

Artículo Original

Evaluación cuantitativa y cualitativa del ruido en resonancia magnética. Valores medidos, normas ISO-9612 y efectos biológicos

Quantitative and qualitative evaluation of noise in magnetic resonance imaging. Measured values, ISO-9612 standards and biological effects

 Valdez Velázquez, Nelson Andrés¹;  Klassen Esau, Rafael²

¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física | San Lorenzo, Paraguay.

²Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Radiología e Imagenología | San Lorenzo, Paraguay.

Como referenciar este artículo | How to reference this article:

Valdez Velázquez, N.; Klassen Esau, R. Evaluación Cuantitativa y Cualitativa del Ruido en Resonancia Magnética. Valores medidos, Normas ISO-9612 y Efectos Biológicos. *An. Fac. Cienc. Méd. (Asunción) 2026; 59(1): e59012617.*

RESUMEN

El presente trabajo se centra en la Evaluación del Ruido Magnético basado en los niveles de presión sonora y el impacto en la salud del personal expuesto y de los pacientes en un Servicio de Resonancia Magnética de la Ciudad de Asunción. **Objetivos:** aplicación de fórmulas a los valores de presión sonora medidos con un sonómetro, conforme al modelo analítico de la norma ISO-9612. Además, se consultaron bases de datos científicas con el fin de identificar los posibles efectos biológicos. **Materiales:** Equipo de Resonancia Magnética General Electric, Signa Prime 1.5T AIR Recon DL, Sonómetro Quest Technologies 1900 e, Sonómetro PCE-322A, Modelo Analítico ISO-9612. **Métodos:** Se realizaron mediciones in situ de los niveles de ruido, se aplicó la Estrategia de Medición Basada en Tareas de la norma ISO 9612 para calcular la exposición acústica diaria ponderada de 8 horas del personal clínico y finalmente, se llevó a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica para identificar los posibles efectos biológicos de la exposición al ruido en el personal y los pacientes. **Resultados:** Los niveles de ruido dentro de la sala del equipo alcanzan picos de hasta 93 dBA y las mediciones en la sala de comandos se mantuvieron dentro de límites aceptables. El nivel de exposición sonora calculada indicó que el riesgo ocupacional de pérdida auditiva crónica es clasificado como bajo. Finalmente, los efectos biológicos observados son consistentes con los niveles de ruido medidos. Existen efectos causados por la intensidad del estrés acústico y otros posibles efectos reportados que no pueden ser descartados si las medidas de protección fallan.

Palabras claves: Imagen por Resonancia Magnética, Ruido, Control del Ruido, Umbral Auditivo, Exposición Profesional, Fenómenos Fisiológicos, ISO 9612.

Autor correspondiente: Nelson Andrés Valdez Velázquez. Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física | San Lorenzo, Paraguay. **Email:** nvaldez@facen.una.py.

Editor responsable:  Prof. Dr. Hassel Jimmy Jiménez*,  Dra. Lourdes Talavera*.

*Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Médicas. San Lorenzo, Paraguay.

Fecha de recepción el 29 de enero del 2026; aceptado 26 de marzo del 2026.

ABSTRACT

This study focuses on the evaluation of magnetic noise based on sound pressure levels and its impact on the health of exposed personnel and patients in a Magnetic Resonance Imaging (MRI) service in the city of Asunción. **Objectives:** To evaluate noise exposure by applying the analytical formulas of the ISO 9612 standard to sound pressure levels measured with a sound level meter. Scientific databases were also consulted to identify potential biological effects. **Materials:** General Electric Signa Prime 1.5T AIR Recon DL MRI scanner, Quest Technologies 1900 e sound level meter, PCE-322A sound level meter, ISO-9612 analytical model. **Methods:** On-site noise level measurements were taken. The Task-Based Measurement Strategy of ISO 9612 was applied to calculate the 8-hour time-weighted average daily noise exposure of clinical staff. Finally, a comprehensive literature review was conducted to identify the potential biological effects of noise exposure on staff and patients. **Results:** Noise levels within the equipment room reached peaks of up to 93 dBA, while measurements in the control room remained within acceptable limits. The calculated noise exposure level indicated that the occupational risk of chronic hearing loss is classified as low. Finally, the observed biological effects are consistent with the measured noise levels. Effects caused by the intensity of acoustic stress and other reported potential effects cannot be ruled out if protective measures fail.

Key words: Magnetic Resonance Imaging, Noise, Noise Control, Auditory Threshold, Occupational Exposure, Physiological Phenomena, ISO 9612.

Introducción

Se presenta los componentes físicos más importantes de un equipo de resonancia magnética según ^(1,2). El imán principal es el componente del cuál se deducen las características del resonador magnético, compuesto por una bobina superconductora que genera el campo magnético estático (B0) de alta intensidad (entre 0,5 a 3 T en el ámbito clínico). Las bobinas de gradiente operan a temperatura ambiente y crean campos magnéticos locales al encenderse y apagarse. Las bobinas de radiofrecuencia (RF) emiten los pulsos que excitan los protones y actúan como antenas receptoras para detectar la señal emitida por los tejidos durante la relajación.

El ruido en un equipo de resonancia magnética se produce debido a las fuerzas de Lorentz: cuando las corrientes eléctricas pasan por las bobinas de gradiente dentro del campo magnético principal (B0), las bobinas experimentan fuerzas mecánicas que las hacen vibrar. Estas vibraciones se transmiten

al aire y a la estructura del equipo, generando el ruido característico que se define como impulsivo ⁽³⁾. El blindaje pasivo propone añadir una estructura cilíndrica de material conductor (como cobre o aluminio) que rodea la bobina de gradiente. Funciona de la manera que cuando la bobina intenta vibrar, este escudo pasivo genera corrientes de Foucault que crean sus propios campos magnéticos que se oponen al movimiento, disminuyendo así la generación de ruido acústico ⁽⁴⁾.

Respecto a la física del fenómeno, el sonido es una perturbación mecánica que se propaga en un medio elástico en forma de ondas de presión. La acústica se entiende como el estudio de la generación, transmisión y recepción de estas ondas. En cuanto a la percepción humana, el oído responde a la intensidad sonora de forma logarítmica. Por esta razón, se emplea el decibel (dB) como unidad adimensional y comparativa ^(5,6).

El instrumento diseñado para registrar el nivel de presión sonora de forma similar a la

percepción del oído humano es el sonómetro. El sonómetro consta de un micrófono, que es un transductor que convierte las variaciones de presión sonora en una señal eléctrica proporcional. Luego, el preamplificador amplifica la señal eléctrica antes de su procesamiento. Después se aplican filtros (redes de ponderación) que ajustan la señal según diferentes curvas de respuesta (A, C o Z). El detector calcula el valor eficaz de la señal acústica y como último, el integrador: Permite promediar la energía sonora durante un tiempo determinado para obtener niveles como el Leq⁽⁷⁾.

El impacto biológico derivado de la exposición a los altos niveles de presión sonora en un entorno de Resonancia Magnética (RM) es multidimensional, afectando no solo el sistema auditivo sino también las funciones neurológicas y sistémicas. La consecuencia más inmediata y documentada es el Desplazamiento Temporal del Umbral auditivo (TTS). Este fenómeno representa una fatiga de las células ciliadas del oído interno que, aunque suele revertirse en 24 horas, constituye una señal de alerta temprana⁽⁸⁾. Si esta exposición es recurrente y no se respetan los niveles de acción preventiva como el límite de 82 dB, establecido en el protocolo PREXOR, el daño puede evolucionar hacia un Desplazamiento Permanente del Umbral (PTS), donde la apoptosis o muerte de las células ciliadas en el órgano de Corti vuelve la pérdida auditiva irreversible⁽⁹⁾.

Asociado a este daño, surge frecuentemente el tinnitus. Este se define como la percepción de un sonido tipo zumbido en los oídos o en la cabeza sin que exista una fuente sonora externa. Biofísicamente, el tinnitus es una respuesta del cerebro que intenta compensar la falta de señales auditivas tras un trauma acústico. Este cuadro suele acompañarse de dolor de oído y cefaleas⁽¹⁰⁾.

A nivel neurológico, intensidades que alcanzan los 110 dB no solo estresan el aparato auditivo, sino que alteran la conectividad funcional entre redes cerebrales. Un efecto posible es la

modificación del Volumen Sanguíneo Cerebral Regional (rCBV). Las variaciones en el rCBV indican cambios en la demanda metabólica y en el flujo de sangre en áreas específicas de la corteza. Las consecuencias de esta alteración incluyen una fatiga cognitiva aguda, una disminución en la capacidad de concentración y una alteración en la respuesta a estímulos externos⁽¹¹⁾.

La literatura de^(12,13) subraya también que estos efectos biológicos se potencian en equipos de 3.0 Tesla, donde el ruido y la energía de radiofrecuencia (SAR) son mayores. Además de los efectos auditivos, la liberación de hormonas del estrés como el cortisol y las catecolaminas eleva la presión arterial y la frecuencia cardíaca, configurando un riesgo cardiovascular a largo plazo para el personal expuesto. Por ello, la implementación de tecnologías de "Silent Imaging", que logran reducir el ruido hasta en 40 dB, se presenta no solo como una mejora en el confort, sino como una necesidad biológica para preservar la integridad neurológica y auditiva de pacientes y profesionales⁽¹⁴⁾.

La documentación de las condiciones de trabajo como el nivel de exposición sonora y el seguimiento de protocolos de normativas internacionales para la obtención de los resultados del nivel de presión sonora permiten evaluar la salud laboral del personal clínico en el entorno de RM⁽¹⁵⁾.

Con el fin de evaluar formalmente el riesgo laboral, se aplica la norma ISO 9612. Esta normativa se enfoca en parámetros críticos de daño potencial. Primero, el Nivel de Presión Sonora Continuo Equivalente ($L_{p,A,eqT}$) representa la dosis de energía total constante que contendría la misma energía que el ruido real fluctuante.

$$L_{p,A,eqT} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p_A^2(t) dt}{p_0^2} \right] \text{ dB} \quad (1)$$

Para este cálculo se aplica la Ponderación A, que simula la sensibilidad del oído ante el daño crónico. Segundo, el Nivel de Presión Sonora de Pico ($L_{p,C,pico}$) mide la presión máxima instantánea para evaluar ruidos impulsivos.

$$L_{p,C,pico} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{p_{C,pico}^2}{p_0^2} \right] \text{ dB} \quad (2)$$

En este caso se utiliza la Ponderación C, capaz de capturar el espectro de frecuencia de los impactos para prevenir daños mecánicos agudos.

En este sentido, la norma establece tres estrategias de medición diferenciadas:

Medición basada en tareas: Divide la jornada en actividades específicas, siendo la más precisa para servicios de RM debido a la naturaleza intermitente del ruido.

$$L_{EX,8h} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{T_0} \sum_{m=1}^M T_m \cdot 10^{0,1 \cdot L_{p,A,eq} T_m} \right] \text{ dB} \quad (3)$$

Medición basada en el trabajo: Evalúa un ciclo de actividad completo cuando las tareas son difíciles de separar.

Medición de jornada completa: Utiliza dosímetros personales para trabajadores con alta movilidad y exposición variable.

Finalmente, la norma ISO 9612 exige el cálculo de la Incertidumbre Combinada Estándar. Este valor se obtiene de la suma cuadrática de la incertidumbre del equipo (σ_M), del muestreo (σ_S) y de la repetibilidad (σ_R).

$$\sigma_{L_{EX,8h}} = \sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_S^2 + \sigma_R^2} \quad (4)$$

Por lo tanto, la inclusión de este parámetro asegura que la estimación del riesgo laboral sea científicamente defendible y permita determinar intervalos de confianza precisos para la exposición real del trabajador ⁽¹⁶⁾.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar mediciones reales del nivel presión sonora en el área de resonancia magnética mediante la utilización del sonómetro.
2. Analizar el modelo analítico "ISO-9612" de ruido acústico en resonancia magnética para el cálculo del nivel de exposición sonora diaria normalizada.
3. Identificar los posibles efectos biológicos de la exposición ocupacional y del paciente al ruido en entornos de resonancia magnética.

Materiales y Métodos

Enfoque del Estudio

El objeto de estudio es el ruido generado en el servicio de resonancia magnética del Sanatorio Adventista de Asunción y su impacto posible en la salud ocupacional del personal clínico y de los pacientes.

La investigación utilizó un enfoque mixto con predominancia del componente cuantitativo. El enfoque cuantitativo se aplicó para la medición y el análisis numérico de los niveles de ruido (Objetivo 1) y la aplicación del Modelo Analítico ISO-9612 para el cálculo del nivel de exposición sonora (Objetivo 2).

El enfoque cualitativo se utilizó para explorar en profundidad los posibles efectos biológicos tanto para el personal clínico como también para los pacientes en el área de RM (Objetivo 3).

Diseño del Estudio

El diseño es no experimental. En este estudio, las variables no se manipulan, sino que se observan en su entorno natural. Las mediciones de ruido se recolectan en los hospitales sin modificar las condiciones existentes.

Además, el estudio emplea un diseño transeccional o transversal. La recolección

de datos se realiza en un solo momento, proporcionando una imagen de la situación actual.

Metodología para las mediciones del nivel de presión sonora

La medición se realizó en un equipo de Resonancia Magnética (RM) de la marca General Electric (GE), modelo Signa Prime 1.5T AIR Recon DL, con una intensidad de campo magnético de 1.5 Tesla (T), el cual fue instalado en el hospital en el diciembre de 2024.

Detalles de las Mediciones de Ruido:

Se utilizaron dos sonómetros para las mediciones de intensidad sonora:

1. Quest Technologies 1900 e (Clase 1): Un equipo de alta precisión, utilizado para mediciones de referencia utilizando la ponderación C.



Figura 1: Sonómetro de clase 1, utilizado para las mediciones. Fuente: propia.

2. PCE-322A (Clase 2): Un sonómetro complementario para mediciones de acceso más complejo utilizando la ponderación A.



Figura 2: Sonómetro de clase 2, utilizado para las mediciones. Fuente: Viaindustrial, s.f.

Nota respecto a la fecha de calibración de los sonómetros:

Los niveles de presión sonora presentados en este trabajo sirvieron principalmente para la demostración práctica y la validación de los modelos de cálculo. Esta serie de pruebas tuvo un carácter exploratorio y por eso no se incluyó la fecha de calibración del equipo de medición. Los resultados funcionaron como indicadores relativos para ilustrar la aplicación matemática del estudio. Estos datos no pretendieron cumplir con una evaluación de conformidad bajo las normas ISO.

Periodo de recolección de datos:

Las mediciones del nivel de presión sonora en el servicio de resonancia magnética se realizaron el 8 de octubre del año 2025. La selección de secuencias fue de tipo no probabilístico y dependió de los estudios de RM y las secuencias de calibración que se aplicaron.

Protocolo de Medición:

Se llevaron a cabo tres mediciones clave, representativas de las condiciones operacionales habituales y de prueba:

- RM de Hombro y RM de Rodilla: Mediciones durante secuencias clínicas estándar, para evaluar el ruido en condiciones de uso habitual.

- RM con “Fantoma”: Mediciones enfocadas en secuencias específicas de prueba para la calibración y evaluación del nivel máximo de ruido.

Ubicación de las Mediciones:

- Sala de Comandos (Quest 1900 e y PCE-322A): Las mediciones se realizaron a un metro de la pared para establecer el nivel de ruido al que está expuesto el personal operativo.
- Interconexión de Salas (PCE-322A): Se realizaron mediciones a través de un orificio de aproximadamente 4 cm de diámetro ubicado en la pared que separa la Sala de RM de la Sala de Comandos, para cuantificar la atenuación acústica de la estructura.

Sala de RM (PCE-322A): Se realizaron mediciones en la pared interior de la sala de RM para evitar interferencias o daños al equipo.

Justificación de la cantidad de mediciones:

El número de mediciones se ajustó a la disponibilidad de tiempo en la clínica. Se realizaron tres ciclos de medición completos para garantizar la obtención de diferentes niveles de intensidad sonora. Este procedimiento permitió aplicar la fórmula del nivel de exposición sonora diaria normalizada con varios valores de referencia. La repetición de las medidas aseguró la consistencia de los datos necesarios para el cálculo final.

Metodología para el Cálculo de la Exposición Sonora Diaria (ISO-9612)

Para cumplir con el objetivo de analizar la exposición sonora normalizada se aplicó el modelo de cálculo analítico ISO-9612. Las mediciones de ruido obtenidas in situ durante los procedimientos de hombro, rodilla y fantoma se utilizaron como datos de entrada para el cálculo.

Procedimiento de Cálculo:

- Obtención del $L_{Aeq,T}$: Se empleó el método basado en tareas (o por puesto de trabajo) para obtener el Nivel Sonoro Continuo Equivalente Ponderado 'A' durante el tiempo de medición $L_{Aeq,T}$.
- Cálculo de la Exposición Diaria Normalizada ($L_{EX,8h}$): Se calculó el nivel de exposición sonora diaria normalizada a ocho horas de trabajo, utilizando los tiempos promedio de exposición del personal en el área de RM.

Para la realización de los cálculos se utilizó una hoja de cálculo y una calculadora científica, marca “CASIO” y modelo “fx-570LA PLUS”.

Este análisis no buscó certificar el cumplimiento normativo, sino proporcionar una estimación teórica del riesgo de exposición ocupacional en el contexto del Sanatorio Adventista de Asunción, vinculando directamente las mediciones con un estándar internacional.

Metodología para la Identificación de Efectos Biológicos

El objetivo de identificar los posibles efectos biológicos se abordó mediante una revisión bibliográfica sistemática sobre los efectos de la exposición al ruido en entornos de RM y otros entornos industriales.

Fuentes de Información: Se consultaron bases de datos científicas especializadas, enfocándose en artículos, tesis y guías de seguridad ocupacional.

Uso de la Información: Los efectos biológicos identificados sirvieron de marco teórico para la discusión de los resultados, comparando los síntomas y percepciones reportados por los participantes con los riesgos identificados en la literatura, y confrontándolos con los niveles de ruido calculados bajo la norma ISO-9612.

LIMITACIONES Y SESGOS METODOLÓGICOS

En la medición y aplicación de fórmulas:

- La recolección de datos ocurrió en una sola jornada por la disponibilidad de la clínica.
- El tamaño de la muestra se limitó a tres ciclos de medición específicos.
- No se incluyó el certificado de calibración del equipo por ser un préstamo externo.
- Aplicación de una técnica (medición

basada en la tarea) para el cálculo del nivel de exposición sonora.

En la búsqueda investigativa:

- La revisión bibliográfica depende de la disponibilidad de estudios previos sobre efectos biológicos.
- La relación entre el ruido medido y el daño biológico es una estimación teórica.

Resultados y Discusiones

Mediciones del nivel de presión sonora:

Tabla 1. Mediciones con el equipo PCE-322A.

Secuencia	Sala de Operadores	Orificio en la pared	Sala del equipo
Densidad protónica con FAT y SAT	60 dBA	93 dBA	–
T1 Turbo Spín Eco	60 dBA	92 dBA	–
Angio	57 dBA	96 dBA	93 dBA
Difusión	55 dBA	85 dBA	90 dBA
T2 Eco Gradiente	57 dBA	93 dBA	

Tabla 2. Mediciones con el equipo Quest Technologies 1900 e.

Estudio	Lcpk-1	Lasmx-1	Leq-1
Hombro	91	74	64
Rodilla	89	-	67
Fantoma	94	-	69

Para la fase de cálculos y aplicación del modelo analítico, se utilizaron los valores máximos registrados por el sonómetro en cada ciclo de medición. Es importante precisar que, si bien estos datos corresponden a las lecturas más altas observadas puntualmente, se adoptó la asunción metodológica de tratarlos como el Nivel de Presión Sonora Continuo Equivalente $L_{Aeq,T}$ dentro de las fórmulas de la norma ISO 9612.

Esta decisión responde a dos objetivos fundamentales: en primer lugar, permitir la implementación del rigor matemático del modelo de la norma ante la variabilidad de las muestras y, en segundo lugar, simular un escenario de exposición sonora crítica. Al emplear estos valores máximos en el cálculo

de la dosis de ruido, el estudio proyecta una situación de riesgo elevada que, si bien es poco probable en condiciones operativas estándar, resulta esencial para identificar de manera preventiva los efectos biológicos más severos a los que podrían verse expuestos tanto el personal como los pacientes. De este modo, los resultados presentados actúan como un marco de seguridad que resalta la importancia de las medidas de protección ante eventuales picos de intensidad sonora en el servicio de Resonancia Magnética.

Nivel de presión sonora para los pacientes:

Además, es necesario considerar que la exposición sonora para los pacientes puede ser significativamente mayor. Esto ocurre por

la proximidad directa del cuerpo al centro del imán durante el examen. Para el análisis de seguridad se debe aplicar la regla de los 3 dB. La fuente ^(16,17) establece que un incremento de 3 dB reduce el tiempo de exposición segura a la mitad. Según ⁽³⁾ los valores de presión sonora en un resonador de 1,5 T pueden alcanzar los 103 dB. Este valor se encuentra 18 dB por encima del umbral permitido de 85 dB para una jornada de 8 horas. Al aplicar la regla de los 3 dB el tiempo de exposición segura se reduce a la mitad seis veces consecutivas. Este cálculo

resulta en un tiempo máximo de 7,5 minutos de exposición sin protección. Una resonancia magnética estándar dura entre 30 y 40 minutos aproximadamente. Por este motivo el uso de protección auditiva para los pacientes es una obligación absoluta. El personal clínico debe garantizar esta medida preventiva para evitar daños biológicos inmediatos ^(11,18).

Aplicación del modelo analítico ISO – 9612:

Medición Basada en Tareas (Ecuación 3):

$$L_{p,A,eqTe} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{T_e} \sum_{m=1}^m T_m \cdot 10^{0,1 \cdot L_{p,A,eqTm}} \right] \text{ dB (3)}$$

$$I_1 (60 \text{ dBA}) = 10^{0,1 \cdot 6} = 1.000.000$$

$$I_2 (93 \text{ dBA}) = 10^{0,1 \cdot 9,3} = 1.995.262.315$$

$$I_3 (55 \text{ dBA}) = 10^{0,1 \cdot 5,5} = 316.228$$

$$D_1 : 2,5 \text{ h} \cdot 1.000.000 = 2.500.000$$

$$D_2 : 0,5 \text{ h} \cdot 1.995.262.315 = 997.631.158$$

$$D_3 : 3 \text{ h} \cdot 316.228 = 948.684$$

$$(D_{total}) : 2.500.000 + 997.631.158 + 948.684 = 1.001.079.842$$

$$L_{p,A,eqTe} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1.001.079.842}{6 \text{ h}} \right]$$

$$L_{p,A,eqTe} = 10 \cdot \log_{10} [166.846.640]$$

$$L_{p,A,eqTe} = 82,2 \text{ dB}$$

Nivel de Exposición Diario Normalizado:

$$L_{EX,8h} = L_{p,A,eqTe} + 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{T_e}{T_0} \right] \text{ dB (5)}$$

$$L_{EX,8h} = 82,2 + 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{6h}{8h} \right] \text{ dB}$$

$$L_{EX,8h} = 80,95 \text{ dB}$$

La aplicación del modelo analítico ISO-9612 fue utilizada para estimar el Nivel de Exposición Diario Normalizado ($L_{EX, 8h}$) del personal clínico. Es esencial destacar que este cálculo se basó en los niveles de NPS reales obtenidos en las mediciones in situ y, fundamentalmente, se emplearon tiempos de exposición intencionalmente superiores a la duración real de las tareas:

- I1 y D1: I1 fue el valor de intensidad medida en la sala de operadores durante un estudio de RM. Para el Valor de D1 se multiplicó el valor de intensidad por el tiempo efectivo, que fue la suma de los tiempos de todas RM realizadas en un turno de trabajo. Según la tabla de las mediciones, el I1 equivalió a 60 dBA y se multiplicó por un tiempo de 2,5 horas, un valor que superó el promedio.

- I2 y D2: I2 fue el valor de intensidad dentro de la sala de estudios, sin protección auditiva. Equivalió a 93 dBA, según la tabla 2. Para el valor D2 se multiplicó el valor de intensidad por un tiempo de 0,5 horas (tiempo en el cual el personal clínico está en la sala de estudios), que también resultó ser más bajo.
- I3 y D3: I3 fue el valor de intensidad medida en la sala de operadores, cuando el equipo estuvo en "reposo", o sea no se realizó ningún estudio. 55 dBA fue el valor medido, en la sala de operadores cuando no se realizó ningún estudio. Para el D3 se multiplicó el valor de intensidad por 3 horas (tiempo en el cual el personal clínico está en la sala de operadores, sin estudio), que generalmente fue mayor.

El resultado de la exposición sonora equivalió a 82,2 dB en una jornada de 6 horas, que fue el estándar en el servicio de resonancia magnética donde se realizaron las mediciones. Para comparar el resultado con las recomendaciones internacionales resultó necesario calcular el valor normalizado, es decir, el valor correspondiente a una jornada de 8 horas. Para lograr este objetivo se aplicó de nuevo una fórmula logarítmica, de la cual surgió el resultado de 80,95 dB. Este valor se encontró dentro del rango permitido al situarse por debajo de los 85 dB para 8 horas.

Este enfoque metodológico se adoptó con el propósito de obtener un "límite superior" o la peor estimación de la dosis de ruido. De esta manera, si el LEX, 8h calculado bajo este escenario de máxima exposición simulada se encontró por debajo del límite recomendado por la OMS (85 dBA para 8 horas), se puede concluir que el riesgo de pérdida auditiva ocupacional crónica, en las condiciones operativas normales, es bajo. No obstante, la ISO 9612 exige el cálculo de la Incertidumbre Combinada Estándar para la validez legal y ocupacional del resultado.

Sin embargo, se presentó un escenario alternativo además del caso conservador. En este modelo los valores de intensidad sonora en la sala de control fueron constantes para el personal. La diferencia principal estuvo en la distribución del tiempo y en la ubicación de los trabajadores. Se asumió que el personal clínico no ingresó a la sala de examen durante la adquisición de imágenes. El tiempo de permanencia en la sala de control durante los estudios fue de 2 horas. El tiempo restante sin actividad de resonancia fue de 4 horas. Los resultados mostraron un nivel de exposición diario normalizado mucho menor. Este valor final resultó equivalente al nivel sonoro de una conversación normal ⁽⁵⁾.

Medición Basada en Tareas (Ecuación 3):

$$L_{p,A,eqTe} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{T_e} \sum_{m=1}^m T_m \cdot 10^{0,1 \cdot L_{p,A,eqTm}} \right] dB \quad (3)$$

$$I_1 (60 \text{ dBA}) = 10^{0,1 \cdot 6} = 1.000.000$$

$$I_2 (55 \text{ dBA}) = 10^{0,1 \cdot 5,5} = 316.228$$

$$D_1 : 2 \text{ h} \cdot 1.000.000 = 2.000.000$$

$$D_2 : 4 \text{ h} \cdot 316.228 = 1.264.912$$

$$(D_{total}) : 2.000.000 + 1.264.912 = 3.264.912$$

$$L_{p,A,eqTe} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{3.264.912}{6 \text{ h}} \right]$$

$$L_{p,A,eqTe} = 10 \cdot \log_{10} [544.152]$$

$$L_{p,A,eqTe} = 57.35 \text{ dB}$$

Nivel de Exposición Diario Normalizado:

$$L_{EX,8h} = L_{p,A,eqTe} + 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{T_e}{T_0} \right] \text{ dB (5)}$$

$$L_{EX,8h} = 57.35 + 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{6h}{8h} \right] \text{ dB}$$

$$L_{EX,8h} = 56.1 \text{ dB}$$

Nota sobre incertidumbre combinada estándar:

El cálculo de la incertidumbre combinada estándar se omitió en este trabajo. La norma ISO 9612 exige un mínimo de tres repeticiones independientes para cada tarea específica de medición. Estas repeticiones son necesarias para determinar estadísticamente el componente de repetibilidad ("σ" R). En esta investigación las mediciones se realizaron sobre diferentes secuencias clínicas según la disponibilidad limitada del hospital. Por lo tanto, no se dispone de la cantidad de muestras idénticas para procesar la incertidumbre según el estándar técnico. El estudio se enfocó exclusivamente en la estimación del nivel de exposición sonora diaria normalizada como una prueba de concepto.

Identificación de efectos biológicos:

A continuación, se presenta una revisión de diversos estudios y protocolos que traducen los niveles de presión sonora en efectos biológicos, clínicos y subjetivos, proporcionando una visión integral de los riesgos a los que se exponen tanto el personal de salud como los pacientes en el entorno de la Resonancia Magnética:

El estudio de ⁽¹⁸⁾ en Suecia analizó el impacto del ruido acústico comparando al personal de RM con un grupo de control de Tomografía Computarizada. Los resultados destacan una mayor prevalencia de tinnitus (zumbido de oídos), cefaleas y somnolencia inusual en los profesionales de RM. Estos hallazgos se basan en reportes subjetivos de los trabajadores sobre su estado de salud. En el ámbito de la salud ocupacional, este tipo de

información subjetiva es una herramienta útil para la evaluación de los puestos de trabajo, ya que permite identificar síntomas de fatiga y estrés sensorial que las mediciones físicas externas no siempre logran capturar, proporcionando una visión más humana y completa de los riesgos en el entorno de la Resonancia Magnética.

El estudio clínico de ⁽¹⁹⁾ evaluó el efecto del ruido acústico de una RM de 1.5 Tesla en la función auditiva de los pacientes, mediante audiometrías de alta precisión. Los resultados evidenciaron un desplazamiento temporal del umbral auditivo (TTS) inmediatamente después del examen, afectando significativamente las frecuencias de 4, 6, 8, 14 y 16 kHz. Lo más relevante de este hallazgo es que las alteraciones se manifestaron a pesar del uso de protección auditiva, confirmando que el ruido del resonador genera un impacto biológico medible en el sistema sensorial. No obstante, la investigación concluyó que este efecto es transitorio, ya que los umbrales auditivos regresaron a sus niveles basales y el efecto dejó de ser observable tras un periodo de 24 horas. Esta evidencia subraya la naturaleza dinámica del riesgo biológico.

La revisión sistemática de ⁽²⁰⁾ aportó una base teórica fundamental al detallar los mecanismos moleculares del daño por ruido. A diferencia de estudios clínicos específicos este trabajo precisó que la exposición crónica superior a 85 dB provocó una degradación progresiva de las células ciliadas externas del órgano de Corti mientras que picos de ruido mayores a 140 dB pudieron desencadenar un trauma acústico agudo. Un valor diferencial de este estudio fue su análisis de los efectos extra-auditivos sistémicos. Se documentó que

el ruido actuó como un estresor biológico que incrementó la liberación de catecolaminas (adrenalina y cortisol). Esto provocó un aumento directo de la presión arterial y la frecuencia cardíaca. Asimismo, identificó que el ruido ambiental por encima de los 45 dB alteró los ciclos circadianos y el descanso reparador. En el plano psicológico destacó que la fatiga cognitiva derivada del ruido elevó el riesgo de errores laborales entre un 15% y 20% en entornos de alta demanda como los servicios de salud.

Generalizabilidad de los resultados:

La validez externa de este estudio presenta ciertas restricciones por el entorno de medición. Los datos se obtuvieron en un equipo específico de 1.5 Tesla de la marca General Electric. Por lo tanto, los niveles de presión sonora pueden variar en otros modelos o fabricantes de resonancia magnética. Además, las mediciones dependen de las secuencias de pulso seleccionadas durante la jornada de recolección. Sin embargo, la metodología basada en la norma ISO 9612 es aplicable a cualquier servicio de radiología a nivel internacional. El modelo de cálculo permite replicar este análisis en diferentes configuraciones clínicas. Aunque los valores numéricos son específicos para este centro las conclusiones sobre la protección auditiva tienen una validez general para la seguridad del paciente.

Conclusiones

Los valores reales del nivel de presión sonora obtenidos con el sonómetro confirmaron que, para las secuencias de pulso de diagnóstico más comunes, los niveles de ruido dentro de la sala del equipo alcanzan picos de hasta 93 dBA. Estos valores superan los umbrales de acción establecidos en normativas de seguridad laboral, especialmente en el componente de frecuencias altas, aunque las mediciones de fondo en la sala de comandos se mantuvieron dentro de límites aceptables. Por otro lado, el nivel de exposición sonora diaria normalizada ($L_{EX,8h}$) calculado según el modelo analítico de la

ISO 9612:2009, utilizando la Estrategia Basada en Tareas (Estrategia 1), permitió determinar el nivel equivalente de presión sonora ($L_{p,Aeq,T}$) para cada tarea específica (ej. secuencias de pulso y tiempos inactivos) y registrar su duración (T). El análisis de estos datos, los cuales fueron integrados en una fórmula logarítmica que pondera la exposición total a un periodo estándar de 8 horas, indicó que el riesgo ocupacional de pérdida auditiva crónica es clasificado como bajo en las condiciones operativas actuales. Finalmente, los efectos biológicos observados son consistentes con los niveles de ruido medidos. El efecto más inmediato y frecuente en los pacientes es el Desplazamiento Temporal del Umbral Auditivo (TTS), un cambio reversible que subraya la intensidad del estrés acústico. En el personal expuesto crónicamente, la literatura y los síntomas reportados sugieren el potencial desarrollo de tinnitus o fatiga neurosensorial transitoria, y el riesgo de Pérdida Auditiva Permanente (PTS) no puede ser descartado si las medidas de protección fallan. En conclusión, el impacto en la salud ocupacional y de los pacientes en el Servicio de Resonancia Magnética es doble: el riesgo ocupacional crónico es bajo según el cálculo de la $LEX,8h$, pero existe un impacto significativo en el confort y bienestar a corto plazo del paciente, 59 manifestado en ansiedad y TTS, lo que hace imperativa la gestión y mitigación activa del ruido para equilibrar la excelencia diagnóstica con la seguridad.

En función de los hallazgos obtenidos y con el objetivo de asegurar la integridad del servicio y el cumplimiento normativo, se establecen las siguientes recomendaciones para el Hospital: se recomienda firmemente la ejecución de cálculos para la medición basada en tareas (Estrategia 1 de ISO 9612). A pesar de que la exposición media ponderada diaria ($L_{EX,8h}$) pueda ser baja, es crucial calcular la Incertidumbre Combinada Estándar para garantizar con certeza científica que los valores de exposición no superen las normas y leyes vigentes. Además, como medida adicional para obtener la máxima fiabilidad de los

datos, se aconseja que todas las mediciones de los niveles de ruido de las secuencias individuales y los tiempos inactivos del equipo se realicen de forma repetida, empleando al menos dos dispositivos de medición de Clase 1 simultáneamente. Finalmente, es indispensable que los marcos técnicos para estas mediciones y cálculos se adhieran a la norma ISO 9612:2010, la cual garantiza la validez científica y legal de la evaluación de la exposición.

Contribución de los autores:

Nelson Andrés Valdez Velázquez: Supervisor.

Rafael Klassen Esau: Investigador.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses, financiero ni personal, que pudiera haber influido de manera inapropiada en el desarrollo de este trabajo, en el análisis de los resultados o en la interpretación de los datos.

Fuente de Financiación: El trabajo no cuenta con fuentes de financiación.

Referencias Bibliográficas

- Costa J, Soria J. Resonancia magnética dirigida a técnicos superiores en imagen para el diagnóstico. Barcelona: Elsevier; 2015. p. 281. Disponible en: <https://books.google.com.py/books?id=k7gZEAAAQBAJ>
- Hornak P. The basics of MRI (Internet). Rochester (NY): Rochester Institute of Technology; 2013. Disponible en: <https://www.cis.rit.edu/htbooks/mri/inside.htm>
- Morton G. Noise in the MRI scanner. *Anaesthesia*. 2000;55(12):1213-4. doi: 10.1046/j.1365-2044.2000.01798.x.
- Edelstein W, Kidane T, Taracila V, Baig T, Eagan T, Brown R. Active-passive gradient shielding for MRI acoustic noise reduction. *Magn Reson Med*. 2005;53(5):1013-7. doi: 10.1002/mrm.20472.
- Ordóñez J. Física del sonido. *Rev Digit Acta*. 2022;116:34. Disponible en: https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/116001.pdf
- Domingo A. Apuntes de acústica (Internet). Versión 2.2. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid; 2022. Disponible en: <https://oa.upm.es/70136/8/apuntes-de-acustica-v2.2.pdf>
- Azpigueta L, González J, González I, Rodríguez S, Martínez E. Colección de prácticas de instrumentación acústica y control de ruido. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid; 2014. Disponible en: https://www.tsc.uc3m.es/~emenriquez/papers/Practicas_de_instrumentacion_acustica_y_control_de_ruido.pdf
- Mollasadeghi A, Mehrparvar A, Atighechi S, Davari M, Shokouh P, Mostaghaci M, et al. Sensorineural hearing loss after magnetic resonance imaging. *Case Rep Radiol*. 2013;2013:510258. doi: 10.1155/2013/510258.
- Torres B, Carriel L, Sánchez M, Valenzuela J, Fontecilla H. Protocolo sobre normas mínimas para el desarrollo de programas de vigilancia de la pérdida auditiva por exposición a ruido en los lugares de trabajo (Internet). Santiago: ACHS; 2013. Disponible en: [https://www.achs.cl/docs/librariesprovider2/empresa/5-ruido-\(plexor\)/2-normativa/protocolo-de-exposicion-ocupacional-a-ruido-plexor.pdf](https://www.achs.cl/docs/librariesprovider2/empresa/5-ruido-(plexor)/2-normativa/protocolo-de-exposicion-ocupacional-a-ruido-plexor.pdf)
- Basner M, Babisch W, Brink M, Clark C, Janssen S, Stansfeld S. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *Lancet*. 2014;383(9925):1325-32. doi: 10.1016/S0140-6736(13)61613-X.
- Glans A, Wilén J, Hansson B, Audulv Å, Lindgren L. Managing acoustic noise within MRI: a qualitative interview study among Swedish radiographers. *Radiography*. 2024;30(3):889-95. doi: 10.1016/j.radi.2024.04.002.
- Rivas P, Criado J, Lorente L, Velasco L, Valcárcel P. Seguridad del paciente en resonancia magnética. *Radiología*. 2023;65(5):447-57. doi: 10.1016/j.rx.2023.01.013.
- Hikishima K, Tsurugizawa T, Kasahara K, Hayashi R, Takagi R, Yoshinaka K, et al. Functional ultrasound reveals effects of MRI acoustic noise on brain function. *Neuroimage*. 2023;281:120382. doi: 10.1016/j.neuroimage.2023.120382.
- Hagiwara M, Watanabe Y, Tanaka H, Takahashi H, Arisawa A, Yoshioka E, et al. Acoustic noise in MRI environments and its effects. *Magn Reson Med Sci*. 2017;16(3):220-6. doi: 10.2463/mrms.mp.2016-0045.
- Magriñá L, Tomás M. El enfermero de resonancia magnética y su salud laboral. *Rev Soc Esp Enferm Radiol*. 2010;8(3):110-3. Disponible en: <https://enfermeriaradiologica.org/wp-content/uploads/2025/04/El-enfermero-de-resonancia-magnetica-y-su-salud-laboral.pdf>
- International Organization for Standardization. Acoustics Determination of occupational noise exposure, Engineering method (ISO 9612:2009). Geneva: ISO; 2009.
- Wallis C. ¿Qué es la regla de los 3 dB? Comprender la duplicación del ruido (Internet). Reino Unido: Pulsar Instruments; 2015. Disponible en: <https://pulsarinstruments.com/es/noticias/comprender-la-regla-de-los-3-db/>.
- Glans A, Wilén J, Lindgren L, Björkman I, Hansson B. Health effects related to exposure of static magnetic fields and acoustic noise: comparison between MR and CT radiographers. *Eur Radiol*. 2022;32:7896-7909. doi: 10.1007/s00330-022-08843-y.
- Bahaloo M, Davari M, Sobhan M, Mirmohammadi S, Jalalian M. Hearing threshold changes after 1.5-T MRI of

head and neck. Radiol Res Pract. 2019;2019:8756579.
doi: 10.1155/2019/8756579.

20. Vergara J. El ruido ocupacional y sus consecuencias en la salud de los trabajadores (tesis). Lima: Universidad Peruana Cayetano Heredia; 2024. Disponible en: <https://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12866/16904>.