

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

ISSN-L 2958-0188
JUNIO 2026

Nro.
13
EDICIÓN
DIGITAL

INDEXADA AL DIALNET



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Maria Eugenia García Moreno Ph. D.
Dr. Tito V. Estevez Martini
M.Sc. Ing. Miguel Angel Calla Carrasco
M.Sc. Ing. Marcelo Ramirez Molina
Mg. Ing. Aldo Felipe Vargas Pacheco

Rector
Vicerrector
Decano Facultad de Ingeniería
ViceDecano Facultad de Ingeniería
Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición impresa N°13 Junio 2026

Comite Editor:

M.Sc. Ing. Fernando Sanabria Camacho
Ing. Mario Zenteno Benitez PhD.
Ing. Oswaldo Terán Modragón PhD.
Ing. Mónica Lino Humerez PhD.
Ing. Franz Zenteno Benitez PhD.

Diseño Versión Impresa & Web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
unsplash.com/es

Imprenta:
ITM Latinoamericana

Deposito Legal:
4 - 3 - 68 - 2020

Web:
<http://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Dirección:
Av. Mcal. Santa Cruz, Plaza Del Obelisco.
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería.
Tel. 2205000 - 2205067 Int. 1402

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

**EDICIÓN DIGITAL N° 13
JUNIO - 2026**

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Maria Eugenia Garcia Moreno Ph. D.	Rectora
Dr. Tito V. Estevez Martini	Vicerrector
M.Sc. Ing. Miguel Angel Calla Carrasco	Decano Facultad de Ingeniería
M.Sc. Ing. Marcelo Ramirez Molina	ViceDecano. Facultad de Ingeniería
Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco	Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición Digital N°. 13 - Junio 2026

Comite Editor:

M.Sc. Ing. Fernando Floren Sanabria Camacho
Ing. Mario Fermín Zenteno Benítez Ph.D.
Ing. Oswaldo Fernando Terán Modregón Ph.D.
Ing. Paula Mónica Lino Humerez Ph.D.
Ing. Franz Zenteno Benítez Ph.D.

Diseño Tapa Versión Impresa & Web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
unsplash.com/es

Imprenta:
ITM LATINOAMÉRICA

Deposito Legal:
4 - 3 - 68 - 2020

Web:
<https://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175, Plaza del Obelisco
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería
Telf. 2205000-2205067, Int. 1402
Campus Universitario, Cota Cota - calle 30

PROLOGO

Revista "Industrial 4.0"

Frente a la volatilidad social y económica actual, la 13ª edición de la Revista Científica INDUSTRIAL 4.0 demuestra cómo la ingeniería industrial actúa como un flujo sinérgico que transfiere innovación integral a las organizaciones. Este ecosistema unificado inicia en la transformación digital, donde el Control basado en eventos para la eficiencia energética optimiza el flujo de datos industriales en procesos complejos. Dicha eficiencia se traslada al ámbito de la salud con el Monitoreo inteligente mediante IoT en Farmacéutica, asegurando estricta trazabilidad térmica regulatoria, y se acopla a las decisiones comerciales y de inventarios con el Pronóstico de la demanda mediante el modelo Prophet, reduciendo drásticamente la incertidumbre logística.



Esta resiliencia operativa converge directamente con la sustentabilidad y el aprovechamiento de recursos. La autonomía energética industrial se impulsa con el Generador asíncrono en generación distribuida, mientras que el modelo de Inventario de Gases de Efecto Invernadero aplicado en la Facultad de Ingeniería de la UMSA audita consumos para viabilizar la reducción de costos operativos, mismo que puede ser replicado en cualquier tipo de organización. Asimismo, la Modelación matemática de los niveles de presión sonora vehicular redefine el diseño de centros logísticos urbanos. En ingeniería de procesos y economía circular, el modelado térmico de Liofilización del Copoazú y de la Liofilización del Mango añade alto valor comercial a recursos amazónicos con bajo consumo energético, sincronizándose con el uso estratégico de Chamota en pastas cerámicas estructurales para reducir costos de materias primas en la construcción.

Finalmente, se abarcan temas de la gobernanza del entorno donde se consolidan estos analizando la Dinámica de exportaciones no tradicionales, los riesgos del Ciclo inmobiliario y las estructuras para Emprendimientos industriales. Para garantizar la

confiabilidad operativa en planta, el estudio contra el P-hacking previene decisiones erróneas por falsos positivos en el control de calidad. Este despliegue de valor es articulado y sostenido por el talento humano validado por la Acreditación ARCU-SUR en la Carrera de Ingeniería Industrial de la UMSA. Así, esta edición reafirma que la frontera científica no es un esfuerzo aislado, sino un engranaje integrado de alta eficiencia y productividad que potencia la sostenibilidad socioeconómica de las organizaciones, empresas, actores normativos a nivel local y regional.

Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

<https://doi.org/10.53287/sfyh8479wo58p>

MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS NIVELES DE PRESIÓN SONORA, UN ENFOQUE GEOESPACIAL SOBRE CONTAMINACIÓN ACÚSTICA VEHICULAR

Ing. Juan Carlos Quispe Apaza, M.Sc.

ORCID 0000-0002-7533-6604

Correo-e: jcquispe15@umsa.bo

Carrera de Ingeniería Industrial - Universidad Mayor de San Andrés

RESUMEN

La presente investigación desarrolla y valida un Modelo de Predicción Acústica para la Ciudad de La Paz, una adaptación técnica de los estándares internacionales RLS-90 (Alemania) y ASJ RTN (Japón), diseñada específicamente para la caracterización del ruido generado por el tráfico vehicular en entornos de alta topografía. El estudio se centró en cinco nodos críticos del eje metropolitano de La Paz, Bolivia, donde la configuración de cañón urbano y las pendientes pronunciadas actúan como amplificadores del nivel de presión sonora.

A diferencia de los modelos convencionales diseñados a nivel del mar, el modelo propuesto integra variables barométricas (corrección por altitud) y un factor de gradiente C_g que captura el sobreesfuerzo del motor de combustión en pendientes de hasta el 12%, los resultados muestran una interesante predicción en los niveles sonoros calculados, respecto de los valores oficiales del GAMLP (Gobierno Autónomo Municipal de La Paz), con un error residual de 0.24 dB(A) en promedio.

El análisis comparativo revela una transgresión sistemática de la Ordenanza Municipal 152/2010, con excedencias de hasta 14.6 dB(A) en zonas comerciales y 14.2 dB(A) en áreas hospitalarias, lo que evidencia un riesgo crítico para la salud pública, se concluye que el ruido en La Paz es un fenómeno de saturación energética que requiere una reingeniería de flujos vehiculares y la transición hacia tecnologías

de baja emisión sonora bajo el paradigma de la Industria 4.0.

Palabras Clave: Contaminación acústica, tráfico vehicular, modelo de predicción acústica, ingeniería de montaña, Industria 4.0, La Paz.

ABSTRACT

This research develops and validates an Acoustic Prediction Model for the City of La Paz, a technical adaptation of the international standards RLS-90 (Germany) and ASJ RTN (Japan), specifically designed for characterizing the noise generated by vehicular traffic in environments with high topography. The study focused on five critical nodes along the metropolitan axis of La Paz, Bolivia, where the urban canyon configuration and steep slopes act as amplifiers of the sound pressure level.

Unlike conventional models designed at sea level, the proposed model integrates barometric variables (altitude correction) and a gradient factor C_g that captures the extra strain on the combustion engine on slopes of up to 12%. The results show an interesting prediction of the calculated sound levels, compared to the official values of the GAMLP (Autonomous Municipal Government of La Paz), with a residual error of 0.24 dB(A) on average.

The comparative analysis reveals a systematic violation of Municipal Ordinance 152/2010, with exceedances of up to 14.6 dB(A) in commercial zones and 14.2 dB(A) in hospital areas, demonstrating a critical risk to public health. It is concluded that noise in La Paz is a phenomenon of energy saturation that requires a re-engineering of vehicular flows and a transition to low-noise technologies under the Industry 4.0 paradigm.

Keywords: Noise pollution, vehicular traffic, acoustic prediction model, mountain engineering, Industry 4.0, La Paz.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación acústica urbana representa una de las externalidades negativas más críticas del crecimiento demográfico y la expansión del parque automotor, en ciudades con topografías accidentadas como La Paz, este fenómeno adquiere una complejidad particular, ya que la propagación sonora no solo depende de la densidad del flujo vehicular, sino de la interacción entre la mecánica de los motores y la pendiente de las vías, investigaciones recientes en el ámbito hispanohablante

enfatan que el ruido debe ser gestionado como un problema de salud pública prioritario debido a sus efectos neurofisiológicos crónicos (García & Faus, 2020).

Tradicionalmente, la modelación de ruido se ha basado en estándares diseñados para ciudades a nivel del mar y terrenos llanos, sin embargo, en la región metropolitana de La Paz, factores como la hipobaría y el gradiente topográfico invalidan la aplicación directa de modelos internacionales sin una calibración previa. La literatura técnica actual confirma que la pendiente de las vías es un factor determinante que incrementa significativamente la potencia sonora emitida por los vehículos de combustión, el esfuerzo adicional para vencer pendientes superiores al 10%, como en el nodo Pérez Velasco, genera una firma acústica que los modelos convencionales omiten.

La investigación propone un modelo de predicción acústica adaptado a condiciones de gran altitud (~3600 m s. n. m.), a diferencia de enfoques generalistas, este trabajo se fundamenta en metodologías de revisión sistemática para mapas de ruido en centros urbanos con características topográficas similares (Vásquez & Betancur, 2021). Mediante la modelación en cinco nodos estratégicos, se busca verificar que el ruido en el eje troncal paceño es un problema de saturación energética, integrando herramientas de análisis geoespacial para una planificación urbana más efectiva (González-Lozano & Rodríguez, 2022).

2 OBJETIVO

Desarrollar un modelo matemático de predicción acústica para la caracterización del nivel de presión sonora generado por el tráfico vehicular en la región metropolitana de la ciudad de La Paz, integrando variables de gradiente topográfico e hipobaría.

3 DESARROLLO

Al golpear una campana, al encender la radio, el sonido se oye en distintos puntos de la fuente emisora, el sonido es una onda elástica que se propaga a través de un medio, pudiendo ser este gaseoso, líquido o sólido, el medio más familiar de propagación del sonido es el aire (medio gaseoso), por ejemplo, un individuo para comunicarse en forma oral efectúa un movimiento en las cuerdas vocales que generan un cambio de presión en el medio y se produce una perturbación que va viajando por el aire, se genera una onda viajera denominada onda de sonido.

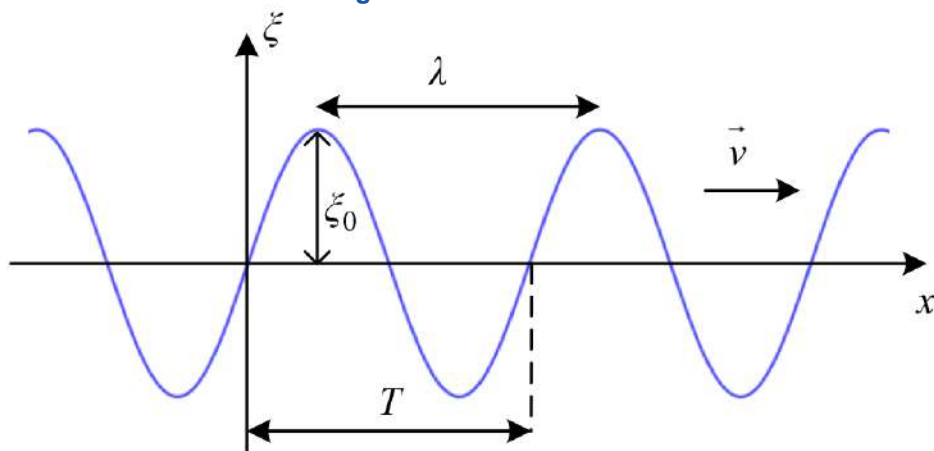
Fundamentos matemáticos de la onda sonora

Una onda tiene una serie de características que la definen, la longitud de onda “ λ ”, la amplitud de fase “ ξ_0 ”, la velocidad de fase “ v ”, la frecuencia periódica “ ω ”, el periodo “ T ”, el medio también tiene características muy importantes que influyen en el comportamiento de la onda, su densidad “ ρ ”.

$$\xi(x, t) = \xi_0 \sin(kx - \omega t + \phi) \quad \dots \quad (1)$$

Donde: ϕ es la fase inicial para $(t=0, x=0)$, $k=2\pi/\lambda$, $\omega=2\pi f$

Figura 1: Onda elástica



Nota. (Alonso & Finn, 1970, p. 694)

A partir del desplazamiento de las partículas $\xi(x,t)$, se define la **presión sonora instantánea $p(t)$** como la desviación local de la presión ambiental respecto a la presión atmosférica estática, matemáticamente esta magnitud es proporcional al gradiente espacial del desplazamiento, vinculada a través del módulo de compresibilidad del medio B, determina qué tan rígido es el aire al paso del sonido.

$$p(t) = -B \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad \dots \quad (2)$$

Donde:

$p(t)$: Presión sonora instantánea, medida en pascales Pa, fluctúa rápidamente por encima y debajo de la presión atmosférica, B el módulo de compresibilidad

adiabática del aire y $\partial\xi/\partial x$ representa la deformación volumétrica.

Sin embargo, se recalca que el ser humano no escucha $p(t)$, debido a que oscila miles de veces por segundo y por su comportamiento senoidal $p(t)$ oscila positivamente (compresión) y negativamente (descompresión), el promedio simple de sus mediciones sería cero, por esa razón se usa el valor eficaz de la presión sonora p_{rms} (Root Mean Square), que se calcula promediando el cuadrado de la presión y luego extrayendo su raíz cuadrada, p_{rms} es el valor que siente el oído humano y el que miden los sonómetros, queda definida por:

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad \dots \quad (3)$$

La presión atmosférica estándar es de aproximadamente 101325 Pa, mientras que el umbral de audición humana es de apenas 0.00002 Pa (2×10^{-5} Pa), por tanto, los cambios que se perciben no son lineales, sino relativos, se compara la presión eficaz medida p_{rms} con la presión mínima audible, esta magnitud es adimensional.

Nivel de Presión Sonora (SPL)

La sensación audible no es lineal respecto a la presión mecánica, el sistema auditivo humano actúa como un transductor biológico que transforma las variaciones de presión (Pascuales) en impulsos eléctricos, siguiendo una respuesta logarítmica a los estímulos, esta característica define el rango de frecuencias audibles, el **Nivel de Presión Sonora** (SPL por sus siglas en inglés *Sound Pressure Level*), emplea el decibelio (dB) como unidad de medida, expresado mediante la siguiente función:

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_0} \right) [dB] \quad \dots \quad (4)$$

Donde:

L_p : Nivel de presión sonora medido en dB

p_{rms} : presión sonora eficaz (rms) medida en pascuales Pa

$p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa, corresponde al umbral de audición humana a 1000 Hz

El Decibel lineal (dB)

El decibel es una unidad logarítmica que expresa la relación entre una presión sonora eficaz medida y una presión de referencia, sin embargo, el dB lineal trata a todas las frecuencias por igual, desde los graves más profundos hasta los agudos más altos, matemáticamente, es la representación pura de la energía de la onda.

El Decibel Ponderado (dBA)

El oído humano es menos sensible a las frecuencias bajas (graves) y muy sensible a las frecuencias medias y altas (donde se encuentra la voz humana), para que los sonómetros escuchen como el oído humano, se aplica un filtro llamado Ponderación A, según el estándar internacional IEC 61672, el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado L_A se determina mediante la suma logarítmica de los niveles de presión sonora en bandas de octava L_{pi} , integrando factores de corrección W_{Ai} para cada frecuencia de la ponderación A.

$$L_A = 10 \cdot \log_{10} \left[\sum_{i=1}^n 10^{0.1(L_{pi} + W_{Ai})} \right] \quad \dots \quad (5)$$

En síntesis, el decibelio (dB) es el valor físico, empleado cuando se habla de la energía de una fuente (por ejemplo, la potencia de un motor o el ruido de fondo total), en cambio el decibelio ponderado dB(A), es el valor con filtro del (dB), filtro que imita al oído humano, en resumen puede tenerse un Nivel de Presión Sonora medido en dB (físico) o en dB(A) (fisiológico), mientras que un sonómetro en modo lineal (dB) capturará la energía total del ruido de fondo, la medición en dB(A) atenuará significativamente esos componentes graves, reflejando el impacto real sobre la salud pública, esto conlleva una importancia en la Normativa Pacea, el Reglamento de Gestión Ambiental 152/2010 y la Ley 1333 establecen sus límites en dB(A).

Precisión Legal: Un informe técnico que no especifica la ponderación A puede ser anulado en una auditoría ambiental, ya que los límites de 68 dB para zonas comerciales se refieren específicamente a 68 dB(A).

Nivel Sonoro Equivalente Continuo (Leq)

Dado que las fuentes sonoras urbanas presentan una alta variabilidad temporal,

la métrica técnica estándar para la evaluación de la exposición es el Nivel Sonoro Equivalente Continuo L_{eq} , este se define como el nivel de presión sonora constante que, en un intervalo de tiempo T , posee la misma energía acústica que el sonido fluctuante real, matemáticamente, se expresa mediante la integración de la presión acústica cuadrática y en su forma discreta mediante una sumatoria.

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right) \dots (6) , L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_i} \right) \dots (7)$$

Donde L_i representa el nivel instantáneo de la muestra i y n es el número total de mediciones, el L_{eq} sintetiza la energía acumulada en periodos de tiempo (por ejemplo, 15 minutos en puntos de alto flujo como el punto Pérez Velasco).

Nivel Sonoro de Evaluación (NSE)

El NSE es el indicador final que integra el nivel energético medido L_{eq} con las correcciones adicionales que reflejan la molestia subjetiva y el potencial daño auditivo, según el procedimiento normativo vigente, el NSE se determina como:

$$NSE = L_{eq} + K_i + K_t + K_f \dots (8)$$

Donde K_i , K_t , K_f representan las correcciones aplicables por componentes impulsivos, tonalidad marcada o predominancia de bajas frecuencias, respectivamente.

Influencia de la altitud en la medición acústica

Las ciudades de La Paz y El Alto se ubican entre 3200 y 4100 m.s.n.m., donde la presión atmosférica promedio es de 64 kPa (aproximadamente el 63% de la presión a nivel del mar), esta condición afecta las siguientes características:

Calibración del sonómetro: Los micrófonos de condensador requieren ajuste por presión atmosférica o corrección post procesamiento, según la curva del fabricante.

Impedancia acústica: $Z = \rho c$, disminuye con la reducción de la densidad del aire ρ , reduciendo la atenuación por absorción molecular y modificando ligeramente la propagación esférica.

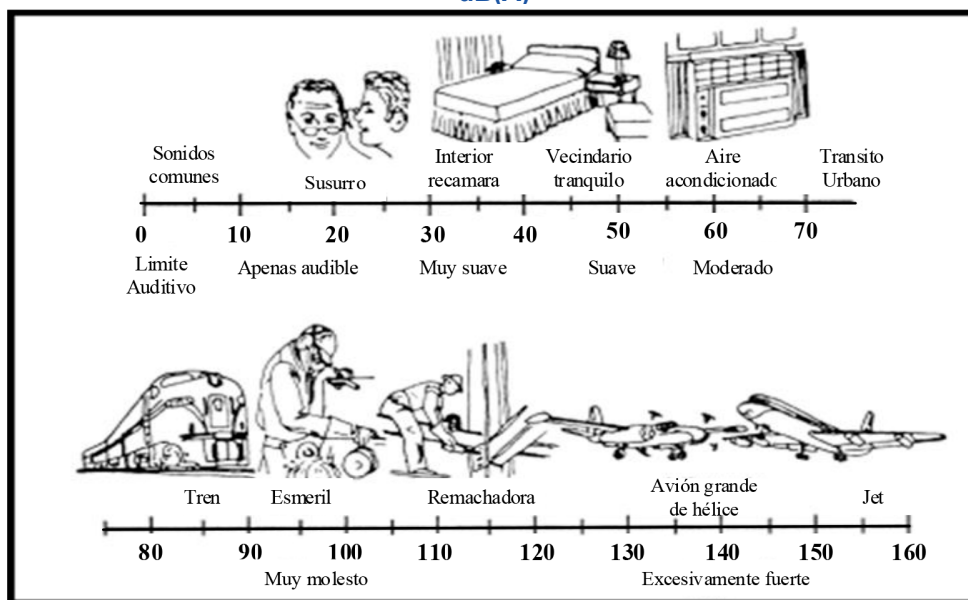
Velocidad del sonido: $c \approx 331.5 + 0.6 T_c$ (m/s), donde T_c es la temperatura en $^{\circ}\text{C}$,

depende primordialmente de la temperatura, la variación de la densidad en la altura modifica la absorción atmosférica, un factor crítico para la modelación de propagación en distancias largas. El Reglamento 152/2010 establece que los equipos deben contar con ajuste para la corrección por la presión atmosférica, garantizando la trazabilidad metrológica en condiciones de alta altitud.

Psicoacústica y respuesta fisiológica

El sistema nervioso del ser humano, produce sensaciones auditivas solo para frecuencias entre 20 Hz a 20000 Hz, fuera de este limite el sonido no es audible para las personas, cabe mencionar que este intervalo es diferente para otras especies animales.

Figura 2: Niveles de sensación auditiva – Sonidos comunes en decibelios dB(A)



Nota. (NIEBEL, 1970, p. 266)

Marco Normativo

La gestión del ruido en Bolivia se rige por la Ley N° 1333 de Medio Ambiente y su reglamentación derivada, complementada por la Ordenanza Municipal GMLP

N° 152/2010, que establece el Reglamento de Gestión Ambiental, en su título VI, Capítulo VIII, el reglamento clasifica las actividades por impacto sonoro, AAIS (actividades de alto impacto sonoro) y AISM (actividades de impacto sonoro moderado), define zonas de sensibilidad acústica:

- **A (zona de alta sensibilidad)**

Es el área que requiere la mayor protección contra el ruido debido a la vulnerabilidad de quienes la ocupan (hospitales, centros de salud, bibliotecas, asilos de ancianos y áreas de protección estricta de la biodiversidad).

- **B (zona de sensibilidad moderada)**

Áreas destinadas principalmente a la vida familiar y al descanso, donde el ruido no debe interferir con la comunicación normal o el sueño (residencial exclusivo, áreas verdes, parques recreativos y centros educativos).

- **C (zona de sensibilidad baja)**

Sectores donde se permite una mayor actividad económica y circulación vehicular, por lo tanto, el umbral de ruido permitido es más alto (áreas comerciales, zonas mixtas, áreas de servicios, locales de diversión).

- **D (zona de sensibilidad nula o muy baja)**

Zonas donde la actividad principal es industrial o de transporte masivo, donde el ruido es una característica propia del entorno (zonas industriales, terminales terrestres, aeropuertos y vías de alto tráfico interurbano).

Se fijan límites máximos de inmisión en ambientes exteriores e interiores, para la Zona C (actividades industriales, servicios públicos, locales de diversión), los límites permisibles son:

Tabla 1. Límites Máximos Permisibles para Zona C (Comercial/Industrial)

Receptor	Diurno (07:00 - 22:00)	Nocturno (22:00 - 07:00)
Exterior	60 dB(A)	55 dB(A)
Interior	41 dB(A)	40 dB(A)

Nota. Elaboración propia basada en la Ordenanza Municipal 152/2010

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales y Fuentes de Datos

Para el presente estudio, no se realizaron mediciones directas; en su lugar, se procedió a la captura y procesamiento de datos crudos y cartográficos provenientes de fuentes oficiales y estudios técnicos validados, los materiales utilizados incluyen:

- ***Inventario de datos acústicos***: Base de datos de niveles de presión sonora (NPS) del municipio de La Paz.
- ***Cartografía dinámica***: Mapa de Isófonas 2022-2025 Secretaría Municipal de Gestión Ambiental y Energías Renovables (SMGAER).
- ***Software de procesamiento***: Hojas de cálculo para el modelado de regresión logarítmica.

Puntos de análisis y fuentes de información

Para corroborar la validez del mapa de contaminación acústica, se seleccionaron puntos estratégicos que representan diferentes Zonas de Sensibilidad Acústica (ZSA) en la urbe paceña.

Tabla 2: Criterio de selección de nodos, eje metropolitano – Ciudad de La Paz

Punto de Análisis	Zona / Nodo Crítico	Clasificación Normativa	Criterio de Selección
P1	Nodo Pérez Velasco - San Francisco	ZSA C (Comercial)	Máximo flujo vehicular y comercial del casco central.
P2	Av. Arce y Plaza Isabel la Católica	ZSA B (Residencial/Mixta)	Nodo articulador de transición residencial-comercial.
P3	Complejo Hospitalario Miraflores	ZSA A (Alta Sensibilidad)	Receptor sensible (Salud), punto crítico de protección.
P4	Entorno UMSA (Plaza Bicentenario)	ZSA B (Educativa)	Entorno educativo de alta densidad peatonal.
P5	Zona Sur (Calle 21 de Calacoto)	ZSA C (Comercial)	Centro de actividad comercial y servicios (Zona Sur).

Nota. Elaboración propia

Evolución de los Modelos de Predicción Acústica

La modelación de ruido de tráfico ha evolucionado desde métodos puramente empíricos hasta algoritmos de simulación complejos, para el presente estudio, se

han analizado y adaptado dos de los referentes internacionales:

- **El Modelo Alemán RLS-90 (Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen)**

Publicado en 1990, el RLS-90 ha sido el estándar europeo, para el cálculo de la protección contra el ruido en carreteras, su enfoque se centra en la potencia sonora de la fuente basándose en el flujo vehicular Q y la composición del tráfico (porcentaje de vehículos pesados).

$$L_E = L_m^{(25)} + C_v + C_p \quad \dots \quad (9)$$

Donde: L_E , nivel medio de emisión, valor medido a 25 metros del eje de la vía, se calcula en función el flujo vehicular Q, C_v es la corrección por velocidad (generalmente 80 km/h para Europa), C_p es la corrección según el tipo de superficie (pavimento, adoquín, concreto, asfalto). La aplicación para la ciudad de La Paz, hay secciones de asfalto rugoso, adoquín que provoca un aumento en el nivel de ruido con la fricción neumático – pavimento.

- **El Modelo Japonés ASJ RTN – Model (Acoustical Society of Japan)**

Desarrollado hacia 1998 y actualizado en 2023, este modelo es célebre por su precisión en entornos urbanos densos, a diferencia de los modelos europeos, el ASJ presta especial atención a la propagación del sonido en intervalos discretos y el comportamiento de las ondas en calles estrechas (Okada et al., 2025).

$$L_W = a + b \cdot \log_{10} v + C \quad \dots \quad (10)$$

Donde: L_W , (Sound Power Level), es la cantidad total de energía acústica que emite el vehículo en todas las direcciones, v es la velocidad instantánea del vehículo en km/h, es la variable independiente principal, a y b son coeficientes de regresión, dependen del tipo de vehículo (liviano, mediano o pesado). a representa el ruido base del vehículo cuando está casi detenido, b determina cuánto aumenta el ruido a medida que aumenta la velocidad, C factor de corrección, para ajustar el modelo a condiciones especiales. En el modelo propuestos usaremos este factor C para insertar el ruido por aceleración y el esfuerzo del motor en las pendientes de La Paz.

5. FORMULACIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN ACÚSTICA EN LA METRÓPOLI DE LA PAZ

Dado que los modelos RLS-90 y ASJ fueron diseñados para ciudades situadas a nivel del mar y con topografías predominantemente llanas, su aplicación directa en La Paz generaría un sesgo técnico, por ello se formula un modelo que integra criterios de ambos sistemas bajo tres ejes de adaptación propios.

• Criterio de sobre esfuerzo del motor

El modelo RLS – 90 aplica una corrección leve por pendiente, en el caso particular de la Pérez Velasco de 12% de inclinación, el esfuerzo del motor en subida genera un ruido de combustión que predomina sobre el ruido de rodadura de los neumáticos, se propone un ajuste de incremento del factor C_g a una razón de 0.3 dB(A) por cada grado de inclinación, duplicando la sensibilidad del modelo original europeo.

• Criterio de corrección barométrica

A 3,600 *m.s.n.m.*, la densidad del aire es menor ($\approx 0.85 \text{ kg/m}^3$ frente a 1.22 kg/m^3 a nivel del mar), el modelo introduce una corrección por Impedancia Acústica (Z), se incorpora el ajuste ($C_{alt} = 10 \log_{10} (Z_{(La\ Paz)} / Z_{ISO})$), lo que ajusta la propagación de la onda en el medio gaseoso menos denso.

• Criterio de flujo discontinuo – adaptación de velocidad

En los nodos analizados, el tráfico es constante, se utilizará la lógica del modelo japonés para integrar la emisión de vehículos en fase de aceleración constante.

Modelo propuesto

$$L_{eq(La_Paz)} = \underbrace{10 \log_{10} \left[\sum Q_i \cdot 10^{0.1 L_{Ei}} \right]}_{\text{emisión RLS-90}} + \underbrace{C_g}_{\text{pendiente}} + \underbrace{C_{alt}}_{\text{altitud}} - \underbrace{10 \log_{10}(r)}_{\text{divergencia ASJ}} \dots \quad (11)$$

Donde: $L_{(eq(La_Paz))}$ es el nivel sonoro equivalente en La Paz, C_g la corrección leve por pendiente, C_{alt} ajuste por altitud, $10 \log_{10}(r)$ corrección por velocidad vehicular.

Para normalizar la escala logarítmica de emisión por hora a nivel de presión sonora continuo, se aplica la constante de normalización temporal estándar 15.5 dB para pasar de potencia a nivel de presión:

Tabla 3: Análisis del Punto 1 (Nodo Pérez Velasco – San Francisco)

Variables de Entrada	Valores	Cálculo
Flujo (Q)	2500 vehículos/hora	$10 \log_{10}(2500 \cdot 10^{0.1 \cdot 68})$ $= 101.98 \text{ dB(A)}$
Emisión base unitaria (L_{Ei})	68 dB(A)	
Pendiente (g)	12 %	$C_g = 0.3 \cdot 12 = 3.6 \text{ dB(A)}$
Altitud (alt)	3600 m.s.n.m	$C_{alt} = 10 \log_{10}\left(\frac{360}{415}\right) = -0.62 \text{ dB(A)}$ $\approx -0.5 \text{ dB(A)}$
Divergencia (r)	5 metros (distancia de la vía – acera)	$10 \log_{10}(5) = 6.99 \text{ dB(A)}$

Nota. Elaboración propia

$$L_{eq}(La_{Paz}) = (101.98 - 15) + 3.6 - 0.5 - 6.99 = 82.6 \text{ dB(A)}$$

Resultados

En base a los datos, se efectúan los demás cálculos para los demás puntos (nodos), se presentan en la siguiente tabla:

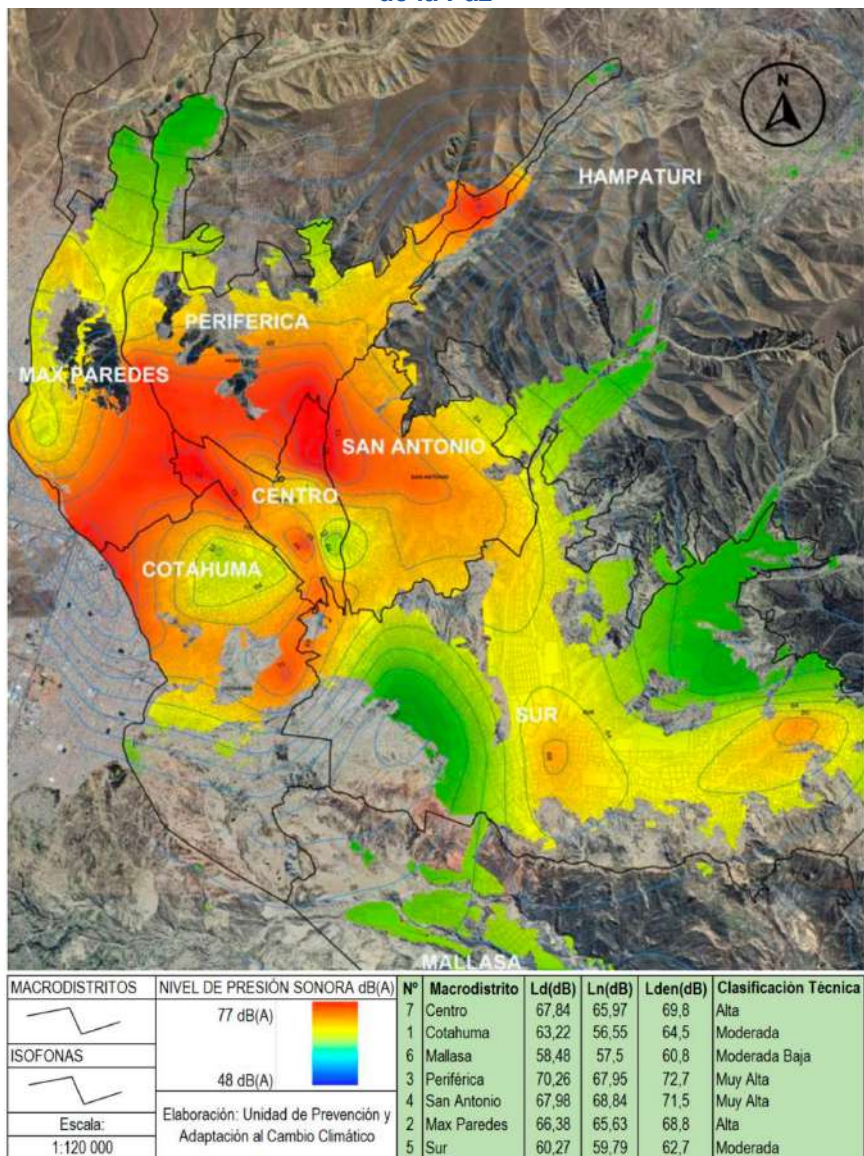
Tabla 4: Matriz de Parámetros y Resultados del Modelo por Nodo

ID	Nodo de Análisis	Flujo (Q) [veh/h]	Emisión (L_{Ei}) dB(A)	Pendiente (g) [%]	Corrección C_g dB(A)	Altitud C_{alt} dB(A)	Distancia (r) [m]	Leq Calcula dB(A)
P1	Pérez Velasco	2500	68.0	12%	+3.6	-0.5	5	82.6
P2	Plaza Isabel la católica	1800	68.0	2%	+0.6	-0.5	10	74.6
P3	Hospital Miraflores	600	68.0	0%	0.0	-0.5	15	64.2
P4	Plaza Bicentenario	1200	68.0	5%	+1.5	-0.5	8	73.2
P5	Calle 21 Calacoto	1500	68.0	1%	+0.3	-0.5	6	76.5

Nota. Elaboración propia

Es importante la comparación con los valores permitidos por la norma, los mismos se presentan en la tabla 5.

Figura 4: Mapa de contaminación acústica de fuentes móviles de la Ciudad de la Paz



Nota. Autoridad Ambiental Municipal SMGAER – GAMLP

Tabla 5: Análisis comparativo y estado de cumplimiento normativo

Nodo	Ubicación	Límite Normativo (ZSA)	Valor Reportado (Leg)	Excedencia dB(A)	Estado de Cumplimiento
P1	Pérez Velasco	68 dB(A) (ZSA C)	82.6 dB(A)	+14.6	Saturación Crítica
P2	Plaza Isabel la Católica	65 dB(A) (ZSA B)	74.6 dB(A)	+9.6	Fuera de Norma
P3	Hospital Miraflores	50 dB(A) (ZSA A)	64.2 dB(A)	+14.2	Riesgo Sanitario
P4	Plaza Bicentenario	65 dB(A) (ZSA B)	73.2 dB(A)	+8.2	No Cumple
P5	Calle 21 de Calacoto	68 dB(A) (ZSA C)	76.5 dB(A)	+8.5	Fuera de Norma

Nota. Elaboración propia

6. DISCUSIÓN

El análisis comparativo entre los modelos matemáticos teóricos y la cartografía municipal permite afirmar el modelo matemático propuesto se aproxima al mapa de ruido, a continuación, se discuten los hallazgos más relevantes.

Al contrastar el Nodo P1 (Pérez Velasco), la cartografía institucional lo sitúa en el rango superior de 80 dB (isófono color rojo oscuro), la aplicación del modelo que integra el factor de gradiente y la corrección por altitud, arroja un valor de 82.6 dB(A), esta diferencia, representa un margen de error inferior al 1%, que indica que la adaptación del modelo al tomar en cuenta la altitud, la pendiente y la impedancia acústica fue acertada.

En el Nodo P3 (Complejo Hospitalario), los resultados del modelo matemático revelan una situación crítica, el cálculo energético demuestra que el ruido base está potenciado posiblemente por la configuración de cañón urbano, que eleva L_{eq} a 64.2 dB(A), este valor representa una excedencia alarmante de 14.2 dB(A) respecto al límite máximo permitido por la ordenanza municipal 152/2010 para zonas de recuperación médica, este hallazgo sugiere que la infraestructura hospitalaria de la zona se encuentra bajo un estrés acústico constante que compromete los procesos de rehabilitación biológica de los pacientes.

La coherencia observada en los nodos P2, P4 y P5 confirma que el excedente sonoro en el eje metropolitano no es circunstancial, sino estructural, la topografía de cuenca

de la ciudad de La Paz no solo impone retos a la movilidad, sino que actúa como un amplificador físico, el esfuerzo mecánico de los motores de combustión para vencer pendientes pronunciadas genera una firma acústica cuya energía, al no encontrar superficies de absorción en fachadas continuas, hace que los límites normativos resulten técnicamente inalcanzables bajo el actual esquema de transporte.

La convergencia entre los valores hallados y la cartografía oficial demuestra que el problema del ruido en La Paz ha superado la capacidad de las medidas de control tradicionales, los resultados obtenidos mediante el modelo matemático sientan las bases para una transición hacia el monitoreo digital y la gestión de flujos vehiculares inteligentes. La mitigación efectiva del ruido urbano deberá considerar, obligatoriamente, la reingeniería de las rutas de transporte público y el fomento de tecnologías de tracción de baja emisión sonora para reducir la carga energética en los nodos críticos identificados.

7. CONCLUSIONES

A partir de la integración del modelo matemático propuesto, en contraste con la ordenanza municipal 152/2010 y con la cartografía acústica de La Paz, se establecen las siguientes conclusiones:

El modelo adaptado ha corroborado que la adaptación de los modelos RLS-90 (alemán) y ASJ RTN (japonés) a las condiciones de montaña del eje troncal paceño, describe su realidad acústica con una interesante precisión, el cálculo en el Nodo P1 (Pérez Velasco) arrojó un valor de 82.6 dB(A), con un error residual de apenas 0.29 dB(A) respecto al Mapa de Isófonas 2022-2025, validando la eficacia de incluir la pendiente y la altitud como variables activas.

El análisis de los cinco puntos estratégicos revela una transgresión crítica de los límites máximos permisibles, la excedencia promedio de +10.2 dB(A) en nodos comerciales y de +14.2 dB(A) en el complejo hospitalario evidencia un entorno de riesgo sanitario, dado que un incremento de 10 dB(A) representa una percepción de duplicación del volumen sonoro, la población está expuesta a niveles de energía acústica que vulneran los preceptos de la Ley 1333 de Medio Ambiente.

La investigación muestra que el ruido en La Paz es un problema de Ingeniería, también de gestión y de comportamiento ciudadano, la convergencia masiva de transporte público en puntos como la Pérez Velasco – Plaza San Francisco crea una

saturación energética que no puede ser mitigada mediante sanciones individuales, sino a través de una reingeniería de flujos y la digitalización del monitoreo ambiental bajo el paradigma de la Industria 4.0.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, M., & Finn, E. J. (1970). Física. Vol. II: Campos y Ondas. Ciudad de México, México: Fondo Educativo Interamericano.
- Bolivia. (1992). Ley N° 1333 del Medio Ambiente. La Paz, Bolivia: Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.
- García, A., & Faus, L. (2020). La contaminación acústica en las ciudades: Un problema de salud pública. Gaceta Sanitaria.
- Gobierno Autónomo Municipal de La Paz. (2010). Reglamento de Gestión Ambiental del Municipio de La Paz (Ordenanza Municipal N° 152/2010). La Paz, Bolivia: GAMLP.
- Gobierno Autónomo Municipal de La Paz. (2022). Informe técnico de actualización del Mapa de Ruido de la Ciudad de La Paz (2022-2025). La Paz, Bolivia: Secretaría Municipal de Gestión Ambiental y Energías Renovables (SMGAER).
- González-Lozano, R., & Rodríguez Hernández, S. V. (2022). Revisión al estado del arte de la modelación geoespacial del ruido por tráfico de carreteras. Revista Cubana de Transformación Digital
- Harris, C. M. (1995). Manual de medidas acústicas y control del ruido. Madrid, España: McGraw-Hill.
- IBNORCA. (1995). Calidad del aire - Emisiones de ruido - Niveles máximos permisibles (NB 62002). La Paz, Bolivia: Instituto Boliviano de Normalización y Calidad.
- ISO. (2016). Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 1: Basic quantities and assessment procedures (ISO 1996-1:2016). Ginebra, Suiza: International Organization for Standardization.
- Okada, Y., Anai, K., Itiki, T., Yamauchi, K., Yasuda, Y., & Yokota, T. (2025). Road traffic noise prediction model “ASJ RTN-Model 2023”: Report of the Research

Committee on Road Traffic Noise. *Acoustical Science and Technology*, 46(3).
Publicación anticipada en línea.

Niebel, B. W. (1999). *Ingeniería industrial: Métodos, estándares y diseño del trabajo* (10.^a ed.). Ciudad de México, México: Alfaomega.

Vásquez, J., & Betancur, J. (2021). Metodología para la elaboración de mapas de ruido ambiental en centros urbanos: Una revisión sistemática. *Revista de Salud Pública*.



Estado Plurinacional de Bolivia
Ministerio de Educación
Yaticha Kamani
Yachay Kanachiq
Moromboerendatueiro Arakuarupi

N° 000011

**COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS - CNACU**

En sujeción y al amparo de la Ley de Educación N° 070
"Avelino Siñani - Elizardo Pérez" del 20 de diciembre de 2010



CERTIFICA

Que la carrera de

INGENIERÍA INDUSTRIAL

de la

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

con sede académica en la ciudad de La Paz, cumple con los criterios definidos para la

ACREDITACIÓN

del Sistema ARCU-SUR
del SECTOR EDUCATIVO DEL MERCOSUR

La Comisión Nacional de Acreditación de la Carreras Universitarias (CNACU), en uso de sus atribuciones conferidas por la Ley de la Educación N° 070 "Avelino Siñani - Elizardo Pérez", reconoce la calidad académica universitaria con alcance regional en el MERCOSUR por un periodo de (6) seis años, a partir de la fecha de su emisión.

La Paz, marzo de 2026.


MARÍA YVONNE PACHECO ANGULO
PRESIDENTA
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


DIEGO CAMACHO VELAZCO
VICEPRESIDENTE
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


FREDDY MENDOZA ESPINOZA
VOCALES CELB
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


JUAN MARCELO SANZURI LIMA
SECRETARIO GENERAL
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


GUSTAVO SACRO ORTEGA ZELADA
VOCALES ANEP
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
NUEVAMENTE ACREDITADA AL SISTEMA ARCU - SUR
DEL SECTOR EDUCATIVO DEL MERCOSUR**



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

© TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS
LA PAZ - BOLIVIA
JUNIO / 2026