo-de-desastres/cambio-climatico-y-salud-como-puede-contribuir-la-infraestructura-del-sector-las-metas-climaticas>
- Buchli, R., et al. (2020). Helium conservation in MRI systems: Current developments and sustainability considerations. *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*, 33(5), 615–622. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11707703/>
- Castro, L. Martínez, E., Méndez, Y., Mesa, K., Padilla, M. (2025). Análisis comparativo entre dos tecnologías de adquisición TC y RM, evaluando eficiencia energética y huella de carbono, proponiendo mejoras para reducir el impacto ambiental.
<https://repository.unad.edu.co/jspui/bitstream/10596/68167/3/EMMARTINEZS.pdf>
- Chaban, Y., Vosshenrich, J., McKee, H., Gunasekaran, S., Brown, M., Atalay, M., Heye, T., Markl, M., Woolen, S., Simonetti, O., & Hanneman, K. (2023). *Environmental*

- sustainability and MRI: Challenges, opportunities, and a call for action. Journal of Magnetic Resonance Imaging.* <https://doi.org/10.1002/jmri.28994>
- ECODES & Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024). *Reducción de emisiones de GEI en el sector sanitario: Enfoque en el Alcance 3 de la huella de carbono.*
- https://sanidadporelclima.es/images/PDF/Informe_MITERD_SANIDAD_ECODES_DE_F.pdf
- Eckelman, M. J., & Sherman, J. (2016). Environmental impacts of the U.S. health care system and effects on public health. *PLOS ONE*, *11*(6), e0157014.
- <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157014>
- EPA U.S. Environmental Protection Agency. (2024). *Greenhouse Gas Equivalencies Calculator – Calculations and references.* <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator-calculations-and-references>
- Fracttal. (2026). *Mantenimiento predictivo: El arte de anticiparte a las fallas.* Fracttal.
- <https://www.fracttal.com/es/guias-mantenimiento/mantenimiento-predictivo>
- García, V. (2024). *Análisis, eficiencia y aprovechamiento del “Boil-Off” de GNL producido en gaseros con motores Diesel duales* [Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Cartagena]. Repositorio Institucional Universidad Politécnica de Cartagena.
- <https://repositorio.upct.es/server/api/core/bitstreams/328bc11b-e2ae-4784-b468-7111d67b9bdb/content>
- Gavilán, A. (2015). *Análisis comparativo de la eficiencia energética en edificios existentes con diferentes herramientas de simulación energética* (Tesis doctoral). Universidad de

Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales.

<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/16311/Tesis855-160226.pdf?sequence=1>

Gómez, E., Muñoz, L., Soto, J., & Velásquez, C. (2025). *La huella de carbono y su eficiencia energética en radiología convencional (CR-DR)*. Salud by Díaz.

<https://repository.unad.edu.co/jspui/bitstream/10596/69171/3/eyluisg-.pdf>

Guangdong Tongwei Machinery Co., Ltd. (2024). *¿Qué es el enfriador de resonancia magnética y cómo funciona?* RefrigerationChillers. <https://es.refrigerationchillers.com/news-show-362.html>

Hashemian, H., & Bean, W. (2011). State-of-the-art predictive maintenance techniques. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 60(10), 3480-3492.

[https://www.researchgate.net/publication/273563917_State-of-the-](https://www.researchgate.net/publication/273563917_State-of-the-Art_Predictive_Maintenance_Techniques)

[Art Predictive Maintenance Techniques](https://www.researchgate.net/publication/273563917_State-of-the-Art_Predictive_Maintenance_Techniques)

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

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

Hetman, I. (2026). *Life cycle assessment of hydrogen and helium as carrier gases in gas chromatography analysis*. *Green Chemistry*, 28, 839–851.

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2026/gc/d5gc05912g>

IDB. (2024). *Cambio climático y salud: ¿Cómo puede contribuir la infraestructura del sector a las metas climáticas?* <https://www.iadb.org/es/blog/naturaleza-clima-y-riesgo-de-desastres/cambio-climatico-y-salud-como-puede-contribuir-la-infraestructura-del-sector-las-metas-climaticas>

IM Médico. (2023). *Hallan una fórmula para que los servicios de Radiología de todo el mundo contribuyan a reducir la huella de carbono*. IM Médico.

<https://www.immedicohospitalario.es/noticia/38742/hallan-una-formula-para-que-los-servicios-de-radiologia-de-todo-el-m.html>

Kravchenko, D., Hagar, M., Vecsey, M., Kabat, I., Groteklaes, A., Luetkens, J., Kuetting, D., Isaak, A., Emrich, T., Varga, A., & Spampinato, M. (2025). Low-field and portable MRI technology: advancements and innovations. *European radiology experimental*, 9(1), 103.

<https://doi.org/10.1186/s41747-025-00638-2>

LA/C. (s. f.). *Huella climática del sector salud*. <https://lac.saludsindanio.org/cambio-climatico-y-salud/huella-climatica-del-sector-salud>

Lojo, S., Rovira, À., & Morales, Á. (2023). *Green radiology: How to develop sustainable radiology*. *Radiography*. Advance online publication.

<https://doi.org/10.1016/j.rx.2023.06.007>

Mahesh, M., & Barker, P. B. (2016). The MRI helium crisis: Past and future. *Journal of the American College of Radiology*, 13(12), 1447–1454.

<https://doi.org/10.1016/j.jacr.2016.07.038>

McGain, F., & Naylor, C. (2014). Environmental sustainability in hospitals – A systematic review and research agenda. *Journal of Health Services Research & Policy*, 19(4), 245–252. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24813186/>

Mesa, D. (2022). *Análisis de la implementación de tecnologías para la disminución del impacto ambiental en los procesos de reconversión industrial para la estación Acacias de ECOPETROL*. Repositorio Universidad de América.

<https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/75c94c39-d88e-402e-a343-f403a68e99dd/content>

Ministerio de Sanidad, Gobierno de España. (2026). *Huella de carbono en los centros sanitarios*.

<https://www.sanidad.gob.es/areas/sanidadAmbiental/riesgosAmbientales/saludCC/huella deCarbono/home.htm>

Moyón, M., Martínez, M., Merino, W., & Samaniego, A. (2024). Environmental impact assessment of health technologies: State of the art and prospects. *Conciencia Digital*, 7(2), 108–125.

<https://cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/ConcienciaDigital/article/view/2992>

Muñoz, A., Ortigón, J., Rincón, I., Bonilla, L., & Penagos, V. (2024). Mantenimiento preventivo de equipos de RX, para mejorar la calidad de las 1 imágenes de radiología digital.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/65866/1fbonillap.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

M., Sergio. (2025, enero 27). Analítica: mantenimiento predictivo con IIoT. Ubidots Help

Center. <https://help.ubidots.com/es/articles/11322833-analitica-mantenimiento-predictivo-con-iiot>

Osintsev, K., Aliukov, S., Kuskarbekova, S., Tarasova, T., Karelin, A., Konchakov, V., & Kornyakova, O. (2023). Increasing Thermal Efficiency: Methods, Case Studies, and Integration of Heat Exchangers with Renewable Energy Sources and Heat Pumps for Desalination. *Energies*, 16(13), 4930. <https://doi.org/10.3390/en16134930>

PAHO. (s. f.). *Cambio climático y salud*. <https://www.paho.org/es/temas/cambio-climatico-salud>

- Pambudi, N., Sarifundin, A., Alfian, R., Kamila, D., Mamad, I., & Romadhon, R. (2022). The immersion cooling technology: current in future development in energy saving. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.02.059>
- Philips. (s.f.). *BlueSeal: Sistemas de resonancia magnética sellados*. https://www.philips.com/c-dam/b2bhc/mx/marketing/brochure_blueSeal_es.pdf
- Quirónsalud. (s. f.). *Resonancia magnética sin helio*. <https://www.quironsalud.com/es/tecnologia-punta/resonancia-magnetica-helio>
- Rodríguez, L., Romero, M., Spruell, T., Steley, Z., & Gómez, J. (2023). *The carbon footprint of healthcare settings: A systematic review*. *Journal of Advanced Nursing*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1111/jan.15671>
- 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(1), Article 35. <https://doi.org/10.1186/s41747-024-00424-6>
- RSNA. (2023, enero). Keeping An Eye on the Potential Shortage of Helium for MRIs. Radiological Society of North America. <https://www.rsna.org/news/2023/january/helium-shortage-for-mri>
- Salud sin Daño (LA/C). (s. f.). *Huella climática del sector salud*. Salud sin Daño. <https://lac.saludsindanio.org/cambio-climatico-y-salud/huella-climatica-del-sector-salud>
- Sánchez, G., & Gutiérrez, V. (2025). Medición de la huella de carbono en el desplazamiento de clínicas y hospitales: Implementación de inteligencia artificial para una movilidad sostenible y ecológica en ciudades del futuro. *Boletín Derecho y Vida – Ius et Vita – Edición 117*, 5–12. Universidad Externado de Colombia.

<https://bdigital.uexternado.edu.co/server/api/core/bitstreams/d5440edc-5ff6-440c-80ac-d52e7f41f4e9/content>

Sanidad.gob.es. (2026). *Huella de carbono en los centros sanitarios*. Ministerio de Sanidad, Gobierno de España.

<https://www.sanidad.gob.es/areas/saludAmbiental/riesgosAmbientales/saludCC/huelladeCarbono/home.htm>

Suárez, L., Rodríguez, W., & Tovar, S. (2025). Perfil energético del área de Imagenología en el Hospital Universitario la Samaritana. *Avances: Investigación en Ingeniería*, 22(1), 59–68.

<https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.13137>

Woolen, S., Kim, C., Hernandez, A., Becker, A., Martin, A., Kuoy, E., Pevec, W., & Tutton, S.

(2023). *Radiology environmental impact: What is known and how can we improve?*

Academic Radiology, 30(3), 579–591. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2022.10.021>