



B1

ISSN: 2595-1661

ARTIGO

Listas de conteúdos disponíveis em [Portal de Periódicos CAPES](https://portal.periodicos.capes.gov.br/)

Revista JRG de Estudos Acadêmicos

Página da revista:

<https://revistajrg.com/index.php/jrg>

ISSN: 2595-1661

Revista JRG de
Estudos Acadêmicos

Modelación predictiva del riesgo auditivo por exposición ocupacional a ruido en técnicos de campo de monitoreo ambiental: comparación de perfiles de exposición en un estudio de caso

Predictive modeling of hearing risk due to occupational noise exposure in environmental monitoring field technicians: comparison of exposure profiles in a case study.

DOI: 10.55892/jrg.v9i20.3089

ARK: 57118/JRG.v9i20.3089

Recebido: 18/03/2026 | Aceito: 22/03/2026 | Publicado on-line: 25/03/2026

Diego Rodolfo Granda Paucar¹

<https://orcid.org/0009-0002-3117-9501>

<https://lattes.cnpq.br/6614184832963326>

Universidad Iberoamericana del Ecuador – UNIB.E. Quito, Ecuador

E-mail: rodolfofgd@outlook.com

Oscar Ivan Guaminga Castro²

<https://orcid.org/0009-0008-3151-457X>

<https://lattes.cnpq.br/5720810683626419>

Universidad Iberoamericana del Ecuador – UNIB.E. Quito, Ecuador

E-mail: oguaminga@gmail.com

Cesar Jose D'Pool Fernandez³

<https://orcid.org/0000-0002-6570-9702>

<https://lattes.cnpq.br/9933931392016794>

Universidad Iberoamericana del Ecuador – UNIB.E. Quito, Ecuador

E-mail: cdpool@doc.unibe.edu.ec



Resumen

La exposición ocupacional al ruido continúa siendo uno de los principales riesgos físicos en actividades industriales, particularmente en trabajadores que realizan monitoreo ambiental en distintos tipos de instalaciones. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar y comparar la exposición diaria al ruido en técnicos de campo asignados a sectores industriales con condiciones acústicas diferentes. Para ello se analizaron registros de medición obtenidos durante campañas de monitoreo realizadas en 2024. Los niveles de presión sonora fueron reportados como Niveles de Presión Sonora Continuo Equivalentes Corregidos ($L_{K_{eq}}$) bajo ponderación frecuencial A y, debido a las condiciones de medición empleadas, fueron considerados técnicamente equivalentes a Nivel Sonoro Continuo Equivalente Ponderado A ($L_{A_{eq}}$), para efectos de normalización de la exposición conforme a los criterios de evaluación establecidos en la metodología de la ISO 9612:2009 (Acoustics. Determination of occupational noise exposure. Engineering method). A partir de estos registros se estimó el Nivel de Exposición Diaria Normalizada a 8 horas, ($L_{EX,8h}$) mediante un modelo de integración energética que permitió analizar la variabilidad temporal de la exposición y comparar perfiles ocupacionales. Los resultados

¹ Estudiante de la Maestría en Salud y Seguridad Ocupacional

² Estudiante de la Maestría en Salud y Seguridad Ocupacional

³ Mestrado em Prevenção de Riscos Ocupacionais; Médico Cirurgião



evidencian diferencias claras en la carga acústica acumulada entre técnicos asignados a distintos sectores productivos, particularmente entre actividades desarrolladas en instalaciones del sector petrolero y aquellas vinculadas a entornos manufactureros. Estos hallazgos destacan la importancia de considerar la organización del trabajo y la distribución de tareas como factores relevantes en la gestión preventiva del riesgo por exposición ocupacional al ruido.

Palabras clave: NIHL; ISO; OSHA; Ruido laboral; Modelo de integración energética; Salud ocupacional; Monitoreo ambiental; Higiene industrial; Nivel de exposición diaria normalizada a 8 horas ($L_{EX,8h}$).

Abstract

Occupational noise exposure remains one of the main physical hazards in industrial activities, particularly among workers engaged in environmental monitoring across different types of facilities. In this context, the present study aims to characterize and compare daily noise exposure in field technicians assigned to industrial sectors with differing acoustic conditions. To this end, measurement records obtained during monitoring campaigns conducted in 2024 were analyzed. Sound pressure levels were reported as Corrected Equivalent Continuous Sound Pressure Levels ($L_{K_{eq}}$) under A-frequency weighting and, due to the measurement conditions employed, were considered technically equivalent to A-weighted Equivalent Continuous Sound Level ($L_{A_{eq}}$) for the purpose of exposure normalization according to the evaluation criteria established in the ISO 9612:2009 methodology (Acoustics. Determination of occupational noise exposure. Engineering method). Based on these records, the Normalized Daily Exposure Level over 8 hours ($L_{EX,8h}$) was estimated using an energy integration model, which enabled the analysis of temporal variability in exposure and the comparison of occupational profiles. The results reveal clear differences in accumulated acoustic load among technicians assigned to different productive sectors, particularly between activities carried out in oil industry facilities and those associated with manufacturing environments. These findings highlight the importance of considering work organization and task distribution as relevant factors in the preventive management of occupational noise exposure risk.

Keywords: NIHL; ISO; OSHA; Occupational noise; Energy integration model; Occupational health; Environmental monitoring; Industrial hygiene; Normalized daily exposure level over 8 hours ($L_{EX,8h}$).

1. Introducción

La exposición ocupacional al ruido constituye uno de los riesgos físicos más frecuentes en diversos entornos laborales y representa un importante problema de salud pública debido a sus efectos sobre la audición. La pérdida auditiva inducida por ruido NIHL (Noise Induced Hearing Loss) es considerada una de las enfermedades ocupacionales más comunes a nivel mundial y genera importantes consecuencias sociales, económicas y laborales. Diversos estudios epidemiológicos estiman que entre el 7 % y el 21 % de los casos de pérdida auditiva están asociados a la exposición al ruido en el lugar de trabajo (Nelson et al., 2005; Dobie, 2008).

Diversos organismos internacionales reconocen que la exposición prolongada a niveles superiores a 85 dB(A) durante jornadas de ocho horas se asocia con daño auditivo irreversible, particularmente en frecuencias altas, con mayor afectación reportada en las bandas de 3, 4 y 6 kHz conforme a los modelos audiómetros utilizados en la ISO



1999:2013 (Acoustics. Estimation of noise. Induced hearing loss), además de efectos extraauditivos como alteraciones cardiovasculares, trastornos del sueño, incremento del estrés fisiológico y disminución del rendimiento laboral. A pesar de la existencia de marcos normativos que establecen límites de exposición, la cuantificación real del riesgo acumulativo continúa siendo un desafío en contextos donde la exposición no es constante ni homogénea.

En las últimas décadas, los países industrializados han logrado reducir parcialmente la incidencia de pérdida auditiva ocupacional mediante la implementación de programas de conservación auditiva y regulaciones más estrictas en materia de seguridad laboral. Sin embargo, en muchos países en desarrollo la exposición al ruido sigue representando un problema significativo debido a limitaciones en la implementación de medidas preventivas y sistemas de vigilancia ocupacional (Nelson et al., 2005; Dobie, 2008).

La evidencia científica indica que trabajadores de sectores como la construcción, la industria, la agricultura y otras actividades con alta exposición a ruido presentan un mayor riesgo de desarrollar pérdida auditiva ocupacional (Engdahl & Tambs, 2010). Además, la literatura reporta que la mayor parte del daño auditivo ocurre durante los primeros años de exposición laboral prolongada a niveles elevados de presión sonora (Rubak et al., 2006).

En sectores industriales como el petrolero, petroquímico, minero, manufacturero y de infraestructura, los niveles sonoros pueden superar los 85 dB(A), alcanzando en determinados procesos industriales valores superiores a 95 dB(A), generando escenarios de alta carga energética. En este contexto, los técnicos ambientales y profesionales de monitoreo ambiental desarrollan sus actividades en múltiples instalaciones productivas, con patrones de exposición variables según la naturaleza del proyecto, duración del monitoreo y condiciones operativas del sitio. A diferencia de trabajadores asignados permanentemente a una misma fuente de ruido, estos profesionales experimentan exposiciones intermitentes pero recurrentes, cuya carga acústica acumulada anual no suele ser modelada de manera cuantitativa. En este contexto, la evaluación de la exposición ocupacional al ruido y sus posibles efectos sobre la audición resulta fundamental para la identificación de riesgos y el desarrollo de estrategias de prevención en trabajadores que realizan actividades técnicas en campo.

La literatura científica ha abordado ampliamente la exposición al ruido en trabajadores industriales permanentes; sin embargo, existe una limitada evidencia que analice el comportamiento energético acumulado en perfiles ocupacionales itinerantes, como el de técnicos ambientales que alternan entre sectores de alta y moderada intensidad sonora. Esta brecha dificulta la toma de decisiones preventivas basadas en datos objetivos, particularmente en lo referente a rotación de personal, selección adecuada de protectores auditivos y planificación de programas de vigilancia audiométrica.

Desde el punto de vista metodológico, la evaluación de la exposición ocupacional al ruido requiere el empleo de indicadores acústicos estandarizados. El nivel continuo equivalente ponderado A (L_{Aeq}) constituye el parámetro más utilizado para estimar la energía sonora efectiva diaria. No obstante, en contextos de monitoreo ambiental, los datos primarios suelen registrarse como niveles equivalentes corregidos por ponderación espectral ($L_{K_{eq}}$), incorporando además su respectiva incertidumbre instrumental. La transformación energética de $L_{K_{eq}}$ a L_{Aeq} y su posterior normalización a una jornada de referencia de 8 horas, conforme a lineamientos internacionales como ISO 9612, permite



obtener el Nivel de Exposición Diaria Normalizada a 8 horas, de ahora en adelante ($L_{EX,8h}$), base fundamental para cualquier análisis de riesgo ocupacional.

Sin embargo, la simple comparación del $L_{EX,8h}$ con un valor límite normativo resulta insuficiente cuando se pretende comprender el impacto potencial a largo plazo. El ruido se comporta de manera logarítmica; por tanto, incrementos aparentemente pequeños en decibeles representan aumentos exponenciales en energía acústica acumulada. En este sentido, la estimación del riesgo auditivo requiere integrar no solo el $L_{EX,8h}$ de exposición, sino también la duración en años de servicio. Modelos internacionales como los establecidos en la norma ISO1999:2013 permiten estimar de forma probabilística el desplazamiento permanente del umbral auditivo NIPTS (Noise Induced Permanent Threshold Shift) en función del nivel equivalente diario y el tiempo de exposición, proporcionando un marco técnico para proyectar el riesgo teórico sin necesidad de contar inicialmente con datos audiométricos clínicos.

El problema científico que fundamenta la presente investigación radica en la ausencia de una modelación cuantitativa de la carga acústica acumulada anual en técnicos ambientales asignados a distintos sectores industriales, considerando la variabilidad de jornadas efectivas de monitoreo y la atenuación proporcionada por equipos de protección personal auditiva. Esta limitación impide dimensionar de manera objetiva la energía sonora total a la que estos profesionales están sometidos y, en consecuencia, estimar su posible repercusión futura en la salud auditiva.

La pertinencia del estudio se sustenta en la necesidad de generar evidencia técnica que permita transformar mediciones puntuales de ruido en indicadores energéticos acumulativos, incorporando la corrección por uso de protectores auditivos y proyectando escenarios de exposición a mediano y largo plazo bajo marcos normativos internacionales. Más que establecer diagnósticos clínicos, el propósito es aportar una herramienta metodológica que facilite la gestión preventiva dentro de los sistemas de seguridad y salud en el trabajo.

En este contexto, el objetivo del presente estudio fue estimar y comparar la exposición diaria efectiva al ruido ocupacional en dos perfiles ocupacionales de técnicos ambientales asignados a diferentes sectores industriales, mediante la normalización del L_{Aeq} a una jornada de referencia de 8 horas ($L_{EX,8h}$) y la proyección de la carga acústica acumulada anual, integrando la atenuación efectiva de protectores auditivos y evaluando el riesgo teórico conforme a modelos internacionales de estimación de pérdida auditiva inducida por ruido.

2. Metodología

2.1. Diseño y tipo de estudio

El presente estudio corresponde a un diseño observacional, analítico, retrospectivo y longitudinal, en el análisis energético acumulativo de la exposición diaria efectiva al ruido en dos técnicos ambientales con diferentes perfiles de asignación industrial. Es observacional porque no se manipularon variables ni se intervinieron las condiciones de trabajo, los niveles de presión sonora fueron obtenidos mediante procedimientos normalizados de monitoreo ambiental previamente ejecutados en campo. Es retrospectivo porque los datos analizados corresponden a mediciones efectuadas durante el año 2024, registradas como parte de la gestión técnica habitual de la organización. Es longitudinal porque evalúa la acumulación progresiva de energía sonora a lo largo del tiempo, considerando múltiples jornadas de exposición distribuidas durante el período anual.



El estudio adopta un enfoque cuantitativo basado en la integración energética logarítmica del ruido, utilizando como variable primaria el $L_{K_{eq}}$, obtenido mediante protocolo estandarizado de monitoreo ambiental en cada sitio evaluado.

El diseño metodológico se estructuró bajo el enfoque de evaluación de exposición por método de ingeniería, conforme a los lineamientos establecidos en ISO 9612:2009, la cual establece procedimientos técnicos para la medición, cálculo y normalización del nivel diario equivalente de exposición al ruido ($L_{A_{eq}}$). Esta norma constituyó el documento técnico principal para la transformación de niveles de presión sonora medidos ($L_{K_{eq}}$) en niveles equivalentes normalizados a jornada laboral.

Para el análisis aplicado del modelo se seleccionaron dos perfiles ocupacionales de técnicos de monitoreo ambiental, los cuales representan condiciones operativas reales de trabajo en campo. La elección de estos casos se realizó considerando diferencias en los patrones de movilidad, tiempo de permanencia en fuentes de ruido y tipo de actividades desarrolladas durante la jornada laboral. De esta manera, los perfiles analizados permiten evaluar el comportamiento del modelo bajo distintos escenarios representativos de exposición ocupacional al ruido en actividades de monitoreo ambiental. Estos perfiles permiten ilustrar la aplicación del modelo matemático propuesto en situaciones típicas de exposición ocupacional.

2.2. Consideración metodológica sobre el nivel representativo del sitio

Los valores de $L_{K_{eq}}$ utilizados en el análisis corresponden a resultados consolidados del protocolo de monitoreo ambiental aplicado en cada jornada, el cual contempla múltiples puntos representativos dentro del área operativa evaluada.

Dado que:

- Las mediciones se realizaron dentro de un mismo campo acústico dominado por fuentes continuas (principalmente generadores y equipos industriales).
- Las variaciones espaciales registradas entre puntos fueron mínimas (diferencias típicamente menores a ± 2 dB)
- Y el técnico permaneció durante toda su permanencia dentro de dicho entorno acústico.

El $L_{K_{eq}}$ reportado fue considerado técnicamente representativo del campo sonoro dominante del sitio durante el tiempo total de exposición efectiva. No se efectuó un promedio adicional de puntos, ya que el valor reportado corresponde al resultado consolidado del procedimiento de ensayo aplicado conforme a protocolo interno.

Los niveles primarios fueron obtenidos como $L_{K_{eq}}$, bajo ponderación A conforme al procedimiento interno de ensayo. Dado que la medición fue realizada con ponderación frecuencial A y tiempo de integración equivalente, el $L_{K_{eq}}$ se consideró técnicamente equivalente al $L_{A_{eq}}$ para efectos de normalización conforme a ISO 9612:2009.

2.3. Modelo de integración energética

Una vez definidos los niveles equivalentes representativos de cada jornada de monitoreo, el cálculo de la exposición diaria normalizada a ocho horas se fundamenta en un modelo de integración energética conforme a lo establecido en la norma ISO 9612:2009.

Dado que el decibel constituye una magnitud logarítmica definida en función de la energía acústica, la determinación del nivel de exposición ocupacional no puede realizarse mediante promedios aritméticos directos de los valores en dB, sino que



requiere su conversión previa a magnitudes lineales proporcionales a energía, su ponderación temporal y posterior reconversión logarítmica.

En este contexto, el procedimiento adoptado en el presente estudio parte de las ecuaciones (11) y (12) de la ISO 9612:2009, las cuales establecen el método para el cálculo del $L_{EX,8h}$. A partir de dichas expresiones se desarrolla el modelo matemático que permite expresar la exposición como una sumatoria energética discreta ponderada por el tiempo real de exposición, base conceptual del algoritmo implementado en la matriz de cálculo utilizada.

En las secciones siguientes se presenta el desarrollo matemático detallado que vincula la definición logarítmica del decibel con la formulación energética empleada para el cálculo del $L_{EX,8h}$.

De acuerdo con la ISO 9612:2009, el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A para la jornada evaluada se calcula mediante la ecuación (11):

Ecuación (11):

$$L_{p,A,eqTe} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{0,1 * L_{p,A,eqT,n}} \right)$$

$$L_{p,A,eqTe} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{p,A,eqT,n}}{10}} \right)$$

Donde:

$L_{p,A,eqTe}$ = Nivel equivalente para la duración efectiva T_e

$L_{p,A,eqT,n}$

= Nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A de la muestra n

n = número de la muestra de la función

N = número total de muestras de la función

Posteriormente, la misma norma establece que el nivel de exposición diario normalizado a ocho horas se determina mediante la ecuación (12):

Ecuación (12):

$$L_{EX,8h} = L_{p,A,eqTe} + 10 \log_{10} \left(\frac{T_e}{T_0} \right)$$

Donde:

$L_{EX,8h}$ = Nivel diario normalizado a 8h

$L_{p,A,eqTe}$ = Nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A para la duración efectiva de jornada laboral

T_e = duración efectiva de la jornada laboral

T_0 = duración de referencia, $T_0 = 8h$

Sustituimos la ecuación (11) dentro de la ecuación (12):

$$L_{EX,8h} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{p,A,eqT,n}}{10}} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{T_e}{T_0} \right)$$

Propiedad Logarítmica:

$$\log(a) + \log(b) = \log(a * b)$$

$$L_{EX,8h} = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{T_e}{N * T_0} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{p,A,eqT,n}}{10}} \right) \right]$$

en la ecuación original $\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\dots)$ es un promedio de



muestras, es decir tengo N mediciones y todas las mediciones se consideran de igual peso, cada medición representa el mismo intervalo de tiempo

$$T_e = N * \Delta t$$

Donde:

$$\Delta t = \text{duración de cada muestra}$$

Despejamos:

$$\Delta t = \frac{T_e}{N}$$

$$\frac{T_e}{N * T_0} = \frac{\Delta t}{T_0}$$

Sustituimos:

$$L_{EX,8h} = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{\Delta t}{T_0} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{p,A,eqT,n}}{10}} \right) \right]$$

Propiedad algebraica:

$$a \sum b_n = \sum (ab_n)$$

Entonces:

$$\frac{\Delta t}{T_0} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{p,A,eqT,n}}{10}} = \frac{1}{T_0} \sum_{n=1}^N \left(\Delta t * 10^{\frac{L_{p,A,eqT,n}}{10}} \right)$$

Entonces queda:

$$L_{EX,8h} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T_0} \sum_{n=1}^N \Delta t * 10^{\frac{L_{p,A,eqT,n}}{10}} \right)$$

Aquí:

n indexa muestras y todas tienen igual duración Δt , por lo que sería un muestreo uniforme.

La energía total acumulada depende del tiempo real y del nivel real, no del número de muestras.

De muestras a periodos físicos:

cada muestra tiene una duración igual a Δt

Entonces:

$$T_e = N * \Delta t$$

Pero en la vida real, los niveles no cambian cada muestra arbitrariamente, cambian cuando cambia la tarea.

Entonces:

Dividido la jornada en m periodos reales de exposición:

Periodo 1: nivel constante L_1 , duración T_1

Periodo 2: nivel constante L_2 , duración T_2

Periodo m: nivel constante L_m , duración T_m

Entonces si los intervalos no son iguales, reemplazamos:

en vez de Δt usamos T_i

Donde:

$$T_e = \sum_{i=1}^m T_i$$

Entonces queda:



$$L_{EX,8h} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^m T_i * 10^{\frac{L_{p,A,eqT,n}}{10}} \right)$$

Antes $L_{p,A,eqT,n}$ era el nivel medido en la muestra n , ahora L_i es el nivel equivalente del periodo i

Donde:

$$L_{p,A,eqT,n} = L_i$$

Entonces queda:

$$L_{EX,8h} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^m T_i * 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$$

El modelo de integración energética adoptado en el presente estudio se fundamenta en el principio físico de que el nivel de presión sonora en decibeles es una magnitud logarítmica definida en función de la energía acústica.

De acuerdo con la norma ISO 9612:2009, el $L_{EX,8h}$ se calcula mediante integración energética de los distintos periodos de exposición, expresado como:

$$L_{EX,8h} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^m T_i * 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$$

Donde:

L_i = Nivel equivalente del periodo i

T_i = Duración del periodo i

$T_0 = 8h$

m = número total de periodos

2.4. Definición continua de nivel equivalente

El nivel equivalente continuo se define como el nivel constante que produce la misma energía total en el mismo intervalo de tiempo, por lo que tenemos:

Energía total en el intervalo 0 a T:

$$E_{total} = \int_0^T E(t) dt$$

Sustituimos la expresión de energía:

$$E_{total} = \int_0^T E_0 * 10^{\frac{L(t)}{10}} dt$$

Sacamos E_0 :

$$E_{total} = E_0 \int_0^T 10^{\frac{L(t)}{10}} dt$$

Ahora definimos el nivel equivalente:

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{E_{total}}{TE_0} \right)$$

Sustituimos:

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{E_0 \int_0^T 10^{\frac{L(t)}{10}} dt}{TE_0} \right)$$

Cancelamos E_0 , lo que significa que el nivel equivalente depende de la energía relativa y no de la energía absoluta:

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L(t)}{10}} dt \right)$$



Matemáticamente nos referimos a la ISO 9612:2009:

$$\int_0^T f(t) dt \approx \sum_{i=1}^m f_i T_i$$

Aplicamos esa referencia:

$$\int_0^T 10^{\frac{L(t)}{10}} dt \approx \sum_{i=1}^m T_i * 10^{\frac{L_i}{10}}$$

Sustituimos en la ecuación anterior:

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^m T_i * 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$$

Y si ahora T = T₀ = 8h:

$$L_{EX,8h} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^m T_i * 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$$

Se demuestra que la ISO 9612:2009 usa un promedio energético, que proviene de la definición física del decibel, donde la sumatoria discreta es la aproximación matemática de la integral energética, cuyo modelo es utilizado en este estudio.

2.5. Atenuación de protectores auditivos mediante el índice NRR:

La estimación de la reducción del nivel de exposición al ruido proporcionada por protectores auditivos se realizó mediante el índice NRR (Noise Reduction Rating), conforme a la normativa estadounidense aplicable a programas de conservación auditiva. El NRR es un valor único de atenuación sonora determinado mediante ensayos de laboratorio bajo el método REAT (Real-Ear Attenuation at Threshold), establecido en la norma ANSI/ASA S12.6-2016 (Methods for Measuring the Real-Ear Attenuation of Hearing Protectors). Esta norma define el procedimiento experimental para medir la atenuación en sujetos humanos y calcular la reducción media por banda de frecuencia.

Para la estimación de la atenuación efectiva en condiciones reales de uso ocupacional, se aplicó el procedimiento de corrección recomendado por la regulación estadounidense OSHA 29 CFR 1910.95, el cual establece un ajuste del NRR para considerar la diferencia entre condiciones de laboratorio y condiciones reales de campo.

De acuerdo con el Apéndice B de la OSHA 29 CFR 1910.95, cuando las mediciones de ruido se realizan en ponderación A, el valor NRR debe ajustarse restando 7 dB antes de aplicarlo al nivel medido. En el presente estudio, adicionalmente se adoptó un factor de reducción del 50% para estimar la atenuación efectiva en condiciones reales de uso ocupacional, práctica recomendada en la literatura técnica para evitar la sobreestimación de la protección.

El protector auditivo evaluado en el presente estudio corresponde al modelo Peltor Optime 105, con un NRR nominal de 27 dB, determinado conforme a ANSI/ASA S12.6-2016. La selección de este modelo no responde a un criterio teórico, sino a que constituye el equipo de protección auditiva efectivamente suministrado y exigido por la empresa en las actividades evaluadas. En consecuencia, el análisis de atenuación se realizó bajo condiciones representativas del escenario real de uso. Este modelo es comúnmente empleado en entornos industriales con niveles elevados de ruido continuo, tales como actividades de perforación y operación petrolera, debido a su capacidad de atenuación nominal superior a 25 dB y su diseño tipo copa circumaural, adecuado para exposiciones prolongadas.



Modelo de cálculo de atenuación efectiva

Debido a que los niveles sonoros expresados en decibelios representan magnitudes logarítmicas, no es posible realizar promedios aritméticos directos cuando existen distintos periodos de exposición. Por ello, se transformaron los niveles efectivos a magnitudes energéticas lineales, conforme a la definición física del nivel equivalente continuo.

La estimación del nivel de presión sonora efectivo bajo protección se realizó mediante la siguiente expresión:

$$L_{A,efectivo} = L_A - \frac{(NRR - 7)}{2}$$

Donde:

$L_{A,efectivo}$ = Nivel de presión sonora A, ponderado estimado bajo el protector dB(A).

L_A = Nivel de presión sonora A, ponderado medido en el ambiente (en el presente estudio, L_{Keq}).

NRR = Noise Reduction Rating declarado por el fabricante (27 dB).

7 = Corrección por conversión entre ponderación

C utilizada en laboratorio y ponderación A utilizada en evaluación ocupacional en dB.

División para 2 = Factor de ajuste recomendado por OSHA para estimar la atenuación efectiva en condiciones reales.

Aplicación en el presente estudio

En el presente estudio, el valor L_A corresponde al nivel representativo de exposición determinado conforme a la metodología de integración energética establecida en ISO 9612:2009, expresado como L_{Keq} .

Por tanto, la expresión aplicada en la hoja de cálculo fue:

$$L_{A,efectivo} = L_{A,eq\ medido} - \frac{(NRR - 7)}{2}$$

De esta manera, el modelo permite estimar la reducción efectiva del nivel de exposición ocupacional al ruido considerando el uso de protector auditivo bajo condiciones reales de trabajo.

2.6. Estructura energética de integración temporal

En el presente estudio, los niveles de presión sonora medidos en decibeles fueron convertidos a magnitudes energéticas lineales mediante la inversión de la definición logarítmica del decibel

La definición general de nivel para magnitudes energéticas es:

$$L = 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{Q_0} \right)$$

Donde:

L = nivel en decibeles

Q = magnitud energética medida

Q_0 = magnitud de referencia

En acústica, la magnitud energética es proporcional al cuadrado de la presión sonora, por lo tanto, el nivel de presión sonora se define como:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{E}{E_0} \right)$$

Partimos de la definición física:

$$L(t) = 10 \log_{10} \left(\frac{E(t)}{E_0} \right)$$

Donde:

$L(t)$ = nivel instantáneo en decibeles



$$E(t) = \text{energía acústica instantánea}$$

$$E_0 = \text{energía de referencia}$$

Dividimos entre 10:

$$\frac{L(t)}{10} = \log_{10} \left(\frac{E(t)}{E_0} \right)$$

Aplicamos inversa logarítmica:

$$10^{\frac{L(t)}{10}} = \frac{E(t)}{E_0}$$

Multiplicamos por E_0 :

$$E(t) = E_0 * 10^{\frac{L(t)}{10}}$$

Cancelamos E_0 , en base a las ecuaciones ya determinadas:

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{E_0 \int_0^T 10^{\frac{L(t)}{10}} dt}{T E_0} \right)$$

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L(t)}{10}} dt \right)$$

Por lo que podemos trabajar directamente con:

$$E_{relativa}(t) = 10^{\frac{L(t)}{10}}$$

En el presente estudio utilizamos la siguiente ecuación para obtener la Energía Relativa en un periodo:

$$E_{rel,i} = 10^{\frac{Li}{10}}$$

Donde:

$E_{rel,i}$ = energía relativa del periodo i .

Li = nivel equivalente del período i en dB.

Esta expresión corresponde a la conversión de una magnitud logarítmica (dB) a una magnitud lineal proporcional a la energía acústica.

Energía ponderada por tiempo:

Dado que la exposición ocupacional depende tanto del nivel, como de la duración. La energía relativa fue ponderada por el tiempo de exposición de cada periodo:

$$E_{pond,i} = T_i * 10^{\frac{Li}{10}}$$

Donde:

$E_{pond,i}$ = energía acumulada del periodo i

T_i = duración del período i en h

Li = nivel equivalente del período i en dB

2.7. Determinación del $L_{EX,8h}$ efectivo:

La exposición ocupacional al ruido se expresa como $L_{EX,8h}$, conforme a ISO 9612:2009. Una vez integradas las contribuciones energéticas de cada actividad, el nivel equivalente diario efectivo bajo uso de protector auditivo se determinó aplicando la definición logarítmica del nivel equivalente continuo.

El retorno a escala logarítmica es necesario debido a que el decibel es una magnitud derivada de la energía acústica. La integración se realiza en escala lineal y posteriormente se reconvierte a decibeles para mantener coherencia con los criterios normativos de evaluación ocupacional.



Partimos de:

$$L_{EX,8h} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^m T_i * 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$$

Usamos la propiedad de multiplicación por fracción:

$$\frac{1}{T_0} A = \frac{A}{T_0}$$

Definimos:

$$A = \sum_{i=1}^m T_i * 10^{\frac{L_i}{10}}$$

Entonces:

$$\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^m T_i * 10^{\frac{L_i}{10}} = \frac{\sum_{i=1}^m T_i * 10^{\frac{L_i}{10}}}{T_0}$$

Tenemos la ecuación:

$$L_{EX,8h} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^m T_i * 10^{\frac{L_i}{10}}}{T_0} \right)$$

Donde:

$$T_0 = 8h$$

Queda:

$$L_{EX,8h} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^m T_i * 10^{\frac{L_i}{10}}}{8} \right)$$

Donde:

$L_{EX,8h}$ = Nivel de exposición diaria efectivo dB(A)

T_i = tiempo de exposición en la actividad i (h)

L_i = nivel equivalente efectivo en la actividad i dB(A)

8 = jornada de referencia (h)

Fórmula final:

$$L_{EX,8h} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum E_{pond,i}}{8} \right)$$

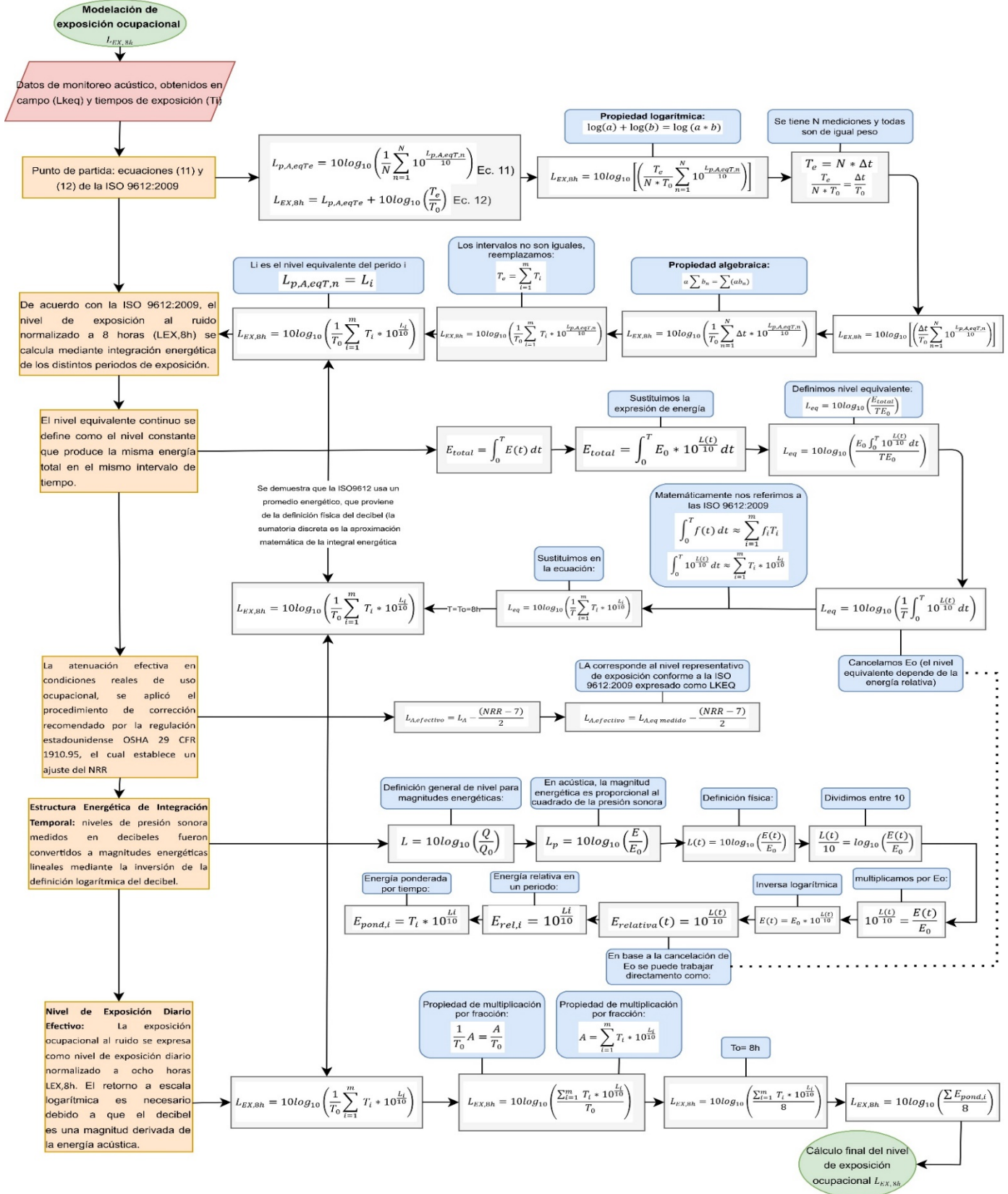
2.8. Diagrama metodológico del procedimiento de calculo

Con el fin de sintetizar el procedimiento matemático descrito en las secciones anteriores, se presenta un diagrama metodológico que integra la derivación normativa basada en las ecuaciones (11) y (12) de la norma ISO 9612:2009 con el fundamento físico de la integración energética del nivel sonoro.

Este esquema ilustra el proceso completo de modelación de la exposición ocupacional al ruido, desde los datos de monitoreo acústico obtenidos en campo hasta la determinación final del $L_{EX,8h}$.

Imagen 1. Diagrama metodológico del procedimiento de cálculo del $L_{EX,8h}$

2.9. Casos de estudio y caracterización de los perfiles ocupacionales evaluados:





Delimitación de los casos analizados

El presente estudio se desarrolló bajo un diseño de caso comparativo longitudinal, considerando dos técnicos ambientales pertenecientes a la misma organización, pero asignados de manera permanente a diferentes sectores industriales durante el período comprendido entre el 1 de enero de 2024 y el 31 de diciembre de 2024.

Cada técnico representa un perfil ocupacional diferenciado en términos de régimen laboral, continuidad de exposición y naturaleza de las actividades desarrolladas. La unidad de análisis adoptada fue la jornada diaria efectiva de exposición ocupacional al ruido, definida como cada día en el cual el técnico ejecutó actividades de monitoreo ambiental en entornos industriales con presencia de fuentes sonoras dominantes.

Durante el período anual evaluado:

- El Técnico A registró 199 jornadas con exposición relevante.
- El Técnico B registró 112 jornadas con exposición relevante.

Estas jornadas constituyen el conjunto total de observaciones utilizadas para el análisis estadístico descriptivo y energético acumulativo.

Caracterización del Técnico A: Perfil industria petrolera

El Técnico A se desempeñó exclusivamente en la industria petrolera, bajo un régimen laboral tipo 21-7 (21 días consecutivos de trabajo seguidos de 7 días de descanso), conforme al cronograma anual establecido por las operadoras del sector. Las actividades desarrolladas se ejecutaron en distintos escenarios operativos dentro de instalaciones petroleras, donde el campo acústico está dominado por maquinaria pesada, generadores, equipos rotativos y procesos industriales continuos.

Dentro de este sector, se identificaron cuatro tipos principales de actividad:

- **Perforación:** fase operativa caracterizada por la presencia simultánea de múltiples fuentes industriales activas, generando un entorno acústico de alta carga energética y predominio de ruido continuo de banda ancha.
- **Bajando casing:** actividad en la cual permanecen activos determinados sistemas mecánicos y generadores, aunque con menor intensidad relativa respecto a la fase de perforación.
- **Cementación:** proceso operativo con presencia de equipos en funcionamiento, pero con una carga acústica generalmente inferior a la fase de bajando casing.
- **Trasteo:** etapa logística posterior a procesos principales, caracterizada por reducción significativa de fuentes activas, con menor intensidad sonora relativa en comparación con las fases anteriores.

Estas diferencias operativas implican variabilidad intraperfil en la intensidad diaria de exposición, aunque todas las actividades se desarrollaron dentro de un entorno industrial petrolero continuo. El Técnico A se caracteriza por una alta frecuencia anual de jornadas expuestas y continuidad operativa prolongada dentro de este sector.

Caracterización del Técnico B: Perfil industria manufacturera

El Técnico B se desempeñó en el sector manufacturero, ejecutando actividades de evaluación ambiental en condiciones operativas habituales de distintas empresas industriales. A diferencia del sector petrolero, las intervenciones en manufactura se realizaron conforme a requerimientos específicos de clientes, con periodicidad variable y menor continuidad anual.

- Las actividades correspondieron principalmente a:
- Evaluación ambiental en condiciones operativas habituales.
- Mediciones programadas de cumplimiento normativo.



Intervenciones puntuales en instalaciones con funcionamiento industrial regular. Este perfil se caracteriza por:

- Exposición intermitente.
- Menor número de jornadas anuales con exposición relevante.
- Variabilidad dependiente del tipo de proceso productivo evaluado.

Enfoque comparativo del análisis

El análisis comparativo se centró en evaluar las diferencias entre ambos perfiles ocupacionales considerando:

- Número total de jornadas con exposición relevante.
- $L_{EX,8h}$ por jornada.
- Estadísticos descriptivos anuales (media, desviación estándar, valores máximos y mínimos).
- Frecuencia de jornadas que superaron niveles de referencia internacionales.
- Integración energética acumulativa anual.
- Proyección teórica de riesgo auditivo conforme a modelos internacionales.

Este enfoque permitió contrastar dos regímenes laborales distintos bajo un mismo marco metodológico de evaluación energética, sin realizar inferencia poblacional, sino análisis descriptivo comparativo de casos longitudinales.

2.10. Instrumentación, calibración y equipos de protección auditiva

Las mediciones de ruido fueron realizadas utilizando un sonómetro integrador, promediador de clase 1, adecuado para evaluaciones de ruido ocupacional y ambiental, conforme a los requisitos de precisión establecidos para este tipo de mediciones. El equipo fue configurado con ponderación en frecuencia A y constante de tiempo Slow, parámetros comúnmente empleados para la evaluación de exposición al ruido en entornos laborales.

El instrumento contaba con certificado de calibración vigente emitido por un laboratorio acreditado bajo la norma ISO/IEC 17025, garantizando la trazabilidad metrológica de las mediciones realizadas durante el estudio. Como evidencia de esta condición, se presenta el certificado de calibración correspondiente al equipo utilizado.

Para el análisis de la atenuación del ruido mediante equipos de protección auditiva, se consideró el uso de orejeras de protección acopladas a casco de seguridad, representativas del equipo utilizado por los trabajadores durante las actividades evaluadas. Este equipo fue considerado para la estimación NRR y el análisis del nivel efectivo de exposición al ruido.



Imagen 2. Certificado de calibración del sonómetro utilizado en el estudio



Escaneé este QR para descargar informe original con firma electrónica en pdf

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO
ISO/IEC 17025:2017
Accredited Calibration Laboratory ISO/IEC 17025:2017

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
N° CQC-0048-003-26



CONFORME A NORMA
CERTIFICATE ACCORD TO

Respuesta de Frecuencia a Banda de Octava
Frequency Response to Octave Band

Ponderación A
A-weighting

Frecuencia Frequency	Valor Patrón Standard Value	Indicación Item Item Reading	Error de Medición Measurement Error	E.M.P. ⁽¹⁾ M.P.E. ⁽¹⁾	Incertidumbre (U) Uncertainty (U)	Cumplimiento
Hz	dB	dB	dB	dB	dB	Compliance
31.5	54.9	54.9	0.06	1.5	0.21	Cumple
63	68.1	68.1	0.00	1.0	0.20	Cumple
125	78.2	77.8	-0.40	1.0	0.20	Cumple
250	85.7	85.7	0.01	1.0	0.17	Cumple
500	91.1	90.9	-0.17	1.0	0.17	Cumple
1000	94.3	94.0	-0.28	0.7	0.14	Cumple
2000	95.5	95.2	-0.30	1.0	0.20	Cumple
4000	95.5	94.9	-0.60	1.0	0.20	Cumple
8000	93.1	90.7	-2.36	+ 1.5 ; - 2.5	0.28	Cumple
12500	89.9	85.1	-4.77	+ 2.0 ; - 5.0	0.51	Cumple

Ponderación B
B-weighting

Frecuencia Frequency	Valor Patrón Standard Value	Indicación Item Item Reading	Error de Medición Measurement Error	E.M.P. ⁽¹⁾ M.P.E. ⁽¹⁾	Incertidumbre (U) Uncertainty (U)	Cumplimiento
Hz	dB	dB	dB	dB	dB	Compliance
31.5	77.1	77.1	-0.04	1.5	0.21	Cumple
63	85.0	84.7	-0.30	1.0	0.20	Cumple
125	90.1	89.6	-0.50	1.0	0.20	Cumple
250	93.0	92.9	-0.09	1.0	0.17	Cumple
500	94.0	93.8	-0.17	1.0	0.17	Cumple
1000	94.3	94.0	-0.28	0.7	0.14	Cumple
2000	94.2	94.0	-0.20	1.0	0.20	Cumple
4000	93.8	93.8	0.00	1.0	0.20	Cumple
8000	91.3	88.9	-2.36	+ 1.5 ; - 2.5	0.28	Cumple
12500	88.1	83.2	-4.87	+ 2.0 ; - 5.0	0.51	Cumple

Ponderación C
C-weighting

Frecuencia Frequency	Valor Patrón Standard Value	Indicación Item Item Reading	Error de Medición Measurement Error	E.M.P. ⁽¹⁾ M.P.E. ⁽¹⁾	Incertidumbre (U) Uncertainty (U)	Cumplimiento
Hz	dB	dB	dB	dB	dB	Compliance
31.5	91.2	91.1	-0.14	1.5	0.21	Cumple
63	93.5	93.2	-0.30	1.0	0.20	Cumple
125	94.1	93.7	-0.40	1.0	0.20	Cumple
250	94.3	94.3	0.01	1.0	0.17	Cumple
500	94.3	94.1	-0.17	1.0	0.17	Cumple
1000	94.3	94.0	-0.28	0.7	0.14	Cumple
2000	94.1	93.9	-0.20	1.0	0.20	Cumple
4000	93.7	93.4	-0.30	1.0	0.20	Cumple
8000	91.2	88.8	-2.36	+ 1.5 ; - 2.5	0.28	Cumple
12500	88.0	83.2	-4.77	+ 2.0 ; - 5.0	0.51	Cumple

Respuesta de Ponderación Temporal
Time Weighting Response

Ponderación Temporal Time Weighting	Valor Patrón Standard Value	Indicación Item Item Reading	Error de Medición Measurement Error	E.M.P. ⁽¹⁾ M.P.E. ⁽¹⁾	Incertidumbre (U) Uncertainty (U)	Cumplimiento
	dBs	dBs	dBs	dBs	dBs	Compliance
Fast	94.2	93.4	-0.80	+ 3.8 ; - 3.7	0.19	Cumple
Slow	91.1	90.5	-0.60	+ 0.8 ; - 0.7	0.19	Cumple



Imagen 3. Instrumentación empleada para las mediciones de ruido



Imagen 4. Equipo de protección auditiva utilizado para el análisis de atenuación (orejeras acopladas a casco de seguridad).





2.11. Criterios de inclusión y exclusión

Con el fin de garantizar la representatividad de los datos y la coherencia metodológica del estudio, se establecieron criterios específicos de inclusión y exclusión para la selección de los registros de exposición analizados.

Criterios de inclusión

Se incluyeron en el estudio aquellos registros que cumplieron las siguientes condiciones:

- Mediciones de exposición ocupacional al ruido realizadas durante jornadas laborales completas o representativas.
- Registros obtenidos mediante dosímetros o instrumentos de medición de clase 1, calibrados conforme a estándares metrológicos vigentes.
- Jornadas de trabajo pertenecientes a los perfiles ocupacionales definidos en el estudio (técnico petrolero A y técnico manufacturero B).
- Mediciones con información completa del tiempo de exposición y nivel equivalente de presión sonora.
- Registros obtenidos dentro del periodo anual analizado.

Criterios de exclusión

Se excluyeron del análisis los registros que presentaron alguna de las siguientes características:

- Mediciones incompletas o con pérdida de información temporal relevante.
- Registros correspondientes a jornadas no representativas del proceso habitual de trabajo.
- Mediciones realizadas con instrumentos sin evidencia de calibración vigente.
- Registros afectados por interferencias externas o condiciones atípicas que pudieran distorsionar la representatividad de la exposición real.

3. Resultados y Discusión

3.1. Frecuencia anual de jornadas con exposición relevante

Durante el período comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2024 se identificaron las jornadas con exposición ocupacional relevante al ruido para cada caso analizado.

El Técnico A registró un total de 199 jornadas expuestas, mientras que el Técnico B registró 112 jornadas expuestas.

Estas cifras representaron:

- Mayor continuidad anual de exposición en el perfil petrolero.
- Menor frecuencia de exposición en el perfil manufacturero.

La diferencia absoluta entre ambos perfiles fue de 87 jornadas adicionales en el Técnico A, lo que evidenció una mayor densidad anual de exposición en este caso.

3.2. Estadística descriptiva del $L_{EX,8h}$

Se analizaron los valores del $L_{EX,8h}$ correspondientes a las jornadas con exposición relevante registradas durante el año 2024.

- El Técnico A presentó un $L_{EX,8h}$ promedio de 63,04 dB(A), con una desviación estándar de 11,15 dB(A) ($n = 199$).
- El Técnico B presentó un $L_{EX,8h}$ promedio de 33,16 dB(A), con una desviación estándar de 5,55 dB(A) ($n = 112$).



La diferencia absoluta entre las medias fue de 29,88 dB(A), evidenciando un contraste sustancial en la intensidad promedio de exposición entre ambos perfiles ocupacionales. Con el propósito de identificar la amplitud del rango de exposición al ruido registrado en los perfiles ocupacionales analizados, se determinaron los valores máximos y mínimos del $L_{EX,8h}$. Estos valores permiten caracterizar los extremos del comportamiento de la exposición sonora dentro del conjunto de jornadas evaluadas, evidenciando tanto las condiciones de menor carga acústica como los escenarios de mayor intensidad registrados durante el periodo de estudio.

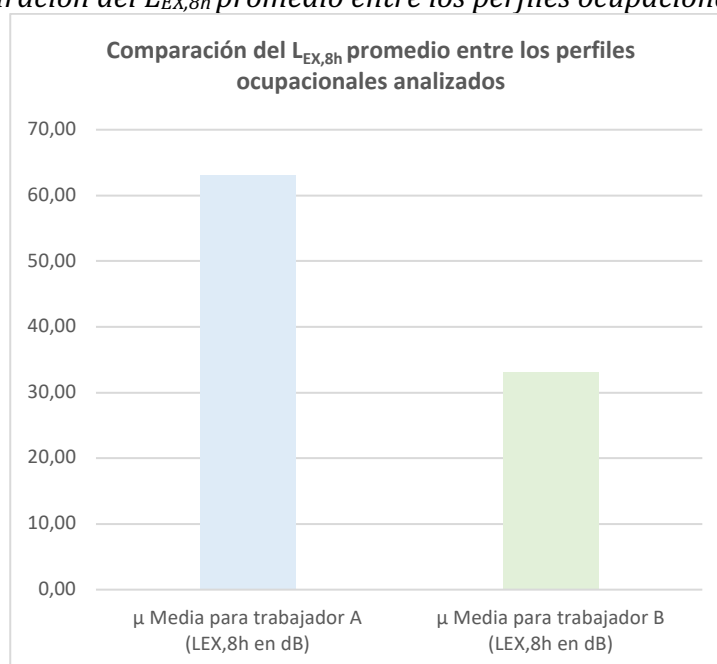
Asimismo, la mayor desviación estándar observada en el Técnico A indicó una mayor variabilidad anual de exposición en comparación con el Técnico B.

En la Tabla 1 se presentan los estadísticos descriptivos comparativos de ambos casos.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos del $L_{EX,8h}$ anual por perfil ocupacional

Tipo de Trabajador	Días expuesto (n en días)	μ Media ($L_{EX,8h}$ en dB)	Desviación Estándar (σ en db)	Valor máximo registrado (dB)	Valor mínimo registrado (dB)
Trabajador A	199	63,04	11,15	86,97	42,72
Trabajador B	112	33,16	5,55	48,21	16,95

Gráfico 1. Comparación del $L_{EX,8h}$ promedio entre los perfiles ocupacionales analizados.



El Gráfico 1 muestra la comparación gráfica del $L_{EX,8h}$ promedio entre ambos perfiles ocupacionales.

3.3. Variabilidad relativa de la exposición

Con el fin de complementar el análisis descriptivo del $L_{EX,8h}$, se estimó el coeficiente de variación (CV) para cada trabajador. Este indicador permite evaluar la variabilidad relativa de los niveles de exposición respecto a su media anual.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} * 100$$

Donde:

- σ = Desviación estandar
- μ = media

**Trabajador A:**

$$CV_{Trabajador A} = \frac{11,15}{63,04} * 100$$

$$CV_{Trabajador A} = 17,7\%$$

Trabajador B:

$$CV_{Trabajador B} = \frac{5,55}{33,16} * 100$$

$$CV_{Trabajador B} = 16,7\%$$

El coeficiente de variación del nivel de exposición diaria equivalente fue del 17.7 % para el Técnico A y del 16.7 % para el Técnico B, lo que indica una variabilidad moderada en los niveles de exposición al ruido entre jornadas laborales. Desde la perspectiva de la higiene ocupacional, valores de CV elevados reflejan fluctuaciones significativas en la exposición diaria, asociadas a la alternancia entre tareas de distinta intensidad sonora. Esta variabilidad implica que, aun cuando el promedio global pueda situarse en niveles moderados, pueden ocurrir episodios puntuales de alta exposición con relevancia para el riesgo auditivo.

En particular, los mayores niveles de exposición se registraron en actividades asociadas a la industria petrolera, especialmente durante operaciones de perforación, donde el funcionamiento continuo de equipos rotatorios (generadores, bombas y maquinaria pesada) genera niveles de presión sonora significativamente elevados. Por el contrario, actividades en empresas manufactureras presentan condiciones acústicas considerablemente más bajas. Esta heterogeneidad de escenarios operativos explica la dispersión observada en los datos diarios de $L_{EX,8h}$.

Como resultado, la combinación de escenarios de alta y baja exposición dentro del mismo conjunto de datos produce una dispersión moderada en los valores diarios de $L_{EX,8h}$.

Desde la perspectiva de la evaluación del riesgo auditivo ocupacional, esta variabilidad es relevante, ya que indica que los trabajadores pueden experimentar exposiciones intermitentes de alta intensidad durante tareas críticas, aun cuando el promedio diario no supere los límites normativos. Estos picos de exposición contribuyen de manera desproporcionada a la carga energética total recibida por el sistema auditivo y pueden incrementar el potencial de daño a largo plazo si no se implementan medidas de control adecuadas, como protección auditiva efectiva o gestión de tareas ruidosas.

3.4.Comparación estadística de la exposición diaria al ruido entre perfiles ocupacionales

Con el fin de evaluar si el $L_{EX,8h}$ difiere significativamente entre los perfiles ocupacionales analizados, se aplicó una prueba t de Student para muestras independientes suponiendo varianzas desiguales (prueba de Welch). Esta prueba permite determinar si las diferencias observadas entre las medias de ambos grupos pueden atribuirse al azar o reflejan condiciones de exposición acústica inherentemente distintas.

**Tabla 2. Estadísticos descriptivos de la exposición diaria al ruido por perfil ocupacional**

	Trabajador A	Trabajador B
Media	63,04	33,16
Varianza	124,24	30,78
Observaciones	199	112
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	305	
Estadístico t	31,51	
P(T<=t) una cola	3,15E-98	
Valor crítico de t (una cola)	1,65	
P(T<=t) dos colas	6,30E-98	
Valor crítico de t (dos colas)	1,97	

Los resultados descriptivos muestran que el Técnico A presenta una exposición promedio de 63.04 dB, mientras que el Técnico B registra un promedio de 33.16 dB. Asimismo, la variabilidad de la exposición es mayor en el Técnico A (varianza = 124.24) en comparación con el Técnico B (varianza = 30.78), lo que sugiere condiciones acústicas más fluctuantes en las actividades desempeñadas por el primer perfil.

La prueba t de Welch evidenció diferencias altamente significativas entre ambos grupos ($t = 31.51$; $gl = 305$; $p < 0.001$). Dado que el p-valor obtenido es considerablemente menor que el nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$), se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias.

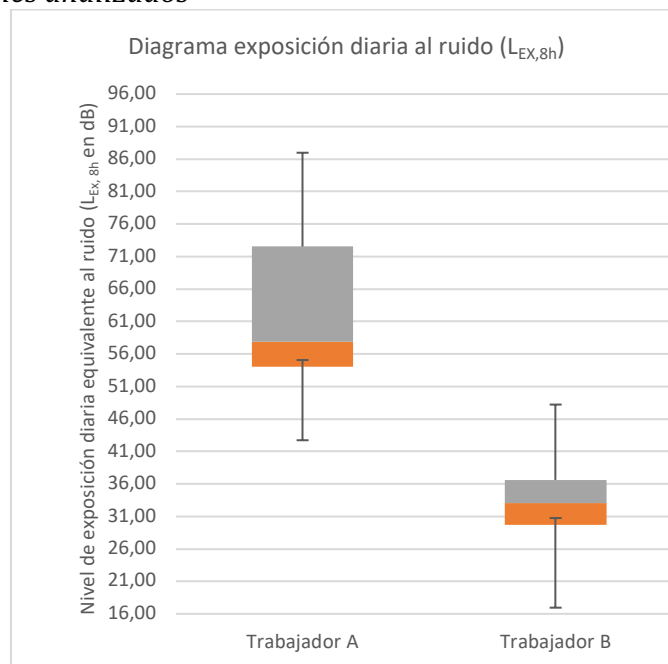
Estos resultados indican que los perfiles ocupacionales analizados están expuestos a condiciones acústicas sustancialmente distintas, lo cual puede atribuirse a la naturaleza de las actividades desarrolladas y a los entornos industriales en los que se realizan las mediciones. En términos de riesgo auditivo ocupacional, esta diferencia sugiere que el Técnico A enfrenta una carga energética sonora significativamente mayor, lo que podría implicar un mayor potencial de daño auditivo a largo plazo si no se aplican medidas adecuadas de control y protección.

3.5. Distribución de la exposición diaria al ruido mediante diagramas de caja y bigotes

Con el fin de visualizar la distribución, dispersión y asimetría del $L_{EX,8h}$ en los perfiles ocupacionales analizados, se emplearon diagramas de caja y bigotes (boxplots). Este tipo de representación gráfica permite identificar la posición de la mediana, el rango intercuartílico, la variabilidad de los datos y la presencia de valores extremos, proporcionando una interpretación complementaria al análisis estadístico inferencial.

**Tabla 3.** Estadísticos descriptivos para la construcción de los diagramas de caja y bigotes

	Trabajador A	Trabajador B
Mínimo	42,72	16,95
Q1	54,06	29,74
Q2	57,85	33,04
Q3	72,53	36,61
Máximo	86,97	48,21
CAJA 1	54,06	29,74
CAJA 2	3,79	3,29
CAJA 3	14,69	3,57
BIGOTE SUP	14,44	11,60
BIGOTE INF	11,34	12,80

Gráfico 2. Diagramas de caja y bigotes de la exposición diaria al ruido ($L_{EX,8h}$) para los perfiles ocupacionales analizados

El diagrama de caja correspondiente al Técnico A evidencia niveles de exposición significativamente superiores y mayor variabilidad en comparación con el Técnico B. La mediana se ubica alrededor de 57.87 dB, mientras que el rango intercuartílico se extiende aproximadamente desde 54.06 dB hasta 72.53 dB, lo que indica una dispersión considerable de los valores centrales. El bigote superior alcanza aproximadamente 86.97 dB, reflejando la presencia de jornadas con exposición elevada cercanas al umbral de acción para riesgo auditivo ocupacional. En contraste, el bigote inferior se sitúa cerca de 42.72 dB, lo que evidencia un amplio rango total de exposición.

Por otro lado, el Técnico B presenta una distribución mucho más compacta y simétrica. La mediana se ubica alrededor de 23.04 dB, con un rango intercuartílico relativamente estrecho entre 29.74 dB y 36.61 dB. Los bigotes se extienden



aproximadamente desde 16.93 dB hasta 48.21 dB, lo que sugiere menor variabilidad y ausencia de exposiciones extremas comparables a las del Técnico A.

La comparación entre ambos diagramas muestra una clara separación entre las distribuciones, con valores consistentemente más altos y dispersos para el Técnico A. Esta diferencia sugiere que las condiciones de trabajo asociadas a este perfil implican mayor carga acústica y mayor incertidumbre en la exposición diaria, posiblemente debido a la diversidad de actividades y entornos industriales en los que se desarrollan las mediciones. En contraste, el Técnico B parece desempeñarse en escenarios más homogéneos desde el punto de vista acústico.

En términos de riesgo auditivo ocupacional, la mayor amplitud del rango intercuartílico y la presencia de valores máximos elevados en el Técnico A indican un potencial de exposición acumulativa significativamente superior, lo que coincide con los resultados obtenidos mediante la prueba t de Student y refuerza la evidencia de diferencias sustanciales entre ambos perfiles ocupacionales.

3.6. Análisis de jornadas con exposición superior al nivel de acción para ruido ocupacional

Con el fin de complementar la evaluación estadística de la exposición al ruido y analizar la ocurrencia de jornadas con potencial riesgo auditivo, se realizó un análisis específico de los días en los que el $L_{EX,8h}$ superó el nivel de acción de 85 dB. Este valor constituye el umbral ampliamente reconocido en normativas internacionales de higiene ocupacional, incluyendo los criterios establecidos por la OSHA, así como por la normativa nacional aplicable en seguridad y salud en el trabajo, establecido en el Anexo 3. Norma Técnica en Seguridad e Higiene del Trabajo del Decreto Ejecutivo 255.

El análisis permitió identificar la frecuencia de jornadas con exposición elevada, así como las condiciones operativas y actividades industriales asociadas a dichas exposiciones.

Tabla 4. Número de jornadas con exposición diaria superior a 85 dB

Tipo de Trabajador	Número de días mayores a 85db (n en días)
Trabajador A	13
Trabajador B	0

Los resultados evidencian que el Técnico A registró 13 jornadas laborales con niveles de exposición diaria equivalente al ruido superiores a 85 dB, mientras que el Técnico B no presentó ninguna jornada que superara este nivel de acción durante el periodo de estudio.

El análisis detallado de las condiciones de trabajo asociadas a estas jornadas permitió identificar que la totalidad de los eventos de mayor exposición se encuentran vinculados principalmente con actividades de perforación en instalaciones del sector industrial analizado. Estas actividades se caracterizan por la presencia de maquinaria pesada, equipos de alta potencia y operaciones mecánicas continuas que generan niveles sonoros significativamente elevados.

Asimismo, se observó que en la mayoría de estos casos la duración de las tareas de perforación fue aproximadamente de 4 horas, lo cual sugiere que dichas actividades constituyen el principal determinante de las exposiciones más elevadas registradas en el estudio. En algunos casos puntuales se identificaron exposiciones asociadas a periodos



ligeramente menores (por ejemplo, 3 horas), lo cual se refleja en valores cercanos al umbral de 85 dB.

Estos resultados permiten inferir que la variabilidad observada en los niveles de exposición del Técnico A se encuentra estrechamente relacionada con la naturaleza específica de las actividades desarrolladas durante las campañas de monitoreo, particularmente aquellas vinculadas con operaciones de perforación. En contraste, el Técnico B desempeñó actividades en entornos industriales con condiciones acústicas considerablemente más estables, lo que explica la ausencia de jornadas que superen el nivel de acción para riesgo auditivo.

3.7. Evaluación del percentil 95 de la exposición diaria

Con el fin de evaluar el comportamiento de los niveles de exposición diaria en relación con los criterios regulatorios aplicables en el contexto nacional, se estimó el percentil 95 (P95) de los valores de $L_{EX,8h}$ registrados para cada trabajador durante el periodo de estudio. El percentil 95 constituye un indicador estadístico que permite identificar el nivel de exposición que no es superado por el 95 % de las jornadas evaluadas, siendo ampliamente utilizado en estudios de higiene ocupacional para caracterizar condiciones de exposición en escenarios variables.

La evaluación se realizó tomando como referencia el criterio establecido en el Anexo 3. Norma Técnica en Seguridad e Higiene del Trabajo del Decreto Ejecutivo 255, la cual dispone que:

“La exposición ocupacional a ruido continuo deberá ser controlada de modo que ningún trabajador pueda ser expuesto durante ocho horas o más a un nivel de presión sonora continua equivalente superior a 85 dB(A) medidos en la posición del oído del trabajador”.

En concordancia con este criterio regulatorio, se calculó el percentil 95 de los valores de $L_{EX,8h}$ para cada perfil ocupacional analizado.

Tabla 5. Percentil 95 (p95) del $L_{EX,8h}$ y comparación con el Valor Límite de Exposición

Tipo de Trabajador	Percentil 95 (P95 en dB)	Valor Límite de Exposición (dB)
Trabajador A	85,20	85,00
Trabajador B	42,37	85,00

Los resultados obtenidos indicaron que:

- El trabajador A presentó un percentil 95 de 85.20 dB(A).
- El trabajador B presentó un percentil 95 de 42.37 dB(A).

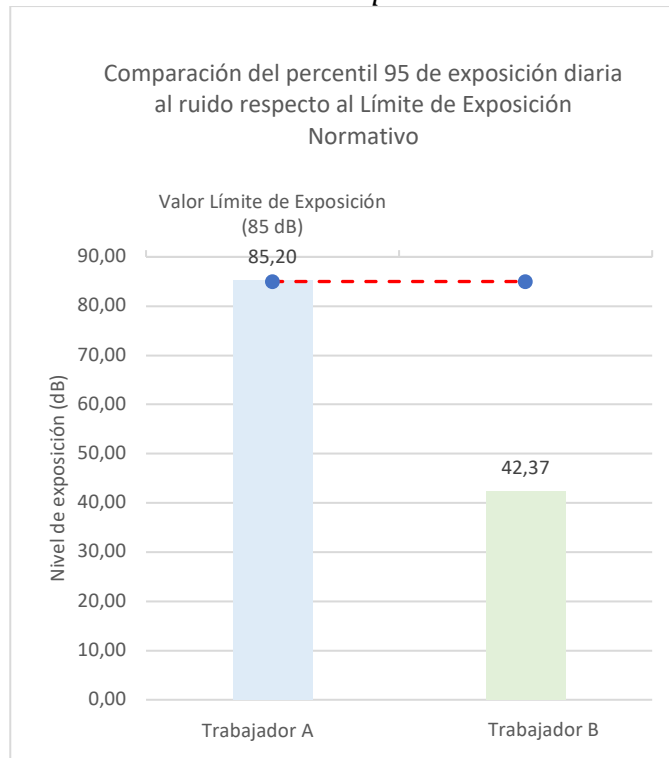
La proximidad del percentil 95 del trabajador A al valor de referencia de 85 dB(A) evidencia que, aunque el promedio anual de exposición se mantiene por debajo del límite normativo, existen jornadas específicas en las que los niveles de ruido se aproximan al umbral regulatorio establecido por la normativa nacional.

En contraste, el trabajador B presentó un percentil 95 considerablemente inferior al criterio de referencia, reflejando condiciones de exposición acústica significativamente menores durante las actividades evaluadas.



El Grafico 3 muestra la comparación entre los percentiles de exposición estimados para ambos perfiles ocupacionales y el valor de referencia establecido en la normativa nacional.

Gráfico 3. Comparación del percentil 95 de exposición diaria al ruido respecto al Valor Límite de Exposición



Los resultados obtenidos indican que el trabajador A presentó un percentil 95 de 85,20 dB, valor que se encuentra prácticamente en el umbral establecido por el criterio normativo de 85 dB. Este resultado evidencia que, aunque el promedio anual de exposición se mantiene dentro de los límites permitidos, existen jornadas específicas en las que los niveles de ruido alcanzan valores cercanos al límite regulatorio, lo que sugiere la presencia de condiciones de exposición potencialmente críticas durante determinadas actividades laborales.

En contraste, el trabajador B presentó un percentil 95 de 42,37 dB, valor considerablemente inferior al criterio de referencia establecido por la normativa nacional, lo que refleja condiciones de exposición acústica significativamente menores durante el periodo evaluado. En términos de gestión preventiva, los resultados sugieren que el trabajador A se encuentra en una condición de exposición cercana al límite regulatorio, por lo que se recomienda mantener medidas de control y seguimiento periódico de los niveles de ruido con el fin de prevenir posibles superaciones del límite permisible. Por su parte, el trabajador B presenta condiciones de exposición significativamente por debajo del criterio normativo, lo que indica un riesgo acústico bajo en las actividades evaluadas.



Proyección del potencial de pérdida auditiva inducida por ruido basada en el percentil 95 de exposición

- El percentil 95 de exposición para el trabajador A alcanzó 85,20 dB, valor que se sitúa dentro del rango de niveles asociados con el desarrollo de pérdida auditiva inducida por ruido en exposiciones prolongadas según el modelo de la norma ISO 1999:2013. Bajo la hipótesis de que este nivel de exposición se mantenga de forma recurrente a lo largo de la vida laboral, podría esperarse la aparición de desplazamientos permanentes del umbral auditivo, particularmente en frecuencias altas.
- En contraste, el percentil 95 correspondiente al trabajador B fue de 42,37 dB, nivel considerablemente inferior a aquellos asociados con efectos auditivos adversos, lo que sugiere un potencial mínimo de deterioro auditivo atribuible al ruido ocupacional incluso en escenarios de exposición prolongada.

3.8. Frecuencia de superación del límite de exposición diaria al ruido

Con el fin de complementar el análisis estadístico de los niveles de exposición al ruido realizado mediante el percentil 95 (P95), se evaluó la frecuencia de jornadas laborales en la que el ($L_{EX,8h}$) superaron el valor límite de exposición establecido por la normativa nacional.

Este análisis permite identificar la ocurrencia de jornadas específicas en las que los niveles de exposición superan el criterio regulatorio, proporcionando una perspectiva adicional sobre la variabilidad de la exposición y la presencia de eventos de exposición elevada dentro del período evaluado.

De acuerdo con lo establecido en el Anexo 3 de la Norma Técnica de Seguridad e Higiene del Trabajo del Decreto Ejecutivo 2393, la exposición ocupacional a ruido continuo debe controlarse de manera que ningún trabajador sea expuesto durante una jornada laboral de 8 horas a un nivel de presión sonora continuo equivalente superior a 85 dB(A) medidos en la posición del oído del trabajador.

En este contexto, se contabilizó el número de días en las que los valores de $L_{EX,8h}$ registrados para cada trabajador superaron el criterio de referencia de 85 dB(A).

Tabla 6. Número de días con niveles de exposición diaria superiores a 85 dB(A)

Tipo de Trabajador	Días expuesto (día)	Número de días mayores a 85db (día)
Trabajador A	199	13
Trabajador B	112	0

Los resultados obtenidos indican que el trabajador A presentó 13 días laborales con niveles de exposición diaria superiores a 85 dB(A) durante el período evaluado, lo que evidencia la ocurrencia de episodios específicos de exposición acústica que superan el criterio establecido por la normativa nacional.

En contraste, el trabajador B no presentó días con niveles de exposición superiores a 85 dB(A), lo que refleja condiciones de exposición significativamente menores durante las actividades monitoreadas.



La presencia de días que superan el límite de exposición en el caso del trabajador A es consistente con el análisis del percentil 95, el cual mostró valores cercanos al umbral normativo, indicando que en determinadas condiciones operativas pueden registrarse incrementos temporales en los niveles de ruido ocupacional.

El análisis de la frecuencia de superación del límite de exposición permite identificar la ocurrencia de días laborales con niveles de ruido superiores al criterio regulatorio establecido por la normativa nacional.

En el caso del trabajador A, la presencia de 13 días con niveles superiores a 85 dB(A) sugiere la existencia de condiciones operativas en las que los niveles de ruido pueden alcanzar valores cercanos o superiores al límite permitido, lo que refuerza la necesidad de implementar medidas de control orientadas a reducir la exposición ocupacional.

Por otro lado, el trabajador B no presentó superaciones del límite durante el período evaluado, lo que confirma que las condiciones de exposición asociadas a sus actividades se mantienen dentro de márgenes aceptables en relación con el criterio normativo vigente.

3.9. Distribución de frecuencia de los niveles de exposición diaria al ruido

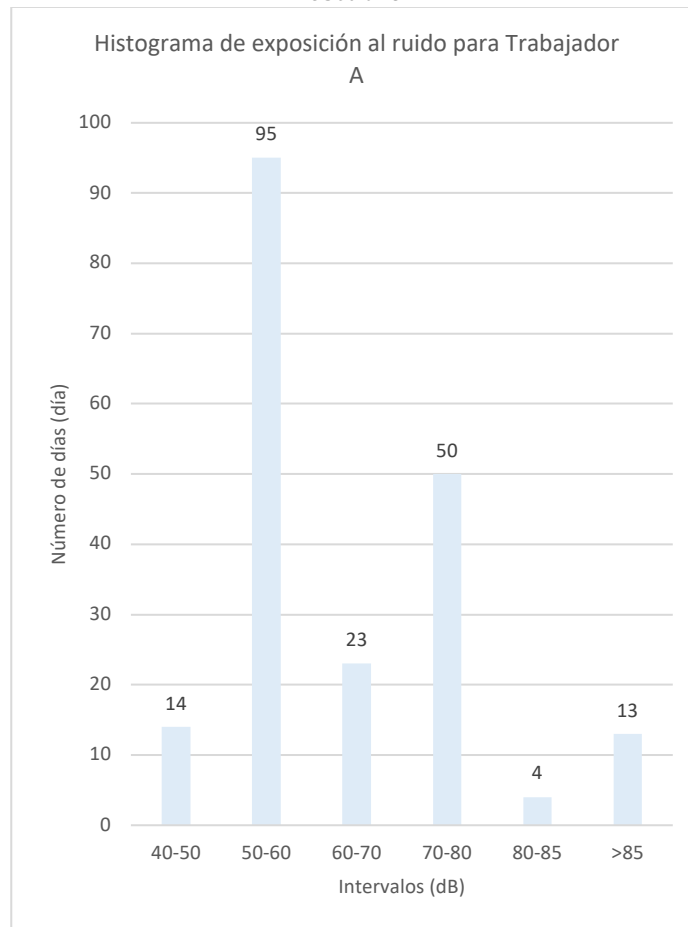
Con el fin de caracterizar el comportamiento estadístico de los niveles de exposición diaria al ruido, se realizó un análisis de distribución de frecuencia de los valores de $L_{EX,8h}$ registrados durante el período de estudio. Este análisis permite identificar la concentración de las mediciones dentro de distintos rangos de exposición acústica, proporcionando una visión más detallada de la variabilidad de los niveles de ruido ocupacional.

Tabla 7. Distribución de frecuencia del $L_{EX,8h}$ para el trabajador A durante el año 2024

Intervalo (dB)	Frecuencia para Trabajador A días
40-50	14
50-60	95
60-70	23
70-80	50
80-85	4
>85	13



Gráfico 4. Histograma de distribución del $L_{EX,8h}$ para el trabajador A durante el período de estudio



El análisis de la distribución de frecuencia del $L_{EX,8h}$ para el trabajador A evidenció que la mayor proporción de los registros se concentró en el intervalo comprendido entre 50 y 60 dB, con 95 días, lo que representa aproximadamente el 47,7 % del total de días evaluados durante el período de estudio.

En segundo lugar, se identificó una frecuencia relevante en el intervalo de 70 a 80 dB, con 50 días registrados, seguido por el intervalo de 60 a 70 dB, con 23 días. Estos resultados indican que una parte significativa de la exposición diaria se mantiene dentro de rangos de exposición sonora moderada.

Por otro lado, los intervalos de menor frecuencia correspondieron a 40 a 50 dB, con 14 días, y 80 a 85 dB, con 4 días registrados. Sin embargo, se identificaron 13 días en los que los niveles de exposición diaria superaron los 85 dB de los 199 días que estuvo expuesto representa el 6,5%.

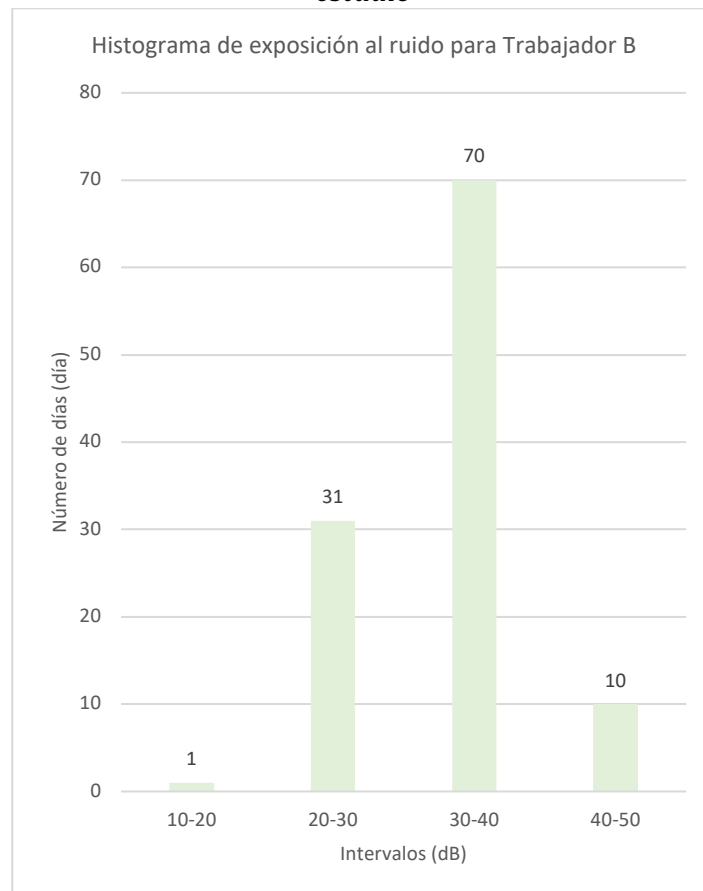
En términos generales, la distribución observada indica que, aunque la mayoría de los valores de exposición diaria se mantiene dentro de rangos moderados, existen eventos puntuales de exposición elevada que superan el límite recomendado, lo cual podría representar condiciones potenciales de riesgo auditivo si dichas exposiciones se presentan de manera repetitiva o prolongada.



Tabla 8. Distribución de frecuencia del $L_{EX,8h}$ para el trabajador B durante el año 2024

Intervalo (dB)	Frecuencia para Trabajador B días
10-20	1
20-30	31
30-40	70
40-50	10

Gráfico 5. Histograma de distribución del $L_{EX,8h}$ para el trabajador B durante el período de estudio



El análisis de la distribución de frecuencia del $L_{EX,8h}$ para el trabajador B mostró que la mayor proporción de los registros se concentró en el intervalo comprendido entre 30 y 40 dB, con 70 días, lo que representa aproximadamente el 62,5 % del total de días evaluados durante el período de estudio.

En segundo lugar, se observó una frecuencia relevante en el intervalo de 20 a 30 dB, con 31 días registrados, lo que evidencia que una parte significativa de las actividades desarrolladas por este trabajador se realiza en entornos con niveles de presión sonora relativamente bajos.

Por otra parte, los intervalos de menor frecuencia correspondieron a 40 a 50 dB, con 10 días, y 10 a 20 dB, con 1 día registrado, lo cual indica que los niveles de exposición diaria más bajos o ligeramente superiores ocurrieron con menor frecuencia durante el período analizado.



En términos generales, la distribución observada refleja que los niveles de exposición sonora para el trabajador B se mantienen predominantemente dentro de rangos bajos de exposición, muy por debajo del límite de exposición ocupacional de 85 dB.

Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones evaluadas, el riesgo potencial de exposición ocupacional al ruido para el trabajador B es bajo, debido a que la totalidad de los registros se encuentra significativamente por debajo del nivel de referencia para una jornada equivalente de 8 horas.

3.10. Comparación técnica entre Trabajador A y Trabajador B

El análisis comparativo de la distribución de frecuencia del $L_{EX,8h}$ entre el trabajador A y el trabajador B evidencia diferencias significativas en los patrones de exposición sonora asociados a las actividades desempeñadas.

En el caso del trabajador A, los niveles de exposición presentan una distribución más amplia, abarcando intervalos desde 40 hasta valores superiores a 85 dB, con una concentración predominante en el intervalo de 50 a 60 dB (95 días). Asimismo, se registraron 13 días con niveles superiores a 85 dB, lo que indica la presencia de eventos puntuales en los que la exposición sonora alcanza niveles cercanos o superiores al límite de exposición ocupacional.

Por otro lado, el trabajador B presenta una distribución significativamente más baja, concentrándose principalmente en el intervalo de 30 a 40 dB (70 días), seguido por el intervalo de 20 a 30 dB (31 días). Ninguno de los registros del trabajador B supera los 50 dB, lo que evidencia que las actividades realizadas por este trabajador se desarrollan en ambientes con niveles de presión sonora considerablemente menores.

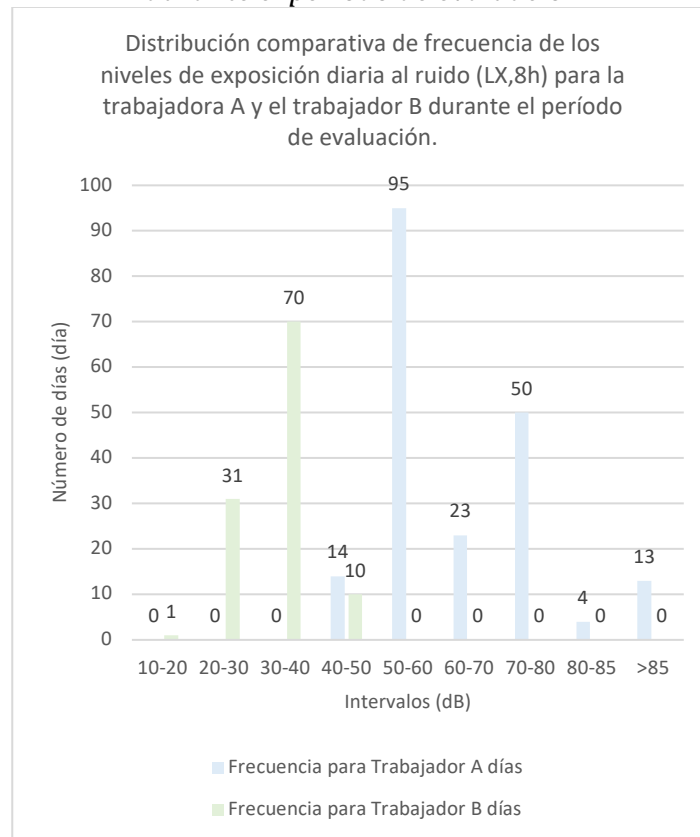
En términos generales, la comparación de ambas distribuciones sugiere que el trabajador A está expuesta a entornos acústicos más variables y potencialmente más intensos, mientras que el trabajador B desempeña sus actividades en condiciones acústicas relativamente estables y de baja exposición sonora.

Tabla 9. Comparación de frecuencias entre Trabajador A y Trabajador B

Intervalo (dB)	Frecuencia para Trabajador A días	Frecuencia para Trabajador B días
10-20	0	1
20-30	0	31
30-40	0	70
40-50	14	10
50-60	95	0
60-70	23	0
70-80	50	0
80-85	4	0
>85	13	0



Gráfico 6. Distribución comparativa del $L_{EX,8h}$ para el trabajador A y el trabajador B durante el período de evaluación



Los resultados obtenidos evidencian diferencias sustanciales en los patrones de exposición sonora entre los trabajadores evaluados, lo cual está directamente relacionado con la naturaleza de las actividades desarrolladas y los entornos operativos en los que se desempeñan.

En el caso del trabajador A, la distribución de frecuencias muestra una mayor dispersión de los niveles de exposición, incluyendo registros que superan los 85 dB, valor que comúnmente se reconoce como nivel de referencia para la exposición ocupacional al ruido durante una jornada equivalente de ocho horas. La presencia de estos eventos sugiere la existencia de tareas específicas o condiciones operativas que generan incrementos puntuales en los niveles de presión sonora.

Por el contrario, el trabajador B presenta una distribución concentrada en rangos considerablemente más bajos, principalmente entre 30 y 40 dB, lo que indica que sus actividades se desarrollan en entornos con niveles de ruido ambiental relativamente reducidos.

Por otra parte, la distribución observada para el trabajador B sugiere un escenario de exposición acústica de bajo riesgo, ya que la totalidad de los registros se mantiene muy por debajo de los niveles típicamente asociados con efectos adversos sobre la audición. En consecuencia, el análisis comparativo permite identificar diferencias significativas en el perfil de exposición sonora entre ambos trabajadores, lo cual constituye un elemento fundamental para el diseño de estrategias de control del ruido, la implementación de medidas de protección auditiva y la evaluación del riesgo ocupacional conforme a los lineamientos establecidos en la norma ISO.



3.11. Distribución temporal de la exposición

El análisis temporal de los niveles de exposición al ruido permite identificar la variabilidad y evolución de los valores diarios registrados durante el periodo de monitoreo. Este tipo de análisis facilita la identificación de patrones de comportamiento en la exposición ocupacional, asociados a las condiciones operativas y a la naturaleza de las actividades desarrolladas.

Gráfico 7. Evolución Temporal del $L_{EX,8h}$ en dB), Trabajador A

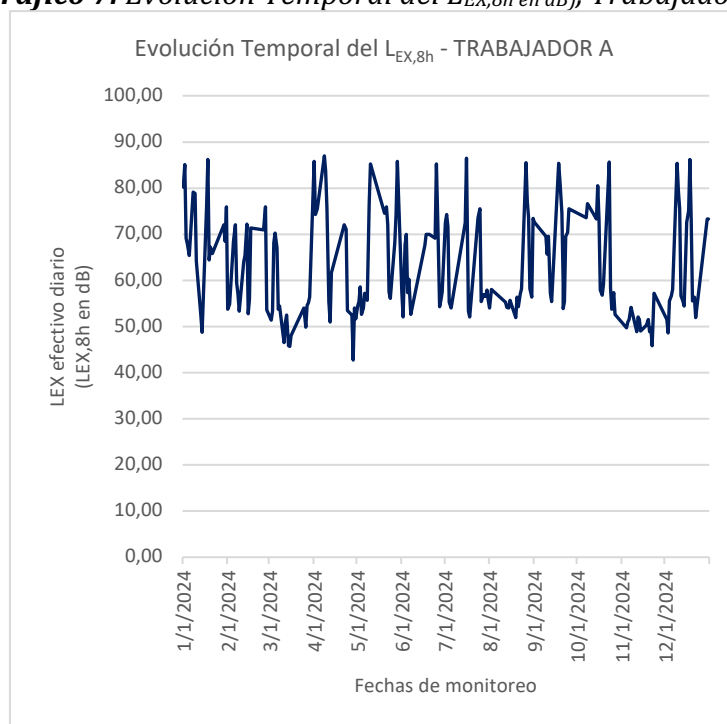
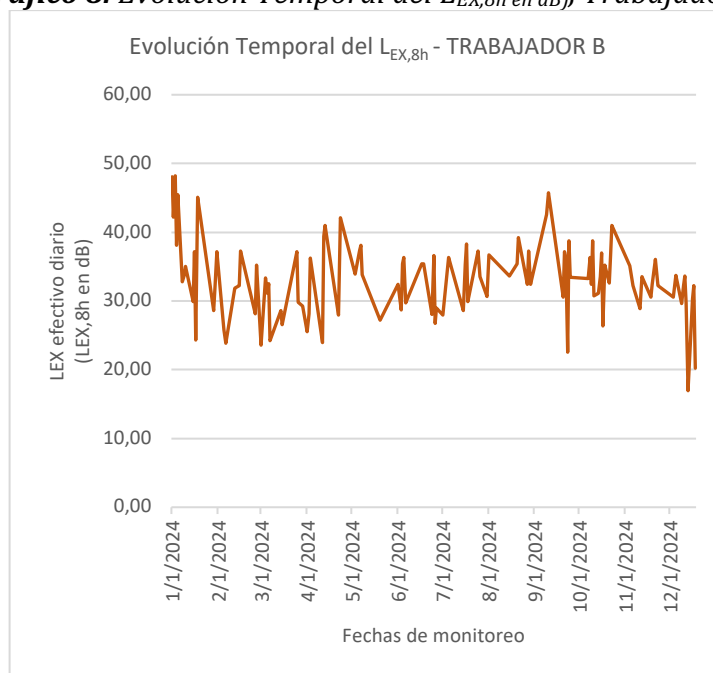


Gráfico 8. Evolución Temporal del $L_{EX,8h}$ en dB), Trabajador B





La serie temporal del $L_{EX,8h}$ evidencia una mayor variabilidad en el trabajador A, con fluctuaciones frecuentes entre aproximadamente 45 y 80 dB, lo que refleja la influencia de actividades operativas con diferentes niveles de emisión sonora propias de entornos industriales dinámicos.

En contraste, el trabajador B presenta una serie temporal más estable, con valores mayoritariamente concentrados entre 20 y 35 dB, indicando una exposición acústica relativamente homogénea asociada a actividades de monitoreo ambiental o tareas con menor intensidad sonora.

Estas diferencias en la variabilidad temporal sugieren que la naturaleza de las operaciones realizadas por cada trabajador influye significativamente en el perfil de exposición al ruido, siendo más variable en contextos operativos intensivos y más estable en actividades técnicas de medición.

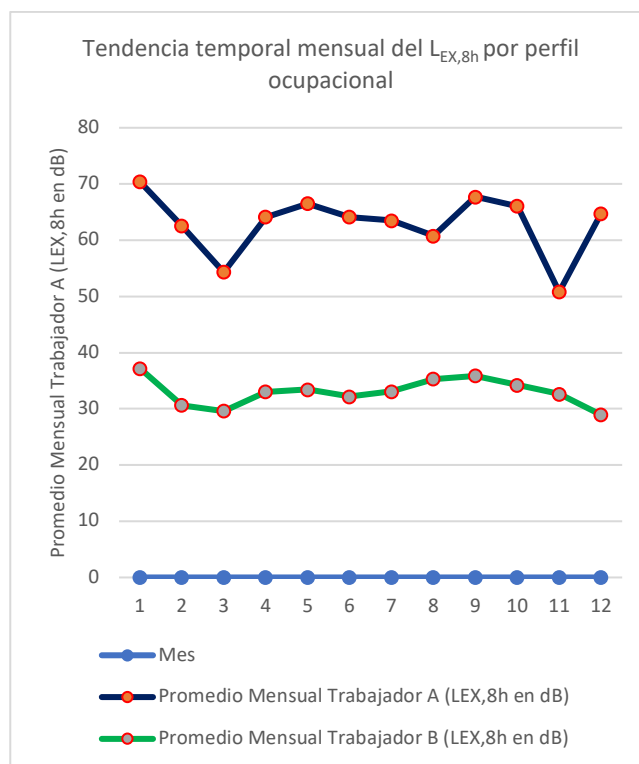
3.12. Análisis de tendencia temporal de la exposición al ruido

Con el fin de identificar posibles patrones temporales en la exposición ocupacional al ruido, se realizó un análisis de tendencia basado en la evolución cronológica de los niveles diarios equivalentes registrados durante el periodo de estudio. Este análisis permite evaluar si la exposición presenta variaciones sistemáticas asociadas a la programación de actividades, al tipo de industria o a la asignación operativa de los trabajadores, aportando información relevante sobre la dinámica real del riesgo en trabajos de campo itinerantes.

Tabla 10. Promedio mensual del $L_{EX,8h}$ por perfil ocupacional

Mes	Promedio Mensual Trabajador A ($L_{EX,8h}$ en dB)	Promedio Mensual Trabajador B ($L_{EX,8h}$ en dB)	Días expuestos al mes Trabajador A (día)	Días expuestos al mes Trabajador B (día)
Enero	70,38	37,18	18	15
Febrero	62,55	30,62	16	7
Marzo	54,31	29,62	18	10
Abril	64,11	33,04	18	8
Mayo	66,49	33,43	16	6
Junio	64,14	32,17	17	11
Julio	63,51	33,09	17	9
Agosto	60,74	35,31	17	7
Septiembre	67,71	35,89	15	8
Octubre	66,05	34,24	13	13
Noviembre	50,79	32,63	14	8
Diciembre	64,74	28,92	20	10

Gráfico 9. Tendencia temporal mensual del $L_{EX,8h}$ por perfil ocupacional



La tendencia temporal mensual del $L_{EX,8h}$ evidencia diferencias sustanciales entre los perfiles ocupacionales analizados. El trabajador A presenta niveles consistentemente superiores durante todo el periodo evaluado, con valores comprendidos entre 50,79 dB y 70,38 dB. Los mayores niveles se registran en enero, mayo y septiembre, lo que sugiere una mayor participación en actividades operativas caracterizadas por elevada emisión sonora durante estos meses. En contraste, los valores más bajos se observan en marzo y noviembre, lo que podría estar asociado a cambios en la programación de tareas o a la ejecución de actividades en entornos menos ruidosos.

Por su parte, el trabajador B muestra una exposición significativamente menor y una variabilidad reducida, con valores entre 28,92 dB y 37,18 dB a lo largo del año. Esta estabilidad indica que sus actividades se desarrollan predominantemente en contextos de baja carga acústica o con menor intensidad de exposición diaria. La diferencia sostenida entre ambos perfiles sugiere que la asignación operativa y el tipo de tareas desempeñadas constituyen factores determinantes en la magnitud de la exposición ocupacional al ruido. Asimismo, el mayor número de días con exposición mensual registrado para el trabajador

A refuerza la hipótesis de una mayor participación en actividades de campo con presencia de fuentes sonoras relevantes, lo que se traduce en una mayor carga energética acumulada anual. En conjunto, los resultados indican que la exposición al ruido en técnicos de monitoreo ambiental está fuertemente influenciada por la naturaleza de las tareas asignadas y por el entorno industrial específico, evidenciando que trabajadores con el mismo rol pueden presentar niveles de exposición sustancialmente diferentes según sus actividades operativas.

3.13. Integración energética acumulada anual de la exposición al ruido

La evaluación de la exposición ocupacional al ruido requiere considerar la naturaleza logarítmica de los niveles sonoros, por lo que la comparación directa entre niveles en decibeles puede resultar limitada para interpretar la carga total de exposición. Por esta razón, los niveles diarios de exposición se transforman a una escala energética,



permitiendo estimar la energía acústica acumulada asociada a la exposición laboral. Este enfoque es consistente con los principios utilizados en la evaluación de exposición ocupacional al ruido establecidos en la ISO 1999:2013, donde el riesgo auditivo se relaciona con la energía sonora recibida a lo largo del tiempo.

Para estimar la energía acústica equivalente asociada al nivel de exposición promedio de cada trabajador, se utilizó la siguiente relación:

$$ER = 10^{\frac{L}{10}}$$

Donde:

- *ER = Energía acústica relativa asociada al nivel de exposición.*
- *L = Nivel de Exposición Diaria Normalizada a 8 horas (LEX, 8h) en dB.*
- *10 = Factor asociado a la escala logarítmica de los decibels.*

Esta expresión permite transformar el nivel de presión sonora en una magnitud proporcional a la energía acústica, permitiendo comparar de forma directa la carga energética de exposición entre trabajadores. Para cada trabajador se utilizó el nivel promedio anual de exposición (media del $L_{EX,8h}$) obtenido a partir de los registros diarios de medición.

Trabajador A:

$$ER = 10^{\frac{63,04}{10}}$$

$$ER = 2015832,75$$

Trabajador B:

$$ER = 10^{\frac{23,16}{10}}$$

$$ER = 207,21$$

Los resultados evidencian una diferencia sustancial en la energía acústica acumulada asociada a la exposición laboral entre ambos perfiles ocupacionales. El trabajador A presenta un valor energético significativamente mayor, lo cual refleja la mayor intensidad sonora característica de las actividades industriales del sector petrolero, donde las operaciones de perforación, maquinaria pesada y equipos auxiliares generan niveles de presión sonora elevados.

En contraste, el trabajador B presenta una energía acústica considerablemente menor, coherente con la naturaleza de las actividades de monitoreo ambiental, las cuales se desarrollan principalmente en entornos operativos con menores niveles de ruido industrial.

Desde una perspectiva de evaluación del riesgo auditivo, este análisis confirma que la exposición ocupacional del trabajador A representa una carga energética acústica significativamente superior, lo que coincide con la mayor variabilidad y los episodios de niveles elevados observados previamente en el análisis temporal de los niveles diarios de exposición.



3.14. Comparación estructural de perfiles de exposición ocupacional al ruido

Con el fin de caracterizar las diferencias en los niveles de exposición ocupacional al ruido entre los trabajadores evaluados, se realizó una comparación estructural de los perfiles de exposición considerando los valores del $L_{EX,8h}$, la distribución de frecuencias de exposición, la variabilidad temporal anual y la energía acústica relativa asociada a cada perfil ocupacional.

Este enfoque permite describir cuantitativamente las diferencias entre los patrones de exposición registrados durante el período de estudio.

Comparación de los niveles medios de exposición

Los resultados obtenidos muestran diferencias marcadas entre los niveles medios de exposición al ruido registrados para ambos trabajadores.

Tabla 11. Valores comparativos entre la Media y la Energía acústica relativa

Tipo de Trabajador	μ Media (LEX,8h en dB)	Energía acústica relativa
Trabajador A	63,04	2015832,75
Trabajador B	33,16	2072,21

La comparación de los perfiles de exposición también es consistente con los resultados obtenidos en los análisis previos de este estudio, incluyendo:

- La distribución de frecuencias de los niveles de exposición diaria.
- La frecuencia de superación del valor de referencia de 85 dB(A).
- La variabilidad temporal anual de los niveles $L_{EX,8h}$.

En conjunto, estos resultados muestran que el trabajador A presenta una mayor dispersión de valores y presencia de exposiciones en rangos superiores, mientras que el trabajador B mantiene niveles de exposición dentro de intervalos significativamente menores.

El análisis de exposición ocupacional basado en niveles equivalentes de exposición sonora y su conversión a escala energética se fundamenta en los principios establecidos en la norma ISO 1999:2013 que establece que la evaluación del riesgo asociado a la exposición ocupacional al ruido se basa en la relación entre:

- El nivel de exposición sonora equivalente.
- La duración de la exposición.
- La energía acústica acumulada.

Por esta razón, la conversión de los niveles de exposición a una escala energética permite representar de forma cuantitativa la diferencia en la magnitud de la exposición entre distintos perfiles ocupacionales.

Los resultados obtenidos evidencian diferencias claras en los niveles de exposición acústica acumulada entre los técnicos evaluados, asociadas principalmente al tipo de actividades y sectores industriales en los que desarrollan sus labores de monitoreo. En particular, el técnico con mayor participación en actividades vinculadas al sector petrolero presenta valores de exposición energética superiores respecto a aquellos cuya actividad se concentra en entornos manufactureros. Esta diferencia se explica por las condiciones acústicas típicas de las instalaciones petroleras, donde la presencia de generadores, compresores y otros equipos de alta potencia produce niveles elevados de presión sonora durante periodos de trabajo prolongados.



Desde la perspectiva de la evaluación de exposición ocupacional, los resultados son coherentes con el enfoque energético establecido en la norma ISO 9612:2009, que plantea que la exposición diaria al ruido debe evaluarse considerando la contribución acumulada de las diferentes tareas realizadas durante la jornada laboral. En este contexto, la mayor permanencia en ambientes con niveles elevados de presión sonora genera un incremento proporcional en la energía acústica recibida por el trabajador. Este comportamiento adquiere relevancia cuando se interpreta a la luz de los criterios epidemiológicos descritos en la norma ISO 1999:2013, la cual establece relaciones entre exposición prolongada al ruido y la probabilidad de desarrollar pérdida auditiva inducida por ruido en poblaciones laborales expuestas durante periodos prolongados.

Si bien el presente estudio no pretende establecer de manera directa la aparición de enfermedad ocupacional, los resultados permiten evidenciar cómo determinadas formas de organización del trabajo pueden generar diferencias significativas en la carga energética de exposición entre trabajadores que realizan funciones similares. En particular, la asignación reiterada de un mismo técnico a actividades en sectores con altos niveles de ruido puede incrementar su exposición acumulada en comparación con otros técnicos del mismo equipo de trabajo. Desde una perspectiva preventiva, este hallazgo sugiere la necesidad de revisar los criterios de asignación de tareas y la planificación operativa de las campañas de monitoreo.

En este sentido, la rotación planificada de técnicos entre diferentes tipos de instalaciones industriales podría constituir una medida organizativa eficaz para distribuir de manera más equilibrada la exposición ocupacional al ruido dentro del equipo de trabajo. La alternancia entre actividades realizadas en sectores con diferentes perfiles acústicos permitiría reducir la concentración de exposición energética en determinados trabajadores, contribuyendo a una gestión preventiva más equitativa del riesgo.

No obstante, el estudio presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas en la interpretación de los resultados. En primer lugar, el análisis se basa en registros de monitoreo ambiental utilizados como referencia para estimar la exposición diaria equivalente, por lo que no se dispone de mediciones personales mediante dosimetría durante la totalidad de la jornada laboral. Esta situación podría introducir incertidumbre en la estimación de la exposición real, ya que los niveles ambientales no necesariamente reflejan con precisión la dosis sonora efectivamente recibida por el trabajador, especialmente en actividades con alta movilidad o variabilidad espacial del ruido.

Asimismo, el número de técnicos evaluados corresponde a un conjunto limitado de casos representativos de la operación del laboratorio, lo que restringe la posibilidad de generalizar los resultados a otros contextos laborales. La variabilidad de las condiciones industriales, los tipos de instalaciones y las tareas específicas podría dar lugar a patrones de exposición distintos en poblaciones más amplias, por lo que los resultados deben interpretarse principalmente como evidencia exploratoria o indicativa.

Estas limitaciones podrían afectar la validez externa del estudio, particularmente en lo referente a la extrapolación de los niveles de riesgo auditivo a otros entornos ocupacionales. Sin embargo, la consistencia interna de los resultados, evidenciada por la concordancia entre los análisis estadísticos, los percentiles de exposición y la identificación de actividades críticas como la perforación, sugiere que los hallazgos reflejan tendencias reales dentro del contexto operativo analizado.

Futuras investigaciones podrían abordar estas limitaciones mediante la implementación de dosimetría personal continua durante la totalidad de la jornada laboral, lo que permitiría estimar con mayor precisión la dosis sonora acumulada. Asimismo, la incorporación de un mayor número de trabajadores, diferentes perfiles



ocupacionales y múltiples campañas de medición en diversos entornos industriales contribuiría a mejorar la robustez estadística y la generalización de los resultados. También sería recomendable integrar variables adicionales, como el uso efectivo de protectores auditivos, la duración real de las tareas y la distancia a las fuentes de ruido, con el fin de desarrollar modelos predictivos más completos del riesgo auditivo ocupacional.

Los resultados obtenidos muestran que el Técnico A presenta algunos días con $L_{EX,8h}$ superiores al nivel de acción de 85 dB, así como un percentil 95 cercano al valor límite, lo cual tiene implicaciones directas en términos de cumplimiento de la normativa internacional sobre ruido ocupacional. De acuerdo con lo establecido en la OSHA 29 CFR 1910.95 la exposición igual o superior a 85 dB como promedio ponderado de 8 horas obliga a la implementación de un programa de conservación auditiva que incluya monitoreo periódico del ruido, evaluación audiométrica, capacitación a los trabajadores y provisión de protectores auditivos adecuados. En este contexto, la identificación de 13 días con exposición superior a dicho nivel, asociadas principalmente a actividades de perforación, sugiere la necesidad de adoptar medidas preventivas específicas durante estas tareas críticas, tales como la planificación de tiempos de exposición, el uso obligatorio de protección auditiva con atenuación suficiente y la evaluación periódica de los niveles sonoros en campo.

Desde una perspectiva de salud a largo plazo, los niveles de exposición observados también son relevantes en relación con la norma internacional ISO 1999:2013 Acústica, Estimación de la pérdida auditiva inducida por ruido, la cual establece modelos para estimar la probabilidad de pérdida auditiva inducida por ruido en función de la magnitud y duración de la exposición. Aunque el promedio anual de exposición se mantiene cercano o inferior a los límites normativos, la presencia de jornadas con niveles elevados y alta variabilidad sugiere un potencial incremento del riesgo acumulativo de daño auditivo, especialmente si dichas condiciones se mantienen a lo largo del tiempo laboral. En consecuencia, los resultados del estudio respaldan la necesidad de estrategias preventivas integrales que incluyan la selección adecuada de protectores auditivos, la rotación de tareas en actividades de alta emisión sonora, el control del ruido en la fuente cuando sea técnicamente viable y la vigilancia audiométrica periódica, con el fin de reducir la probabilidad de deterioro auditivo progresivo en técnicos expuestos a entornos industriales ruidosos.

Los hallazgos del presente estudio, que identifican jornadas con niveles de exposición cercanos o superiores a 85 dB y una asociación clara con actividades de perforación, son consistentes con lo reportado en la literatura internacional sobre ruido ocupacional en entornos industriales y de campo, donde las tareas que involucran maquinaria pesada y procesos de perforación se reconocen como fuentes predominantes de exposición elevada. Diversos estudios han señalado que la exposición intermitente pero recurrente a niveles superiores al nivel de acción puede generar una dosis sonora acumulativa suficiente para producir pérdida auditiva inducida por ruido a largo plazo, incluso cuando los promedios globales de exposición se mantienen dentro de límites normativos. En este sentido, los resultados también se alinean con los modelos de predicción establecidos por la ISO 1999:2013, que indican que el riesgo auditivo depende tanto de la magnitud como de la duración de la exposición a lo largo del tiempo laboral. Desde una perspectiva preventiva, las implicaciones prácticas para técnicos de campo incluyen la priorización de medidas de control durante actividades críticas, la implementación sistemática de programas de conservación auditiva conforme a lo establecido por la OSHA 29 CFR 1910.95 y el uso consistente de protectores auditivos con



atenuación adecuada. Asimismo, la identificación de tareas específicas asociadas a mayores niveles de exposición permite orientar estrategias de gestión del riesgo como la rotación de personal, la planificación de tiempos de permanencia y la vigilancia audiométrica periódica, contribuyendo a reducir la probabilidad de deterioro auditivo progresivo en trabajadores expuestos a ambientes industriales ruidosos.

4. Conclusiones

El presente estudio permitió caracterizar y comparar los perfiles de exposición ocupacional al ruido de técnicos ambientales que desarrollan actividades de monitoreo en distintos sectores industriales, mediante un enfoque de integración energética basado en $L_{EX,8h}$. A partir del análisis de registros de medición obtenidos durante campañas reales de trabajo de campo, se evidencian diferencias estructurales en la carga acústica acumulada entre trabajadores asignados a contextos operativos distintos, confirmando que la exposición al ruido no depende únicamente de los niveles instantáneos registrados, sino de la interacción entre intensidad sonora, duración de las tareas y frecuencia de las jornadas con exposición relevante a lo largo del tiempo.

Los resultados muestran que la naturaleza del entorno industrial influye de manera directa en la magnitud de la exposición, destacándose que las actividades realizadas en instalaciones del sector petrolero, particularmente aquellas vinculadas a procesos de perforación, se asocian con niveles de exposición más elevados y con una mayor acumulación energética acústica en comparación con otros contextos industriales. Esta diferencia refleja la combinación de fuentes sonoras de alta potencia, tiempos de permanencia significativos y recurrencia de tareas en entornos ruidosos, lo que configura escenarios de riesgo potencialmente superiores incluso cuando los promedios globales se mantienen cercanos a los límites normativos.

Desde el punto de vista metodológico, el estudio demuestra la utilidad del enfoque energético para evaluar la exposición ocupacional al ruido en trabajadores itinerantes que operan en múltiples instalaciones con condiciones acústicas variables. La integración temporal de los niveles de exposición permite transformar registros dispersos de monitoreo ambiental en indicadores comparables de carga acústica acumulada, facilitando la interpretación de escenarios reales donde la exposición fluctúa entre jornadas y entre trabajadores que desempeñan funciones similares, aportando una herramienta aplicable a la gestión preventiva en actividades de monitoreo ambiental y otros trabajos de campo.

En términos de gestión del riesgo, los hallazgos sugieren que la organización logística de las campañas de monitoreo constituye un factor determinante en la distribución de la exposición entre los miembros del equipo. La asignación reiterada de un mismo técnico a sectores caracterizados por altos niveles de ruido puede generar concentraciones de exposición que, sostenidas en el tiempo, incrementen la probabilidad de efectos adversos sobre la salud auditiva. En consecuencia, se recomienda implementar estrategias de planificación operativa que incluyan la rotación programada de personal entre sectores con distintos perfiles acústicos, la limitación del tiempo de permanencia en actividades críticas de alta emisión sonora y la priorización del uso de protección auditiva adecuada durante tareas identificadas como de mayor riesgo.

Asimismo, los resultados ponen de manifiesto la necesidad de fortalecer los programas de conservación auditiva dirigidos a técnicos de campo, incorporando evaluaciones audiométricas periódicas, campañas de dosimetría personal para validar la exposición individual real y la verificación sistemática de la eficacia de los protectores auditivos utilizados en condiciones operativas. Estas acciones permitirían mejorar el



seguimiento longitudinal de la exposición y detectar de forma temprana posibles cambios en la capacidad auditiva, contribuyendo a la prevención de pérdida auditiva inducida por ruido en este tipo de ocupaciones.

De manera particularmente relevante, el análisis comparativo entre los dos perfiles evaluados evidencia que trabajadores que desempeñan funciones similares pueden presentar diferencias sustanciales en su exposición acumulada al ruido debido a la variabilidad en los contextos operativos, la distribución de tareas y la frecuencia de participación en actividades de alta emisión sonora. Los resultados estadísticos obtenidos confirman que el perfil asociado al sector petrolero concentra una carga acústica significativamente mayor, con presencia de jornadas que alcanzan o superan niveles considerados de acción para riesgo auditivo, mientras que el perfil vinculado a otros entornos industriales mantiene exposiciones considerablemente inferiores. Este contraste demuestra que el riesgo no está determinado exclusivamente por la ocupación formal, sino por la interacción dinámica entre entorno, organización del trabajo y duración efectiva de la exposición. En consecuencia, el estudio pone de manifiesto la necesidad de adoptar evaluaciones individualizadas de exposición en técnicos itinerantes, evitando asumir homogeneidad de riesgo dentro de un mismo grupo ocupacional, y refuerza la importancia de diseñar estrategias preventivas específicas basadas en los perfiles reales de exposición y no únicamente en la descripción general del puesto de trabajo.

Finalmente, el enfoque desarrollado integra mediciones ambientales, análisis energético de la exposición y comparación de perfiles ocupacionales, proporcionando una base técnica para la toma de decisiones preventivas en actividades de monitoreo ambiental. Los resultados obtenidos constituyen un aporte para la comprensión de cómo las condiciones reales de operación y la organización del trabajo influyen en la exposición al ruido en técnicos itinerantes, y evidencian la necesidad de futuras investigaciones que incorporen mediciones personales continuas en un mayor número de trabajadores, así como el análisis de la relación entre exposición acumulada y efectos auditivos a largo plazo, con el fin de optimizar las estrategias de protección de la salud ocupacional en entornos industriales.

5. Referencias

- American National Standards Institute. (2008). ANSI S12.6-2008: Methods for measuring the real-ear attenuation of hearing protectors. ANSI.
- American National Standards Institute. (2002). ANSI S12.68-2002: Methods of estimating effective A-weighted sound pressure levels when hearing protectors are worn. ANSI.
- European Committee for Standardization. (2018). EN ISO 4869-2: Acoustics — Hearing protectors — Part 2: Estimation of effective A-weighted sound pressure levels when hearing protectors are worn. CEN.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). NTE INEN-ISO 9612:2014. Acústica — Determinación de la exposición al ruido en el trabajo — Método de ingeniería (ISO 9612:2009, IDT). INEN.
- International Organization for Standardization. (2013). ISO 1999:2013. Acoustics — Estimation of noise-induced hearing loss. ISO.



- International Organization for Standardization. (2009). ISO 9612:2009. Acoustics — Determination of occupational noise exposure — Engineering method. ISO.
- International Organization for Standardization. (2018). ISO 4869-2:2018. Acoustics — Hearing protectors — Part 2: Estimation of effective A-weighted sound pressure levels when hearing protectors are worn. ISO.
- Ministerio del Trabajo del Ecuador. (2016). Decreto Ejecutivo 255. Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo. Registro Oficial.
- Ministerio del Trabajo del Ecuador. (2016). Anexo 3: Norma técnica de seguridad e higiene del trabajo para la evaluación de la exposición al ruido. Registro Oficial.
- National Institute for Occupational Safety and Health. (1998). Criteria for a recommended standard: Occupational noise exposure. NIOSH.
- Occupational Safety and Health Administration. (2019). Occupational noise exposure standard (29 CFR 1910.95). OSHA.
- Berger, E. H., Royster, L. H., Royster, J. D., Driscoll, D. P., & Layne, M. (2016). The noise manual (6th ed.). American Industrial Hygiene Association.
- Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S., & Stansfeld, S. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383(9925), 1325–1332.
- Lie, A., Skogstad, M., Johannessen, H., Tynes, T., Mehlum, I., Nordby, K. C., Engdahl, B., & Tambs, K. (2016). Occupational noise exposure and hearing: A systematic review. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 89(3), 351-372.
- Masterson, E. A., Bushnell, P. T., Themann, C. L., & Morata, T. C. (2016). Hearing impairment among noise-exposed workers. *American Journal of Industrial Medicine*, 59(7), 531-542.
- Neitzel, R. L., Gershon, R., Zeltser, M., Canton, A., & Akram, M. (2009). Noise levels associated with industrial equipment. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 6(7), 389-398.
- Seixas, N., Neitzel, R., Stover, B., & Sheppard, L. (2012). Longitudinal assessment of noise exposure in construction workers. *Annals of Occupational Hygiene*, 56(7), 789-798.
- Suter, A. H. (2002). *Construction noise: Exposure, effects and the potential for remediation*. AIHA Press.
- World Health Organization. (2018). *Environmental noise guidelines for the European region*. WHO.