

Artículo original

Modelización matemática para la predicción y disminución del ruido vehicular en entornos urbanos

Mathematical modeling for the prediction and mitigation of vehicular noise in urban environments

 Javier Alcázar*,  Sandra Campuzano

Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias e Ingeniería FACI, Universidad Estatal de Milagro (UNEMI), Milagro, Ecuador

Resumen

El ruido vehicular representa una fuente significativa de contaminación acústica en entornos urbanos que afecta la salud y el bienestar de los habitantes. Este estudio propone un modelo matemático para predecir y mitigar los niveles de ruido vehicular, integrando variables claves como el volumen, la velocidad y la composición del tráfico. La metodología incluyó la recolección de datos en cuatro puntos de la ciudad de Milagro, Ecuador, y el análisis mediante las herramientas QGIS y MATLAB, bajo el estándar RLS 90/DIN con ecuaciones de regresión lineal. Se estimó una reducción del 15 % del ruido con la implementación de barreras acústicas. El modelo demostró una mayor precisión y replicabilidad comparado con estudios previos. En cuanto a limitaciones del estudio, se reconoce la omisión de factores como la vegetación y las condiciones meteorológicas. El modelo puede contribuir a diseñar políticas públicas de planificación urbana y control de la contaminación acústica.

Palabras clave: Contaminación acústica; Ruido ambiental; Modelización matemática; Tráfico urbano; Medición del ruido.

Abstract

Vehicular noise is a significant source of noise pollution in urban environments, affecting the health and well-being of the inhabitants. Here, we propose a mathematical model to predict and mitigate vehicular noise levels, integrating key variables such as traffic volume, speed, and composition. The methodology included data collection at four points in the city of Milagro, Ecuador, and analysis using QGIS and MATLAB tools under the RLS 90/DIN standard with linear regression equations. We estimated a 15% noise reduction with the implementation of noise barriers. The model showed greater accuracy and replicability compared to previous studies. We acknowledge the omission of factors such as vegetation and meteorological conditions as limitations of the study. The model can contribute to the design of public policies on urban planning and noise pollution control.

Keywords: Acoustic pollution; Environmental noise; Mathematical modeling; Urban traffic; Noise measurement.

Citación: Alcázar J & Campuzano S. Modelización matemática para la predicción y disminución del ruido vehicular en entornos urbanos. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2025 Ago 19. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.3175>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Javier Alcázar; jalcazare@unemi.edu.ec

Recibido: 11 de marzo de 2025

Aceptado: 7 de julio de 2025

Publicado en línea: 19 de agosto de 2025



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

El ruido, un fenómeno omnipresente en la vida moderna, se define como cualquier sonido no deseado que genere perturbación o afecte negativamente a los seres humanos, los animales y los dispositivos tecnológicos (Epstein, 2020). En los entornos urbanos, el tráfico vehicular, las construcciones y las actividades industriales representan las principales fuentes de contaminación acústica (Masum *et al.*, 2021; in general, city dwellers experienced moderately high noise with an average noise level of 75 dBA exceeding the limit values set by the Department of Environment (DoE Montes *et al.*, 2023), en tanto que en zonas rurales este problema puede estar asociado al uso de maquinarias agrícolas o eventos naturales (Olczak *et al.*, 2023). En el interior de las edificaciones

los electrodomésticos, los sistemas de climatización y los equipos electrónicos también contribuyen a un ambiente sonoro que, en muchos casos, puede ser perturbador (Farooqi *et al.*, 2022).

El ruido se mide en decibeles (dB), una unidad logarítmica que expresa el nivel de presión sonora (Casali, 2021). Dependiendo de sus características, el ruido puede ser continuo, intermitente o impulsivo, lo que determina su impacto sobre la salud y el bienestar de las personas (Yadav *et al.*, 2025). Diversos estudios han demostrado que la exposición prolongada a altos niveles de ruido puede generar efectos adversos como estrés, trastornos del sueño, problemas de concentración y enfermedades cardiovasculares (Zaman *et al.*, 2022; Krittanawong *et al.*, 2023; Sivakumaran *et al.*, 2022).

Para abordar esta problemática es fundamental desarrollar modelos matemáticos que permitan comprender, predecir y mitigar la contaminación acústica. Existen diversos enfoques para la modelación del ruido vehicular, entre ellos los modelos empíricos, basados en datos observacionales (Nourani *et al.*, 2020; Bramich *et al.*, 2022; Alam *et al.*, 2020), los modelos físicos, que consideran principios fundamentales de propagación del sonido (Saakian, 2020), y los modelos estadísticos, que emplean técnicas de aprendizaje automático para detectar patrones en los datos (Lakshmanan *et al.*, 2020). Cada uno de estos enfoques tiene ventajas y limitaciones, pero su integración puede proporcionar predicciones más consistentes y adaptables a diferentes contextos urbanos.

En este estudio nos propusimos desarrollar un modelo matemático para predecir y gestionar los niveles de ruido vehicular en entornos urbanos, tomando en cuenta variables como el volumen de tráfico, la velocidad de los vehículos y la composición del flujo vehicular. Este modelo permite evaluar estrategias de mitigación, como la instalación de barreras acústicas, y contribuye al diseño de políticas públicas enfocadas en la reducción de la contaminación acústica.

La importancia del estudio radica en la necesidad de generar herramientas eficaces para abordar el problema del ruido en ciudades en constante crecimiento. A través de una metodología integral que combina modelos matemáticos y análisis de datos utilizando *software* especializado, se busca proporcionar una solución que no solo sea precisa y adaptable, sino que tenga un impacto positivo en la calidad de vida de los habitantes y en el desarrollo sostenible de las ciudades.

Metodología

Estructura del diseño experimental

El diseño experimental se estructuró en dos fases principales. En la primera se estudió la zona de medición, analizando el comportamiento del tráfico en los cuatro puntos seleccionados. En la segunda fase, los datos se procesaron con el programa MATLAB, analizando las variables relevantes e implementando un modelo matemático basado en el RLS 90/DIN.

El modelo desarrollado permitió determinar si los niveles de ruido en cada punto de medición se encontraban dentro del límite permisible establecido en la normativa vigente. En caso de que los niveles superaran el umbral de 55 dB(A) en zonas residenciales, el modelo propuso la implementación de barreras acústicas, con una reducción estimada del 15 % en los niveles de ruido.

Materiales

Se utilizó un sonómetro SC310 para registrar los niveles de ruido y un contador de vehículos para determinar la cantidad y el tipo de tráfico en la zona. Se trabajó con datos previamente recolectados que incluían variables de ruido y tráfico. Por último, se empleó el *software* MATLAB para el desarrollo del modelo matemático y el análisis de datos, en tanto que QGIS se utilizó para georreferenciar la zona de estudio.

El sonómetro SC310 se calibró antes de cada jornada de medición conforme al protocolo del fabricante, utilizando el calibrador acústico de referencia. El modelo se validó mediante comparación cruzada entre las predicciones y los valores independientes observados que no se utilizaron en el entrenamiento.

Ubicación geográfica

Las mediciones se tomaron en la Avenida 17 de Septiembre del Cantón Milagro, Ecuador, en cuatro puntos estratégicos (**Figura 1**). El punto 1 se ubicó junto al Supermercado Mayorista “Devies”, en una zona comercial con alto flujo vehicular. El punto 2 se localizó en la intersección Luz de América, cerca de la empresa CNEL. El punto 3 se situó a 50 metros de la primera entrada del estacionamiento de la UNEMI, capturando así el tráfico universitario. El punto 4 se estableció frente a la Asociación de Voluntariado AVINFA, una zona con tránsito constante. Las mediciones se realizaron durante 10 días, del 25 de noviembre al 4 de diciembre de 2015, en distintos momentos del día (mañana, mediodía y tarde).

Base de datos

Se recolectaron 109 registros distribuidos entre los cuatro puntos de medición. Estos datos incluyeron información sobre el tráfico vehicular, la superficie de la calzada (asfalto) y las características del flujo vehicular (transporte público, carros grandes, carros livianos y motocicletas). La recolección de datos se hizo con un sonómetro y un sistema de conteo de vehículos, registrando el número de vehículos por hora y su composición, lo que permitió detectar los patrones de tráfico y su impacto en los niveles de ruido.

Análisis de datos

El análisis de datos se centró en el establecimiento del número de vehículos por punto de medición y la relación entre la composición del tráfico y los niveles de ruido. Se adoptó una metodología de observación en la que cada punto era evaluado por más de una hora garantizando la precisión en la recolección de los datos. Se hicieron cálculos específicos para estimar el impacto del tráfico en el nivel de ruido considerando tres periodos horarios (mañana, mediodía y tarde).

Modelo matemático

Este se desarrolló utilizando MATLAB y se basó en la predicción del nivel de ruido vehicular en función de la composición y el volumen del tráfico, utilizando la ecuación 1.

$$LMELD = L_0 + \alpha * F_v + \beta * F_c - (Barrera * 15),$$

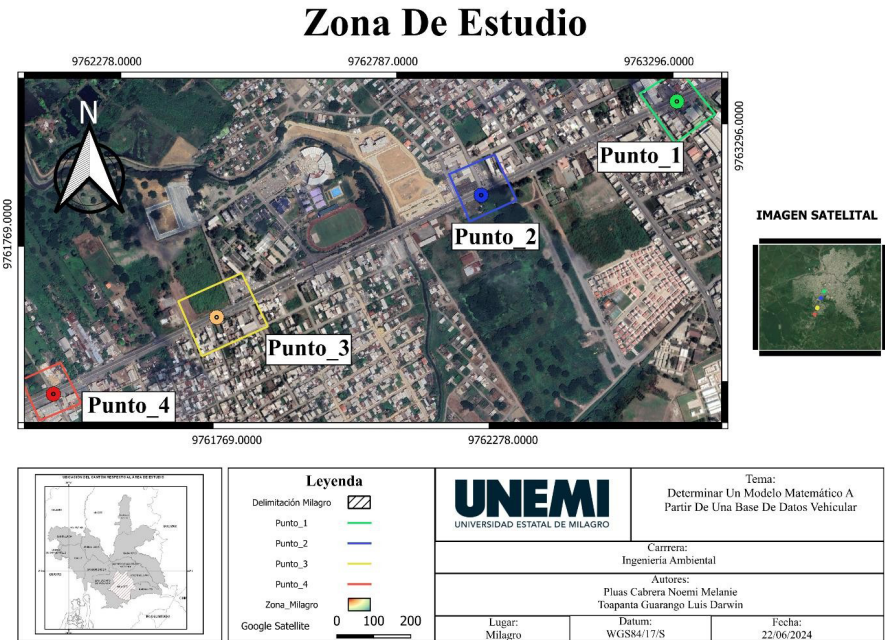


Figura 1. Zona de estudio

donde L_{MELD} es el nivel de ruido estimado en dB(A), L_0 es el nivel de ruido de base, α es el coeficiente de influencia del volumen de tráfico, β es el coeficiente de influencia de la composición del tráfico, F_v es el factor de volumen de tráfico, F_c es el factor de composición del tráfico y $(B_{arreira} \cdot 15)$ representa la reducción del 15 % en caso de existir barreras acústicas.

La ecuación completa utilizada en el modelo fue la siguiente:

$$L_{MELD} = L_0 + \alpha * [10 * \log_{10} N_{total}] + \beta * [3N_{tp} + 2N_{cg} + N_{cl} + 1,5N_m] / N_{total} - (B_{arreira} * 15),$$

donde N_{total} es la suma de todos los vehículos, N_{tp} es el número de vehículos de transporte público, N_{cg} es el número de carros grandes, N_{cl} es el número de carros livianos y N_m es el número de motocicletas.

Los coeficientes 3, 2, 1 y 1,5 ponderan la contribución de cada tipo de vehículo al ruido.

Cálculo del factor de volumen de tráfico

El factor de volumen de tráfico F_v se calculó con la ecuación 3:

$$F_v = 10 \cdot \log_{10} (\max(n_{total})),$$

lo que evita errores en el cálculo cuando el número total de vehículos es cero.

Cálculo del factor de composición de tráfico

Para conocer el impacto relativo de los diferentes tipos de vehículos en el nivel de ruido, se utilizó la ecuación 4:

$$F_c = 3 * n_{tp} + 2 * n_{cg} + 1 * n_{cl} + 1,5 * n_m$$

Regresión lineal para la predicción de los niveles de ruido

Se implementó un modelo de regresión lineal para predecir los niveles futuros de ruido utilizando la ecuación 5:

$$y = m \times x + b,$$

donde y es el nivel de ruido estimado, x es el índice de la medición, m es la pendiente de la regresión y b es la intersección con el eje y .

Para un mejor ajuste, se aplicó la regresión ajustada $y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i$, donde β_0 es la intersección de la línea de regresión, β_1 es la pendiente ajustada y e es el término de error.

Resultados

Nivel de ruido vehicular

Los resultados obtenidos del modelo de predicción del nivel de ruido vehicular en MATLAB permitieron el análisis del impacto del tráfico en los distintos puntos de medición. El modelo tuvo como principal objetivo calcular el nivel de ruido considerando el volumen y la composición del tráfico y utilizando coeficientes calibrados entregados previamente.

En el modelo de MELD se obtuvieron dos tipos de resultados: por un lado, el estudio sin barrera (**Figura 2a**), y por el otro, un estudio con barrera (**Figura 2b**) en el cual se puede visualizar la cantidad de datos que cumplían o no con el máximo límite permisible de ruido.

En el análisis sin barrera, al procesar la base de datos en MATLAB mediante el modelo matemático, se identificaron 109 registros correspondientes a los cuatro puntos de estudio. Los resultados mostraron los niveles de dB presentes y permitieron evidenciar que la mayoría de los valores se clasifican como “No permisibles” en comparación con los catalogados como “Permisibles”. El nivel de ruido en la zona de estudio, determinado a partir del flujo de vehículos, fue de 62,55 dBA, lo que excedía el límite establecido. Además, la línea de predicción para futuros años se mantenía en ese límite, a menos que se adoptara un plan para la reducción de ruido en la zona.

En el estudio con barrera se pudo observar que los límites no permisibles, visibles en color rojo, correspondían a 16 datos superiores a 55dB; otros 93 datos fueron inferiores o iguales a 55dB y aparecen en color verde, es decir, correspondieron al límite permisible.

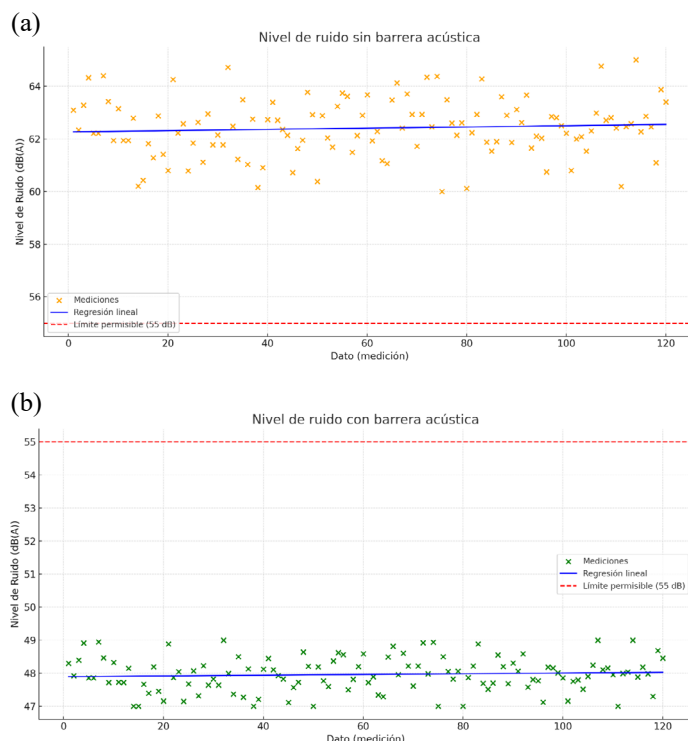


Figura 2. a) Nivel de ruido vehicular sin barrera, b) Nivel de ruido vehicular con barrera

Además, se visualiza una línea de regresión y una de predicción, la cual es muy diferente a la de la **Figura 2a**, lo que indica que los límites se mantuvieron en el rango permisible a la largo de esta prolongación, pues la línea se mantuvo dentro de los 48 dB debido a que se implementó la barrera del 15 %. Se debe tener en cuenta que el porcentaje de la barrera redujo el ruido vehicular, lo que arrojó un total de 86,24 % de permisibilidad en la zona de estudio.

Niveles de dBa en cada punto de interés

En el punto 1 (**Figura 3a**) se registraron 28 datos, 25 de los cuales estaban dentro del rango del límite permisible. Esta reducción se debió a la implementación de las barreras acústicas, lo que resultó en un porcentaje de permisibilidad de 85,71 % y una predicción estimada de 10 años con 62,16 dB(A) debido a la larga duración del periodo asignado. En el punto 2 se recolectaron 26 datos, 22 de ellos dentro del rango del límite permisible. Esta reducción se debió a la implementación de las barreras acústicas, lo que dio un porcentaje de permisibilidad de 85,19 % y una predicción estimada de 10 años con 47,72 dB(A) debido a la larga duración del periodo asignado (**Figura 3b**).

En el punto 3 (**Figura 3c**) se registraron 27 datos, 24 de ellos dentro del rango del límite permisible, reducción que se debió a la implementación de las barreras acústicas, lo que resultó en un porcentaje de permisibilidad de 85,19 % y una predicción estimada de 10 años con 39,40 dB(A) debido a la duración del periodo asignado. Por último, en el punto 4 se obtuvieron 28 datos, 25 de ellos dentro del rango del límite permisible. Aquí también la reducción se debió a la implementación de las barreras acústicas que permitieron un porcentaje de permisibilidad de 89,29 % y una predicción estimada de 10 años con 47,96 dB(A) debido a la duración del periodo asignado (**Figura 3d**).

En la **Tabla 1** se muestran los resultados estadísticos para cada punto de interés. Los datos indican una tendencia estable en los niveles de ruido en los distintos puntos evaluados, con diferencias mínimas en las medidas centrales y de dispersión. Sin embargo,

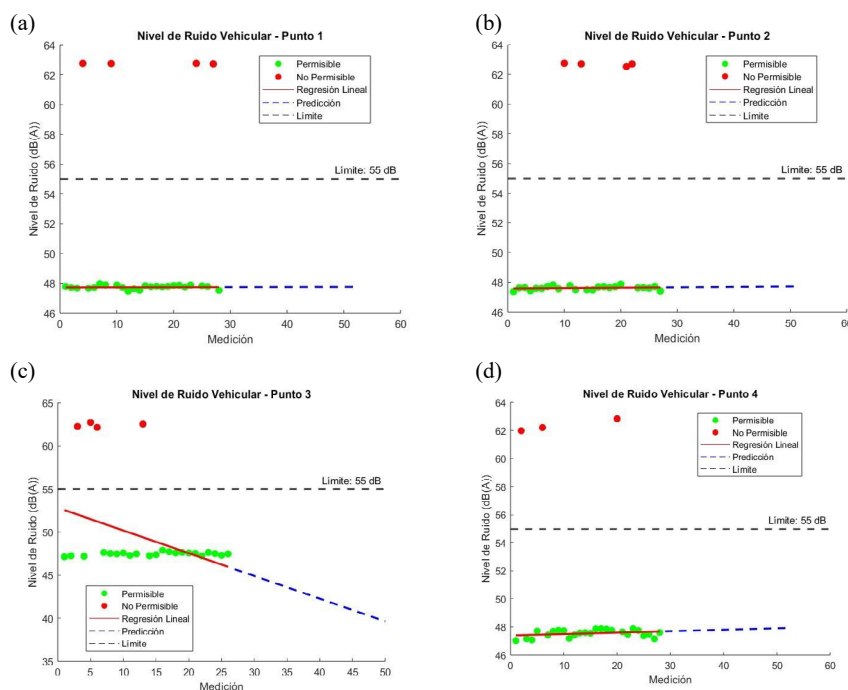


Figura 3. a) Nivel de ruido vehicular del punto 1, b) Nivel de ruido vehicular del punto 2, c) Nivel de ruido vehicular del punto 3, d) Nivel de ruido vehicular del punto 4

Tabla 1. Estadísticas de medición de ruido para cada punto

Punto de medición	Media (dB(A))	Desviación estándar (dB(A))	Máximo (dB(A))	Mínimo (dB(A))	Porcentaje de mediciones permisibles (%)
Punto 1	62,88	5,34	64,89	62,46	85,71
Punto 2	62,86	5,45	64,76	62,39	85,19
Punto 3	62,76	5,51	64,72	62,13	84,62
Punto 4	62,13	4,67	64,83	62,03	89,29

el punto 4 destaca por tener la menor media, la menor variabilidad y el mayor porcentaje de mediciones dentro de los límites permisibles, lo que sugiere un entorno acústico relativamente más favorable en comparación con los otros puntos.

En la **Tabla 2** se presentan el error cuadrático medio (MSE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) obtenidos en el modelo de regresión lineal, con valores que oscilaron entre 1,03 y 1,33 para el MSE, y entre 1,01 y 1,44 para el RMSE. Estos resultados indican que el modelo predijo los niveles de ruido con una desviación relativamente baja. Cabe destacar que el desempeño del modelo propuesto fue superior al reportado por **Yu et al.** (2024), cuyo modelo alcanzó un MSE de 1,54 y un RMSE de 2,50, y al de **Bravo-Moncayo et al.** (2023), que obtuvo un MSE de 1,65 y un RMSE de 2,74.

En la **Figura 4** se demuestra que la implementación del modelo matemático fue efectiva, ya que se logró representar los niveles de ruido de los 109 datos correspondientes a los cuatro puntos de interés. Se encontró que los vehículos de mayor tamaño en esta zona son los carros livianos, seguidos de las motos, las cuales generan la mayor parte del ruido vehicular. La barrera acústica fue eficaz como lo demostró el estudio con barrera, con un resultado de 47,60 dBa en la zona, en tanto que en el estudio sin barrera fue de 62,55 dBa, lo que conllevó una reducción media de 14,96 dBa.

Tabla 2. Tabla de errores estadísticos

Punto	MSE	RMSE
Punto 1	1,17	1,08
Punto 2	1,03	1,15
Punto 3	1,46	1,01
Punto 4	1,33	1,44

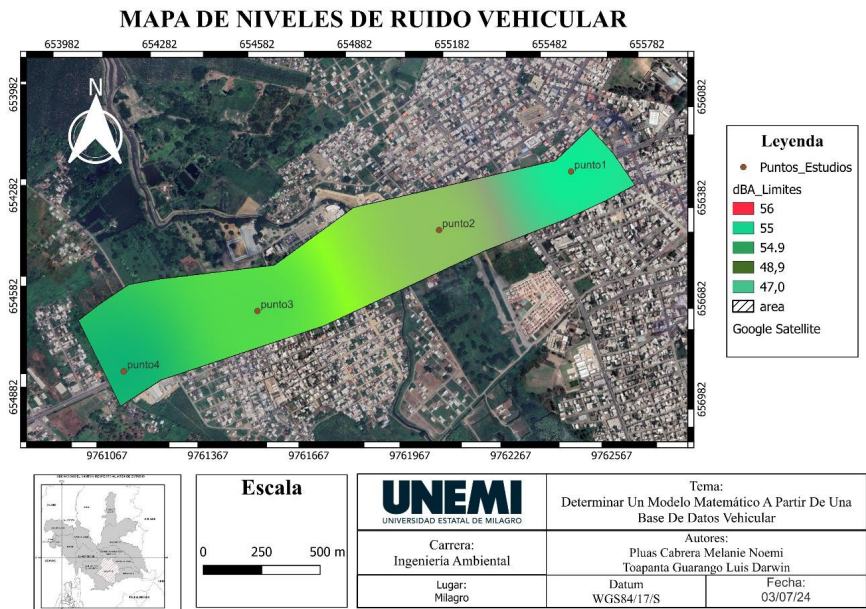


Figura 4. Mapa de niveles de ruido vehicular

Discusión

El modelo matemático desarrollado para el análisis del ruido vehicular ha demostrado ser una herramienta efectiva para la evaluación del impacto acústico en zonas urbanas. A través del análisis de los datos de tráfico, se pudo establecer que los niveles de ruido en el área de estudio superaban los límites máximos permisibles establecidos en las normativas ambientales. Para abordar esta problemática, se implementó en el modelo el uso de barreras acústicas, lo que permitió una reducción significativa del ruido estimado.

Estos hallazgos son relevantes, ya que evidencian la eficacia de las barreras acústicas como una medida de mitigación viable. En términos de implicaciones prácticas, la reducción del ruido no solo contribuye al cumplimiento de las regulaciones ambientales, sino que también mejora la calidad de vida de los residentes al disminuir la exposición a niveles de ruido perjudiciales. Esto es crucial en contextos urbanos donde el tráfico vehicular es una fuente constante de contaminación acústica que afecta la salud pública al incrementar el estrés y otros problemas asociados con la exposición prolongada al ruido.

La comparación de estos resultados con los de otros estudios similares revela que el tráfico vehicular es una de las principales fuentes de contaminación acústica en áreas urbanas densamente pobladas (Yang *et al.*, 2020; Amoatey *et al.*, 2020; Partheeban *et al.*, 2021; Reche *et al.*, 2022; Montes *et al.*, 2023; Rey *et al.*, 2020; Ibili *et al.*, 2022; Munir *et al.*, 2021; Gilani & Mir, 2021). Los estudios en diferentes ciudades han demostrado que la instalación de barreras acústicas puede reducir significativamente los niveles de ruido (He *et al.*, 2021; Fediuk *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2023), aunque

la magnitud de la reducción varía dependiendo del material, la altura y la ubicación de las barreras (Laxmi *et al.*, 2022; Hansen & Hansen, 2021; Lázaro *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2021; Owolabi *et al.*, 2024). En este sentido, los resultados obtenidos en el presente estudio son consistentes con la literatura existente y confirman la efectividad de estas estrategias de mitigación.

En estudios previos se ha demostrado que la efectividad de las barreras acústicas puede optimizarse mediante el uso de materiales innovadores y técnicas de diseño avanzadas (Gao *et al.*, 2022; Liao *et al.*, 2021; Fediuk *et al.*, 2021). Asimismo, investigaciones recientes han explorado el uso de materiales porosos, paneles vegetales y diseños curvos o estratificados que pueden mejorar la absorción y dispersión del sonido, logrando una reducción aún mayor del ruido ambiental (Amran *et al.*, 2021; Sharma *et al.*, 2023; Bakker *et al.*, 2023; Yan *et al.*, 2023; Feng & Liu, 2025). También se ha documentado que la combinación de barreras acústicas con otras estrategias, como pavimentos fonoabsorbentes y regulaciones de velocidad vehicular, puede potenciar los efectos positivos en la disminución del ruido en entornos urbanos (Garg, 2022; Mikhailenko *et al.*, 2022; Ahac *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2023; Kumar & Chowdary, 2024; Oquendo-Di Cosola *et al.*, 2022). En este sentido, el presente estudio refuerza la evidencia científica sobre la importancia de las barreras acústicas como herramienta eficaz de mitigación y sugiere que futuras investigaciones podrían enfocarse en la integración de múltiples enfoques para maximizar la reducción del ruido vehicular en distintas condiciones urbanas.

Sin embargo, es importante reconocer algunas limitaciones del estudio. En primer lugar, el modelo utilizado se basa en estimaciones matemáticas y datos recolectados en condiciones específicas, por lo que su aplicabilidad podría variar en otros entornos urbanos con diferentes características de tráfico y disposición geográfica. Además, el estudio no consideró otros factores que podrían influir en los niveles de ruido, como la absorción acústica de los edificios o la vegetación circundante, lo que podría mejorar la precisión del modelo en futuras investigaciones.

A pesar de dichas limitaciones, nuestro estudio contribuye al análisis del ruido vehicular y su gestión mediante modelos matemáticos, proporcionando una base para la implementación de estrategias de control acústico en entornos urbanos. Los resultados obtenidos pueden servir como referencia para el diseño de políticas públicas orientadas a reducir la contaminación acústica y mejorar la calidad de vida en comunidades afectadas por altos niveles de ruido vehicular. Además, abre la posibilidad de futuras investigaciones que integren nuevas tecnologías y enfoques en la mitigación del impacto acústico en zonas urbanas.

A diferencia de los enfoques tradicionales, nuestro modelo combina QGIS para la georreferenciación espacial y MATLAB para el análisis matemático, lo que mejora la capacidad predictiva frente a metodologías que no integran componentes espaciales. Comparado con los modelos de Yu *et al.* (2024), basado en redes neuronales convolucionales, y Bravo-Moncayo *et al.* (2023), que aplica técnicas geoestadísticas, nuestro enfoque destaca por su facilidad de replicación, bajo requerimiento computacional y alta precisión (con un MSE entre 1,03 y 1,33, frente a 1,54 y 1,65, respectivamente). Esta hibridación lo convierte en una herramienta accesible y efectiva para municipios con recursos limitados.

Además de las limitaciones mencionadas, el estudio no consideró factores ambientales como la presencia de vegetación, de los edificios cercanos o la topografía, los cuales pueden alterar la propagación del sonido. Tampoco se incluyeron condiciones meteorológicas (viento, humedad, temperatura) que podrían influir en la absorción o refracción del ruido. Estas variables podrían incorporarse en futuras investigaciones para afinar la precisión del modelo.

Conclusiones

El modelo matemático desarrollado para el análisis del ruido vehicular ha demostrado ser una herramienta valiosa para la evaluación y gestión del impacto acústico en entornos urbanos. A partir del análisis de los datos de tráfico, se logró identificar los niveles de ruido

que sobrepasaban el límite máximo permisible de 55 dB en zona residencial según el Libro V del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), por lo que en el mismo modelo se implementó el uso de barreras acústicas reduciendo el ruido estimado en un 15 %.

Los vehículos livianos y las motocicletas fueron las principales fuentes de ruido; en el análisis de datos se destacó que los resultados en los niveles de ruido sin ninguna intervención se situaron en un promedio de 62,55 dB(A), mientras que la instalación de barreras acústicas logró reducir estos niveles a 47,60 dB(A), evidenciando una disminución significativa de aproximadamente 14,96 dB(A).

Esta reducción en los niveles de ruido no solo refleja la eficacia de las barreras acústicas como medida de mitigación, sino que también subraya la importancia de implementar estrategias de control del ruido vehicular en áreas urbanas densamente pobladas, es decir, los beneficios de tales intervenciones van más allá de la simple reducción de decibelios. La exposición al ruido es un problema de salud pública, por lo que las recomendaciones del estudio deben tomarse en cuenta para reducir el estrés y las enfermedades relacionadas con el ruido, aumentando la calidad de vida de los residentes.

La integración de herramientas como el QGIS y el MATLAB representa un valor añadido, pues permiten un análisis geoespacial detallado y una modelación cuantitativa precisa. Este enfoque híbrido fortalece la aplicabilidad del modelo en contextos urbanos reales, facilitando su replicación y adaptación en otras ciudades.

El modelo constituye una herramienta práctica para las autoridades locales interesadas en formular regulaciones urbanas basadas en la evidencia técnica. Su aplicación puede sustentar decisiones sobre diseño de infraestructuras urbanas, zonas de amortiguamiento acústico o planificación de tráfico orientadas a reducir la exposición al ruido y mejorar la calidad de vida.

Contribución de los autores

Javier Alcázar: conceptualización, desarrollo del modelo matemático y redacción del documento. Sandra Campuzano: recopilación de datos, análisis de resultados y revisión final del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Ahac, M., Ahac, S., Lakušić, S. (2021). Long-Term Sustainability Approach in Road Traffic Noise Wall Design. *Sustainability*, 13(2), 536. <https://doi.org/10.3390/su13020536>
- Alam, P., Ahmad, K., Afsar, S. S., Akhtar, N. (2020). Noise Monitoring, Mapping, and Modelling Studies – A Review. *Journal of Ecological Engineering*, 21(4). <https://doi.org/10.12911/22998993/119804>
- Amoatey, P., Omidvarbona, H., Baawain, M. S., Al-Mayahi, A., Al-Mamun, A., Al-Harthy, I. (2020). Exposure assessment to road-traffic noise levels and health effects in an arid urban area. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(28), 35051-35064. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09785-y>
- Amran, M., Fediuk, R., Murali, G., Vatin, N., Al-Fakih, A. (2021). Sound-Absorbing Acoustic Concretes: A Review. *Sustainability*, 13(19), 712. <https://doi.org/10.3390/su131910712>
- Bakker, J., Lugten, M., Tenpierik, M. (2023). Applying vertical greening systems to reduce traffic noise in outdoor environments: Overview of key design parameters and research methods. *Building Acoustics*, 30(3), 315-338. <https://doi.org/10.1177/1351010X231171028>
- Bramich, D. M., Menéndez, M., Ambühl, L. (2022). Fitting Empirical Fundamental Diagrams of Road Traffic: A Comprehensive Review and Comparison of Models Using an Extensive Data Set. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(9), 14104-14127. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3142255>

- Bravo-Moncayo, L., Garzón, C., Chávez, M., Pavón-García, I., Lucio-Naranjo, J.** (2023). Spatial assessment of traffic noise using hybrid machine learning and geostatistical techniques: A case study in Cuenca, Ecuador. *Sustainability*, 15(10), 10020. <https://doi.org/10.3390/su151010020>
- Casali, J. G.** (2021). Sound and Noise: Measurement and Design Guidance. En *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (pp. 457-493). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119636113.ch18>
- Epstein, M. J.** (2020). *Sound and Noise: A Listener's Guide to Everyday Life*. McGill-Queen's Press - MQUP.
- Farooqi, Z. U. R., Ahmad, I., Ditta, A., Ilic, P., Amin, M., Naveed, A. B., Gulzar, A.** (2022). Types, sources, socioeconomic impacts, and control strategies of environmental noise: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(54), 81087-81111. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23328-7>
- Fediuk, R., Amran, M., Vatin, N., Vasilev, Y., Lesovik, V., Ozbakkaloglu, T.** (2021). Acoustic Properties of Innovative Concretes: A Review. *Materials*, 14(2), 398. <https://doi.org/10.3390/ma14020398>
- Feng, Z. & Liu, Y.** (2025). The latest research status of porous sound-absorbing materials. *Journal of Polymer Engineering*, 45(3), 207-225. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2024-0211>
- Gao, N., Zhang, Z., Deng, J., Guo, X., Cheng, B., Hou, H.** (2022). Acoustic Metamaterials for Noise Reduction: A Review. *Advanced Materials Technologies*, 7(6), 2100698. <https://doi.org/10.1002/admt.202100698>
- Garg, N.** (2022). Environmental Noises Control Strategies. En N. Garg (Ed.), *Environmental Noise Control: The Indian Perspective in an International Context* (pp. 277-344). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87828-3_7
- Gilani, T. A. & Mir, M. S.** (2021). A study on the assessment of traffic noise induced annoyance and awareness levels about the potential health effects among residents living around a noise-sensitive area. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(44), 63045-63064. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15208-3>
- Hansen, C. H. & Hansen, K. L.** (2021). *Noise Control: From Concept to Application* (2.^a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429428876>
- He, W., He, K., Zou, C., Yu, Y.** (2021). Experimental noise and vibration characteristics of elevated urban rail transit considering the effect of track structures and noise barriers. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(33), 45903-45919. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14015-0>
- Ibili, F., Adanu, E. K., Adams, C. A., Andam-Akorful, S. A., Turay, S. S., Ajayi, S. A.** (2022). Traffic noise models and noise guidelines: A review. *Noise & Vibration Worldwide*, 53(1-2), 65-79. <https://doi.org/10.1177/09574565211052693>
- Krittanawong, C., Qadeer, Y. K., Hayes, R. B., Wang, Z., Virani, S., Zeller, M., Dadvand, P., Lavie, C. J.** (2023). Noise Exposure and Cardiovascular Health. *Current Problems in Cardiology*, 48(12), 101938. <https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2023.101938>
- Kumar, B. S. & Chowdary, V.** (2024). Railway Noise Pollution in Urban Environments. En N. Garg, C. Gautam, S. Rab, M. Wan, R. Agarwal, & S. Yadav (Eds.), *Handbook of Vibroacoustics, Noise and Harshness* (pp. 1-38). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4638-9_2-1
- Kumar, S., Xiang, T. B., Lee, H. P.** (2020). Ventilated acoustic metamaterial window panels for simultaneous noise shielding and air circulation. *Applied Acoustics*, 159, 107088. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107088>
- Lakshmanan, V., Robinson, S., Munn, M.** (2020). *Machine Learning Design Patterns*. O'Reilly Media, Inc.
- Laxmi, V., Thakre, C., Vijay, R.** (2022). Evaluation of noise barriers based on geometries and materials: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(2), 1729-1745. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16944-2>
- Lázaro, J., Pereira, M., Costa, P. A., Godinho, L.** (2022). Performance of Low-Height Railway Noise Barriers with Porous Materials. *Applied Sciences*, 12(6), 2960. <https://doi.org/10.3390/app12062960>
- Lee, H. P., Lim, K. M., Kumar, S.** (2021). Noise assessment of elevated rapid transit railway lines and acoustic performance comparison of different noise barriers for mitigation of elevated railway tracks noise. *Applied Acoustics*, 183, 108340. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108340>

- Li, M., Yuan, M., Li, J., Li, Y., Zhou, W., Zu, Y. (2023). Research and application of combined noise reduction method by using noise reducing pavement and noise barrier. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 268(8), 253-259. https://doi.org/10.3397/IN_2023_0053
- Liao, G., Luan, C., Wang, Z., Liu, J., Yao, X., Fu, J. (2021). Acoustic Metamaterials: A Review of Theories, Structures, Fabrication Approaches, and Applications. *Advanced Materials Technologies*, 6(5), 2000787. <https://doi.org/10.1002/admt.202000787>
- Liu, D., Wang, C., González-Libreros, J., Tu, Y., Elfgrén, L., Sas, G. (2023). A review on aerodynamic load and dynamic behavior of railway noise barriers when high-speed trains pass. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 239, 105458. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105458>
- Masum, M. H., Pal, S. K., Akhie, A. A., Ruva, I. J., Akter, N., Nath, S. (2021). Spatiotemporal monitoring and assessment of noise pollution in an urban setting. *Environmental Challenges*, 5, 100218. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100218>
- Mikhailenko, P., Piao, Z., Kakar, M. R., Bueno, M., Athari, S., Pieren, R., Heutschi, K., Poulikakos, L. (2022). Low-noise pavement technologies and evaluation techniques: A literature review. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6), 1911-1934. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1830091>
- Montes, D., Barrigón, J. M., Rey-Gozalo, G. (2023). Effects of noise on pedestrians in urban environments where road traffic is the main source of sound. *Science of Total Environment*, 857, 159406. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159406>
- Munir, S., Khan, S., Nazneen, S., Ahmad, S. S. (2021). Temporal and seasonal variations of noise pollution in urban zones: A case study in Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(23), 29581-29589. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12738-8>
- Nourani, V., Gökçekuş, H., Umar, I. K. (2020). Artificial intelligence based ensemble model for prediction of vehicular traffic noise. *Environmental Research*, 180, 108852. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108852>
- Olczak, K., Penar, W., Nowicki, J., Magiera, A., Kłoczek, C. (2023). The Role of Sound in Livestock Farming—Selected Aspects. *Animals*, 13(14), 2307. <https://doi.org/10.3390/ani13142307>
- Oquendo-Di Cosola, V., Olivieri, F., Ruiz-García, L. (2022). A systematic review of the impact of green walls on urban comfort: Temperature reduction and noise attenuation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112463. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112463>
- Owolabi, O., Lodico, D., Butterfield, E., Shokouhian, M., Abiodun, P., Darko, C., Duru, C. (2024). Effectiveness of Short Solid Barriers to Reduce Noise Generated by Different Types of Highway Vehicles. <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/79847>
- Partheeban, P., Karthik, K., Navin Elamparithi, P., Somasundaram, K., Anuradha, B. (2021). Urban road traffic noise on human exposure assessment using geospatial technology. *Environmental Engineering Research*, 27(5), 210249-0. <https://doi.org/10.4491/eer.2021.249>
- Reche, C., Tobias, A., Viana, M. (2022). Vehicular Traffic in Urban Areas: Health Burden and Influence of Sustainable Urban Planning and Mobility. *Atmosphere*, 13(4), 598. <https://doi.org/10.3390/atmos13040598>
- Rey, G., Suárez, E., Montenegro, A. L., Arenas, J. P., Barrigón, J. M., Montes, D. (2020). Noise Estimation Using Road and Urban Features. *Sustainability*, 12(21), 217. <https://doi.org/10.3390/su12219217>
- Saakian, A. (2020). *Radio Wave Propagation Fundamentals, Second Edition*. Artech House.
- Sharma, S., Sudhakara, P., Singh, J., Singh, S., Singh, G. (2023). Emerging progressive developments in the fibrous composites for acoustic applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 102, 443-477. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.07.053>
- Sivakumaran, K., Ritonja, J. A., Waseem, H., AlShenaibar, L., Morgan, E., Ahmadi, S. A., Denning, A., Michaud, D. S., Morgan, R. L. (2022). Impact of Noise Exposure on Risk of Developing Stress-Related Health Effects Related to the Cardiovascular System: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Noise and Health*, 24(114), 107. https://doi.org/10.4103/nah.nah_83_21
- Yadav, D., Garg, N., Gautam, C., Agarwal, R., Yadav, S. (2025). Noise Pollution: The Silent Intruder to Health and Well-Being. En N. Garg, C. Gautam, S. Rab, M. Wan, R. Agarwal, & S. Yadav (Eds.), *Handbook of Vibroacoustics, Noise and Harshness* (pp. 1185-1203). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8100-3_63

-
- Yan, S., Yuan, L., Wang, C., Diao, Q., Ren, X., Pan, X., Su, W., Chang, L., Zou, H., Shi, X., Lin, B.** (2023). A modular design approach for porous green sound-absorbing concrete for the noise barrier on high-speed railway. *Journal of Building Engineering*, 77, 107543. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107543>
- Yang, W., He, J., He, C., Cai, M.** (2020). Evaluation of urban traffic noise pollution based on noise maps. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87, 102516. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102516>
- Yu, W., Jang, J.-C., Zhu, Y., Peng, J., Yang, W., Li, K.** (2024). Enhanced estimation of traffic noise levels using minute-level traffic flow data through convolutional neural network. *Sustainability*, 16(14), 6088. <https://doi.org/10.3390/su16146088>
- Zaman, M., Muslim, M., Jehangir, A.** (2022). Environmental noise-induced cardiovascular, metabolic and mental health disorders: A brief review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(51), 76485-76500. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22351-y>