

Estimación del riesgo por contaminación sonora urbana mediante modelado geoespacial y evaluación espacial multicriterio en Santa Clara, Cuba

Recibido: 2022-12-05

Aceptado: 2023-06-29

Cómo citar este artículo:

González Lozano, R. y Rodríguez Hernández, S. V. (2023). Estimación del riesgo por contaminación sonora urbana mediante modelado geoespacial y evaluación espacial multicriterio en Santa Clara, Cuba. *Revista INVI*, 38(108), 288-317.

<https://doi.org/10.5354/0718-8358.2023.69059>

El trabajo se enmarca en algunos resultados del “Proyecto para el desarrollo de la cartografía de ruido de ciudades en Cuba”, financiado y ejecutado por el Grupo Empresarial GEOCUBA y es el resultado de la tesis doctoral denominada “Método para el modelado geoespacial de la contaminación sonora urbana por tráfico rodado”.

Raúl González-Lozano

Geocuba Geodesa, La Habana, Cuba,

rglozano@vcl.geocuba.cu

<https://orcid.org/0000-0003-3919-2946>

Silvio Vioel Rodríguez-Hernández

Geocuba Investigación y Consultoría, La Habana, Cuba,

silvio@uct.geocuba.cu

<https://orcid.org/0000-0003-4091-482X>



Estimación del riesgo por contaminación sonora urbana mediante modelado geoespacial y evaluación espacial multicriterio en Santa Clara, Cuba

Resumen

La contaminación sonora urbana por tráfico rodado es una problemática existente en diversas urbes cubanas, que se agudiza con la presencia de condiciones agravantes, como lo son: la existencia de un parque automotor caracterizado por la obsolescencia tecnológica; el desconocimiento general entre la población de la existencia y consecuencias de este tipo de contaminación; el escaso tratamiento jurídico que ha tenido la problemática y, finalmente, la insuficiente atención de la misma por parte de las autoridades técnicas y administrativas. Con base en ello, el objetivo general del presente estudio es contribuir a la eficacia de la gestión de este tipo de contaminación en la ciudad de Santa Clara, para lo cual se propone un marco teórico basado en el modelado geoespacial del riesgo ante la contaminación sonora urbana por tráfico rodado. Su resultado se presenta como un concepto aglutinador del peligro estudiado y de la distribución espacial de la vulnerabilidad, que obedece a particularidades socioeconómicas de la zona de estudio. El estudio revela la existencia de elevados niveles de riesgos en determinados sectores de la zona de estudio y aporta una herramienta teórica que contribuye a perfeccionar la eficacia en la gestión de este tipo de contaminación ambiental.

Palabras clave: evaluación espacial multicriterio, modelado geoespacial, riesgo, ruido, vulnerabilidad.



Estimation of the Risk due to Urban Noise Pollution through Geospatial Modeling and Multicriteria Spatial Evaluation in Santa Clara, Cuba

Abstract

Urban noise pollution by road traffic is a problem in various Cuban cities, and that is exacerbated by the presence of aggravating conditions, such as a fleet characterized by technological obsolescence, general ignorance among the population of the existence and consequences of this type of contamination, scarce legal treatment of the problem, and insufficient attention on the part of technical and administrative authorities. Based on this, the present study has the general objective of contributing to the effectiveness of the management of this type of pollution in the city of Santa Clara, for which it proposes a theoretical framework based on geospatial modeling of risk in the face of urban noise pollution by road traffic, where the result achieved is presented as an agglutinating concept of the risk studied, and the spatial distribution of vulnerability, which responds to the socio-economic particularities of the study area. The study reveals the existence of high-risk levels in certain sectors of the study area and provides a theoretical tool that contributes to improving the efficacy in the management of this type of environmental contamination.

Keywords: Geospatial modeling, multicriteria spatial evaluation, noise, risk, vulnerability.

Introducción

Debido al desarrollo económico y social a nivel mundial en las últimas décadas, ha aumentado la población urbana, así como la cantidad y uso de las infraestructuras de transporte (Buhaug y Urdal, 2013; Mohsin *et al.*, 2019). Estos hechos han conllevado al incremento progresivo de los niveles de ruido existentes, creando el problema de la contaminación acústica con efectos nocivos para la salud humana (Clark y Paunovic, 2018; Münzel *et al.*, 2018; Neitzel, 2018) y la economía (Bravo Moncayo, 2017; Bravo-Moncayo *et al.*, 2019), entre otros.

La problemática anterior se manifiesta en diversas urbes cubanas, donde se han realizado diferentes esfuerzos científicos para estudiar y mitigar este tipo de contaminación (Barceló Pérez *et al.*, 2015; Barceló Pérez y González Sánchez, 2018; Betancourt Morffis y Almeda Barrios, 2022; Fajardo-Segarra y Mateus-Lucas, 2017; Torres Sotolongo y Romero Suárez, 2014). Sin embargo, existen factores que atentan contra el tratamiento efectivo, como es la no existencia de un cuerpo normativo sistémico y orientado de manera concreta a la contaminación acústica, sus métodos de estudio, análisis y enfrentamiento en diversas situaciones. Y, dado el subdesarrollo económico cubano, la contaminación acústica es otro elemento que, asumido como un problema secundario, es ignorado por gran parte de la población, pese a ser directamente impactada por sus efectos adversos.

Específicamente, en la ciudad de Santa Clara, capital de la provincia de Villa Clara, se han combinado factores como el crecimiento demográfico y el amplio desarrollo de la infraestructura económica-social en una interacción que ha configurado la situación urbano-ambiental actual, caracterizada por (entre otros elementos y a la luz de los objetivos del presente estudio) una alta contaminación acústica producida por el tráfico rodado como fuente principal.

Los estudios realizados sobre contaminación sonora en esta región (Díaz Remond, 2012; Salameh, 2010; Torres Linares, 2017) describen una situación acústica existente o pronosticada mediante la aplicación, principalmente, de métodos basados en mediciones con desfase del tiempo y métodos predictivos, de acuerdo con la taxonomía expuesta por González-Lozano y Rodríguez-Hernández (2022). Sin embargo, no se evidencian estudios que aborden la problemática de la contaminación sonora a partir del uso del modelado geoespacial con un enfoque a la gestión de riesgos, limitando su alcance.

A partir de lo anterior, el presente trabajo persigue como objetivo general realizar el modelado geoespacial del riesgo por contaminación sonora urbana por tráfico rodado en la zona interna a la carretera Circunvalación de la ciudad de Santa Clara, asumiendo el riesgo como un concepto aglutinador del peligro estudiado y la distribución espacial de las particularidades socioeconómicas de la zona de estudio.

Para dar cumplimiento al objetivo planteado se emplea un enfoque teórico mixto (cuantitativo-cualitativo) en la concepción y aplicación de la metodología directriz de esta investigación. La hipótesis de trabajo se basa en que, si se modela geoespacialmente el riesgo ante la contaminación sonora urbana por tráfico

rodado —mediante la concepción del peligro a partir de la consideración geoespacial de los elementos de la emisión y la propagación sonora, así como del análisis de la vulnerabilidad en diferentes ámbitos— entonces se podría perfeccionar la gestión del fenómeno de la contaminación acústica en la ciudad de Santa Clara.

Problemática y estado del arte

Según la Organización Mundial de la Salud [OMS], el ruido ambiental se define como “el ruido emitido por todas las fuentes a excepción de las áreas industriales. Las fuentes principales de ruido urbano son tránsito automotor, ferroviario y aéreo, la construcción y obras públicas y el vecindario” (Berglund *et al.*, 1999 p. v, traducción de los autores). Un estudio actualizado de la Oficina Regional de la OMS en Europa del año 2018 indica que el ruido es el segundo factor de contaminación más importante por detrás de la contaminación del aire (World Health Organization Regional Office for Europe, 2018). También aclara que, solo como resultado de la contaminación por tráfico rodado, se pierden anualmente en Europa occidental un millón de años de vida saludables en cada año, debido a que la exposición al ruido genera efectos adversos en la salud, que pueden ser auditivos y no auditivos, como aumento del umbral de la audición, déficit de atención, enfermedades cardiovasculares, afectación del sueño, molestias, etc. Diversos estudios de la región europea (Faulkner y Murphy, 2022; “Ruido y salud”, 2011) señalan que el tráfico rodado es la fuente predominante de contaminación sonora en zonas urbanas y la que ha sido objeto de un mayor número de investigaciones científicas documentadas (Clark y Paunovic, 2018). En aras de contrarrestar los efectos adversos del ruido, la Unión Europea ha trazado políticas para la gestión de la contaminación sonora. Estas políticas han estado encaminadas, entre otros aspectos, a la estandarización de métodos de medición, predicción y control, así como al establecimiento de vías de comunicación transparentes que den a conocer a la ciudadanía los elementos que constituyen la calidad del ambiente acústico que habitan. En la región latinoamericana se han evidenciado esfuerzos por caracterizar y enfrentar la presencia de este tipo de contaminación en países como Colombia (Agudelo *et al.*, 2020; Murillo Gómez, 2017; Ochoa Villegas *et al.*, 2017), Perú (Cárdenas Torres, 2021; Inga Lazón y Rojas Alva, 2021), Ecuador (Fernando, 2021; Peña Lino, 2021) Chile (Bastían Monarca *et al.*, 2015, 2016) y Cuba (Barceló Pérez y González Sánchez, 2018; Fajardo-Segarra y Mateus-Lucas, 2017; González-Lozano y Rodríguez-Hernández, 2022; Torres Linares, 2017), entre otros países. En el caso específico de Cuba, se han configurado condiciones propicias para la proliferación de la contaminación sonora por tráfico rodado. Entre estas se destacan la presencia de un parque automotor envejecido, el desconocimiento general sobre las causas y consecuencias de este tipo de contaminación, el tratamiento jurídico escaso de la problemática y la insuficiente atención del problema por parte de la colectividad científica nacional. En este sentido, en el país y particularmente en la ciudad de Santa Clara —una de sus urbes más importantes— la presencia de la contaminación sonora y su tratamiento ineficiente constituye una problemática que debe ser atendida por las autoridades técnicas y administrativas competentes para lograr una gestión con medidas efectivas de erradicación o mitigación del problema.

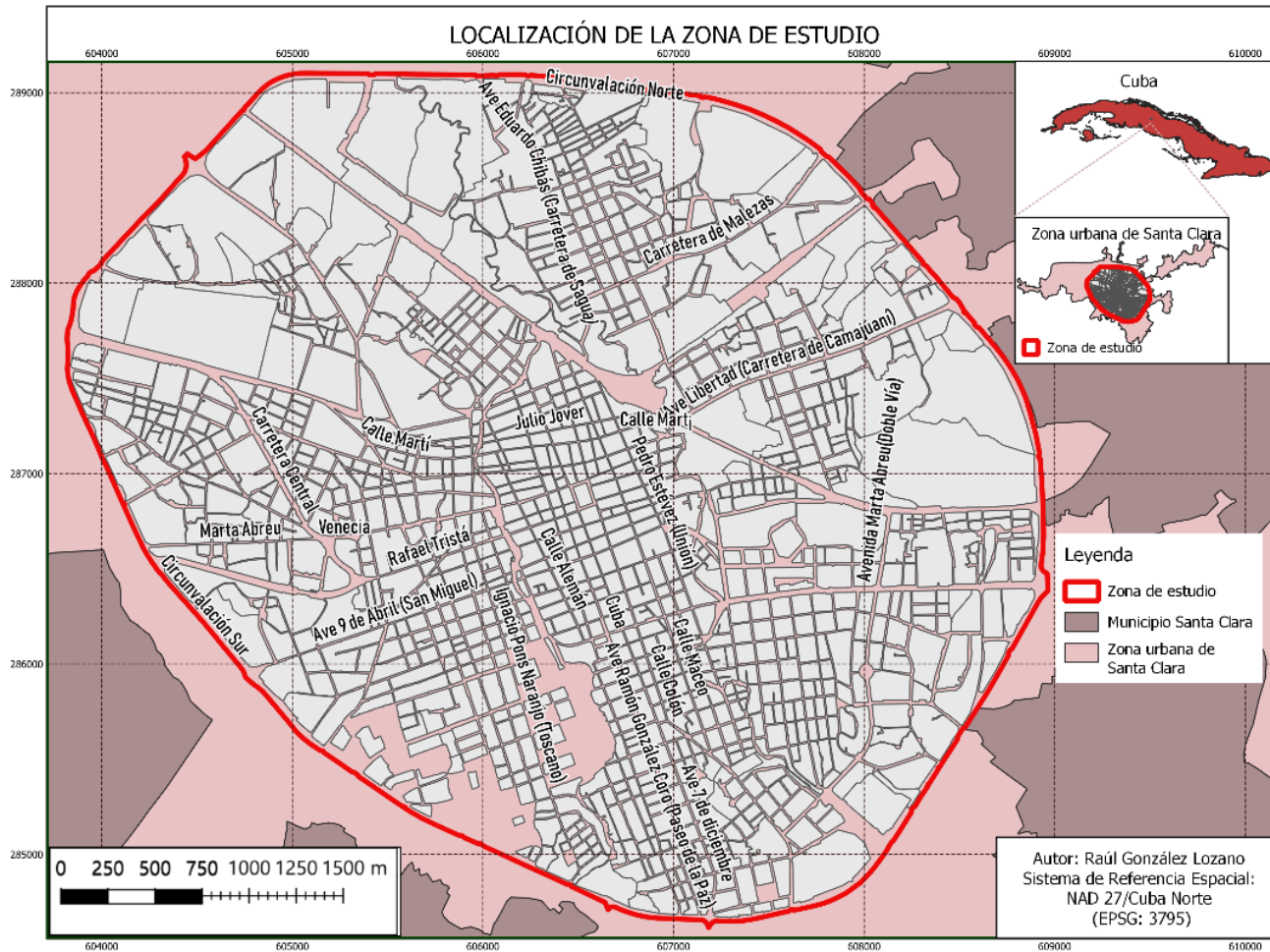
Metodología

La metodología empleada en el presente estudio tuvo un enfoque mixto (cuantitativo-cualitativo) con alcance descriptivo-explicativo del fenómeno bajo revisión. Para ello se sustentó en la definición de una perspectiva teórica donde se conceptualizaron y caracterizaron los elementos constitutivos del fenómeno examinado, en base a un caso de estudio y al desarrollo de categorías descriptivas o explicativas de los resultados. El límite espacial del estudio (Figura 1) es la región con mayor desarrollo urbanístico y socioeconómico de la ciudad de Santa Clara: la zona interna de la carretera Circunvalación, con una superficie de 168 hectáreas.

La recolección de datos se basó en el análisis documental, levantamientos fotogramétricos, digitalización cartográfica, la medición con instrumentación estandarizada (sonómetro integrador clase 1 PCE-432) y la observación en el período comprendido entre 20 de diciembre de 2021 y el 1 de marzo de 2022. Los datos recolectados, su fuente y el método de obtención empleado se relacionan en la Tabla 1.

En primer lugar, se analizó la validez de la aplicación del modelo de emisión sonora para tráfico de carreteras, NMPB-Routes, en las condiciones de una urbe cubana mediante la consideración de un modelo físico de emisión y propagación que fue interpretado desde la óptica geoespacial, a partir del empleo de funciones para el tratamiento de la información geográfica. Una vez que se estableció la validez del método anterior, se asignaron niveles de peligro en función de la categorización del impactante en cada unidad espacial de análisis. En segundo lugar, se desarrolló el análisis de la vulnerabilidad general mediante la aplicación de la Evaluación Espacial Multicriterio (EEMC), considerando la utilización de categorías de índole social y económica, definidas a través del método de criterio de expertos. Con los resultados anteriores se calculó el riesgo por afectación de la contaminación sonora en la zona de estudio, dotando a los actores técnicos y administrativos de una perspectiva integradora para la concepción de decisiones que contribuyan al enfrentamiento de la contaminación sonora en la ciudad de Santa Clara. En la Figura 2 se muestra un esquema resumen de los procesos descritos anteriormente.

Figura 1.
Localización de la zona de estudio.



Fuente: González-Lozano (2023).

Tabla 1.
Datos empleados durante el estudio, su fuente y método de obtención.

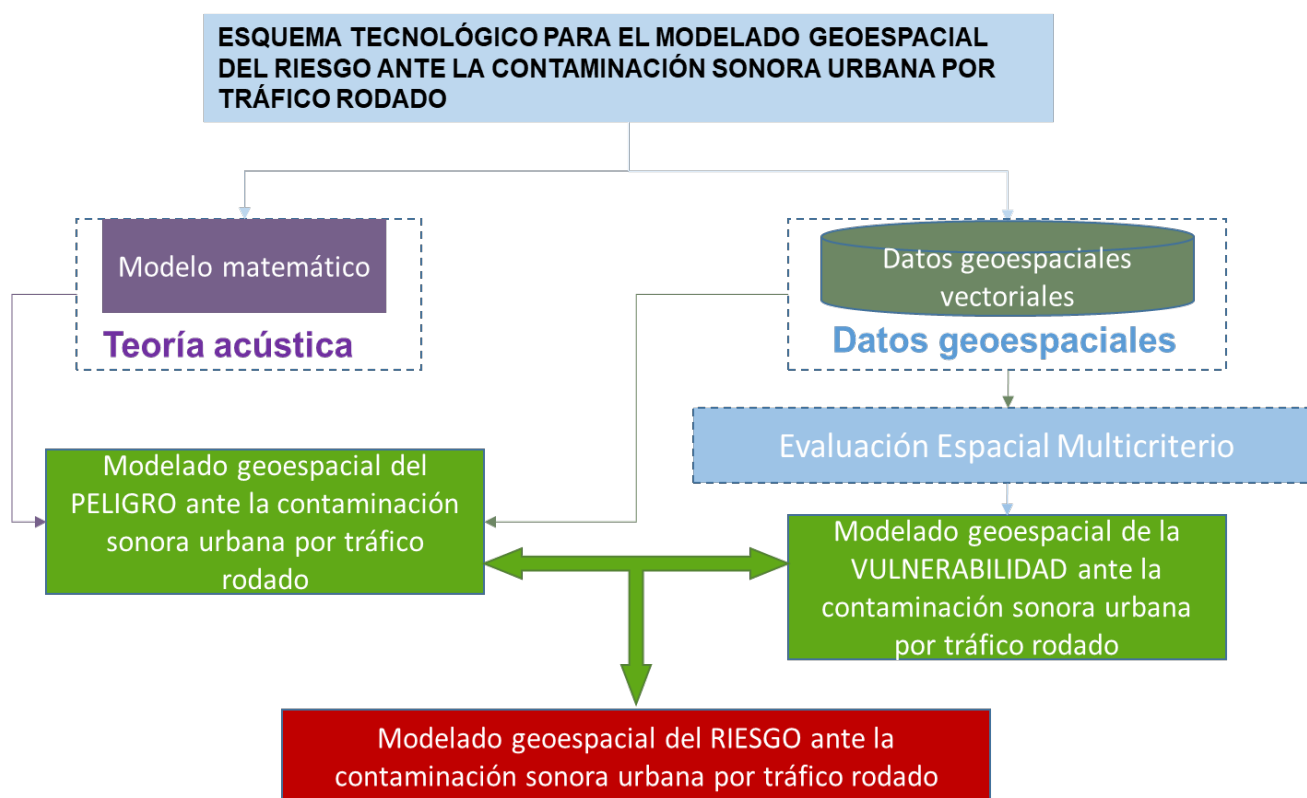
Dato	Fuente	Método de obtención
Datos geoespaciales vectoriales en formato SHP con atributos de los viales, las construcciones, los consejos populares ¹ , las manzanas (unidad espacial de análisis), etc.	Empresa GEOCUBA Villa Clara - Sancti Spiritus. Oficinas regionales del Instituto Nacional de Ordenamiento Territorial y Urbanismo de Santa Clara	Observación, medición, digitalización cartográfica y análisis documental
Ortoimagen a 5 cm resolución espacial de la ciudad de Santa Clara	Empresa GEOCUBA Villa Clara - Sancti Spiritus	Levantamientos fotogramétricos
Modelo Digital de Superficie en formato TIFF, de la ciudad de Santa Clara, generado por métodos fotogramétricos	Empresa GEOCUBA Geodesa	Levantamientos fotogramétricos
Estudios sobre aforo vehicular realizados por la Facultad de Construcciones de la Universidad Central de Las Villas “Marta Abreu” (UCLV)	Tesis y reportes de la Facultad de Construcciones de la UCLV	Análisis documental
Densidad de población por manzana (habitantes por metros cuadrados) Densidad de población infantil (0-15 años) por manzana (habitantes por metros cuadrados) Densidad de población anciana (mayor a 60 años) por manzana (habitantes por metros cuadrados) Cantidad de instituciones de salud (unidades) Cantidad de instituciones de educación (unidades) Cantidad de instituciones científico-técnicas (unidades) Cantidad de otras instituciones de interés (unidades)	Datos de la oficina provincial de estadística relativas al último censo realizado en el país (2011). Base de Datos cartográficas del catastro, OpenStreetMap, etc.	Análisis documental.
Nivel Sonoro Continuo Equivalente ($L_{eq,A}$) en diversos puntos de la zona de estudio	Mediciones directas realizadas en campo por el autor con sonómetro integrador clase 1 marca PCE 432	Medición y observación

Fuente: Elaboración propia.

¹ En Cuba, división territorial o político-administrativa primaria, inferior al municipio.

Figura 2.

Esquema general del modelado geoespacial del riesgo ante la contaminación sonora urbana por tráfico rodado.



Fuente: Elaboración propia.

MODELADO GEOESPACIAL DEL PELIGRO ANTE LA CONTAMINACIÓN SONORA URBANA POR TRÁFICO RODADO

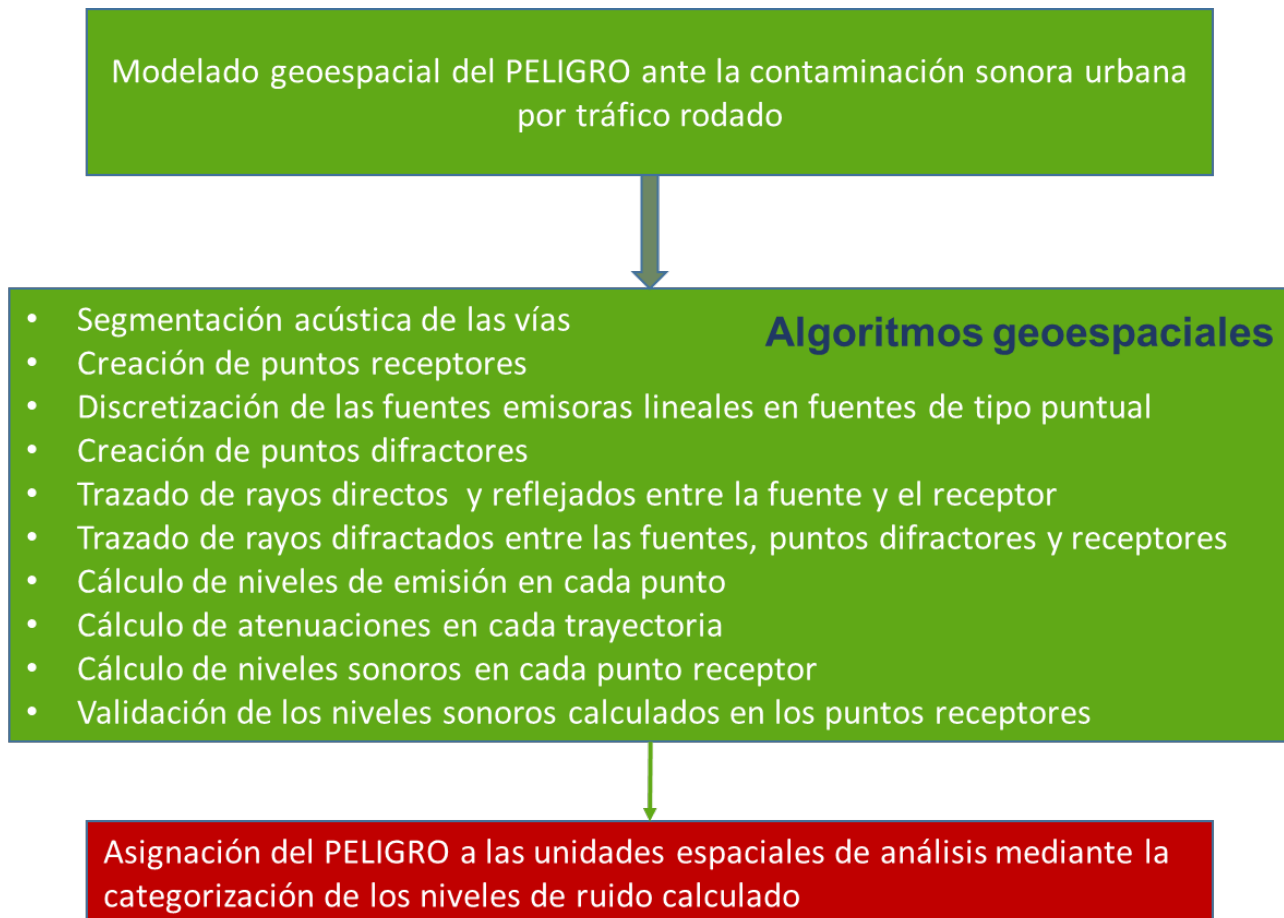
La predicción de diversos parámetros e indicadores de ruido se desarrolla con modelos matemáticos que se orientan a la descripción de la emisión y la propagación de este fenómeno y que emplean las características de las fuentes y las del medio en el que se propaga el sonido. Para el cálculo del $L_{eq,A}$, el presente estudio emplea como base fundamental en el análisis de la emisión, el desarrollo teórico del modelo matemático NMPB-Routes (Besnard *et al.*, 2009; “Road noise prediction 2”, 2009). Un aspecto clave considerado durante la investigación fue el análisis de la validez de la utilización de este modelo en las condiciones propias de una urbe cubana, lo cual fue realizado mediante la comparación de valores pronosticados y valores medidos por métodos directos. Los resultados evidencian desviaciones relacionadas fundamentalmente con las condiciones técnicas del parque automotor, la existencia de categorías vehiculares típicas de la ciudad (vehículos del siglo XX y vehículos transformados, emisores de altos niveles de ruido) y el desconocimiento general de la temática por parte de la población. Basado en estos resultados, se realizó una campaña de observaciones ejecutadas en diferentes configuraciones de la dinámica vehicular y urbana que posibilitó el empleo de los datos obtenidos para el ajuste de una función basada en el modelo de emisión de referencia. Dicha función plantea que por cada categoría vehicular el nivel sonoro emitido es igual a la adición de los niveles de la componente definida por el contacto entre la superficie de rodamiento y el vehículo (dependiente de la velocidad y del tipo de superficie), con el nivel sonoro de la componente mecánica (dependiente de la velocidad, de la pendiente de la vía y de la aceleración). La concepción del ruido vehicular como un fenómeno colectivo da entrada a las variables relacionadas con el flujo de vehículos y sus características (flujo de vehículos por cada categoría considerada y tipo de flujo —vinculado con la variable aceleración—). Estos parámetros fueron ajustados a las condiciones de la zona de estudio, excepto por aquellos parámetros exclusivos de las particulares condiciones entre las condiciones del modelo europeo que no son aplicables a la urbe cubana.

En este sentido se desarrolló una serie de algoritmos geoespaciales (Figura 3) que aprovechan las bondades de la plataforma del Sistema de Información Geográfica QGIS y que permiten el modelado geoespacial de los elementos de la emisión y la propagación del sonido, bajo las condiciones teóricas de la acústica que plantea dicho modelo matemático para el cálculo del $L_{eq,A}$ en una red de puntos receptores creada a efectos del modelado.

La segmentación acústica de la vía se realizó de acuerdo a criterios aceptados en la literatura internacional (Besnard *et al.*, 2009; “Road noise prediction 2”, 2009), y su objetivo es optimizar el cálculo de los niveles de ruido en los puntos receptores. Este proceso consta de dos elementos: en primer lugar, se simplificó la geometría de las vías y, de esta manera, se creó un modelo lógico de la vía donde se considera la misma como una línea y no como una superficie. En segundo lugar, se segmentan los viales en secciones acústicamente homogéneas. A efectos de la presente investigación, se definió una sección acústicamente homogénea, específicamente, un segmento de la fuente lineal con una pequeña variación en la emisión del sonido y para la cual la emisión es considerada constante dentro del modelado.

Figura 3.

Esquema que muestra los procesos del modelado geoespacial del peligro ante la contaminación sonora urbana por tráfico rodado.



Fuente: Elaboración propia.

La creación de puntos receptores se realizó a partir de una capa de obstáculos constituida por las unidades espaciales de análisis en formato vectorial. En este proceso los puntos fueron creados de forma equidistante entre sí, alrededor de los obstáculos presentes en la zona de estudio. El nivel de densificación de puntos receptores estuvo relacionado directamente con la exactitud en la determinación del $L_{eq,A}$ en sitios no muestreados. Pero también un mayor nivel de densificación implicó un mayor esfuerzo computacional durante la resolución de los algoritmos; por esto, lograr un equilibrio óptimo entre estos dos aspectos fue el norte de los investigadores durante el presente estudio.

Las fuentes de tipo lineal fueron discretizadas en fuentes de tipo puntual (puntos emisores), mediante un algoritmo que tuvo en consideración la distancia desde la fuente al punto receptor más cercano en cada caso. En cada uno de los puntos emisores obtenidos mediante la discretización se realizó el cálculo del nivel de emisión de acuerdo con las formulaciones propuestas por el método NMPB-Routes. El proceso anterior es avalado por la concepción de segmentos acústicamente homogéneos e implica el análisis de la atenuación geométrica enfocado a fuentes de tipo puntual. Las concepciones teóricas que fundamentan la validez de la consideración anterior son expuestas por Besnard *et al.* (2009) y en “Road noise prediction 2” (2009).

Mediante la consideración de la posición espacial de los puntos receptores, los puntos emisores y los obstáculos, se realizaron una serie de algoritmos geoespaciales basados en la teoría acústica de rayos que posibilitaron simular la propagación del sonido. Dicha simulación estuvo limitada al análisis de la trayectoria de los rayos directos, reflejados y difractados; además, por cada una de estas trayectorias se aplicó el cálculo de las atenuaciones por divergencia geométrica, absorción atmosférica, atenuación por efecto del suelo y atenuación por difracción lateral. Una vez obtenido el resultado de la atenuación total por cada trayectoria y el valor inicial de $L_{eq,A}$ en cada punto de fuente emisora, se calculó el $L_{eq,A}$ final en cada uno de los puntos receptores.

Para el establecimiento de los niveles de peligro, a cada unidad espacial de análisis le fue asignado un $L_{eq,A}$, a correspondiente al mayor valor existente en los puntos receptores adyacentes a sus límites. Estos valores fueron normalizados a una escala de medición entre 1 y 10 para posibilitar futuras operaciones de álgebra de mapas durante la obtención del riesgo ante la contaminación sonora urbana por tráfico rodado.

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS PREDICCIONES

Una vez obtenidos los valores del $L_{eq,A}$ se procedió a la evaluación de la calidad mediante el cálculo del error de predicción, arrojado por el modelado respecto a valores medidos directamente en campo del $L_{eq,A}$ en los puntos de muestreo. Para la medición directa se empleó un sonómetro integrador clase 1, de acuerdo con especificación de la NC 26:2012 (Oficina Nacional de Normalización, 2012), en lo adelante, norma de referencia.

La determinación del $L_{eq,A}$ se efectuó en régimen de respuesta eficaz rápido para garantizar que la resolución cronológica del equipo captara cualquier variación de la señal, bajo ponderación de frecuencia

A y con respuesta de incidencia aleatoria que garantizó una sensibilidad de impresión uniforme para los frentes de ondas que arribaron al micrófono desde diferentes ángulos. Se efectuó la verificación de la aptitud metrológica del sonómetro al comenzar y al terminar el programa de las observaciones para comprobar que el error medio cuadrático de las mediciones se hallaba dentro del permisible (0,2 dB). Para posicionar el instrumento se empleó un trípode a 1,2 m del suelo. Entre el eje longitudinal del instrumento de medición y la horizontal se mantuvo un ángulo vertical comprendido aproximadamente entre 15 y 25 grados sexagesimales. Las mediciones exteriores fueron ejecutadas en ausencia de precipitaciones o pavimento mojado y con valores promedio para la velocidad del viento de 1,6 m/s.

Para la validación de estos resultados se tomó como población la cantidad total de puntos generados y la selección de la muestra se realizó mediante un muestreo aleatorio simple. En total se crearon 35.749 puntos receptores, a una distancia de 10 metros entre ellos, a 0.1 metros alrededor de cada manzana y asumiéndolas como totalmente construidas.

El cálculo del tamaño de la muestra se desarrolló a partir del análisis de medias en poblaciones finitas, con lo que se obtuvo un total de 681 puntos de comprobación, garantizando que el error medio cuadrático muestral caracterizara con un 95% de confianza el error medio cuadrático de la población.

Para hacer la selección aleatoria de los puntos de la muestra, se empleó la herramienta de Extracción Aleatoria del complemento de Procesamiento de QGIS.

MODELADO GEOESPACIAL DE LA VULNERABILIDAD ANTE LA CONTAMINACIÓN SONORA URBANA POR TRÁFICO RODADO MEDIANTE EEMC

La Evaluación Multicriterio EMC se puede entender como:

Un mundo de conceptos, aproximaciones, modelos y métodos, para auxiliar a los centros decisores a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar objetos, en base a una evaluación (expresada por puntuaciones, valores o intensidades de preferencia) de acuerdo a varios criterios. (Coloson y de Bruyn, 1989).

Mientras que la EEMC “es uno de los métodos de mayor importancia en el interior de los procedimientos de análisis espacial” (Fuenzalida *et al.*, 2015). Según Rodríguez-Hernández (2013), en Cuba las principales incursiones en las tareas de EEMC empleando plataformas SIG se han visto orientadas a la gestión de riesgos con altos niveles de recurrencia. La EEMC aplicada al cálculo de la vulnerabilidad ante la contaminación sonora, considera las variables siguientes, que fueron seleccionadas mediante el método de criterio de expertos mediante la utilización del Proceso de Jerarquías Analíticas (AHP por sus siglas en inglés), expuesto en Saaty (1990, 2008):

- Densidad de población por manzana (habitantes por metros cuadrados).
- Densidad de población infantil (0-15 años) por manzana (habitantes por metros cuadrados).

- Densidad de población anciana (mayor a 60 años) por manzana (habitantes por metros cuadrados).
- Cantidad de instituciones de salud (unidades).
- Cantidad de instituciones de educación (unidades).
- Cantidad de instituciones científico-técnicas (unidades).
- Cantidad de otras instituciones de interés (unidades).

La aplicación de la EEMC, se complementó con el AHP. Aplicando este método se construye un modelo cuyos resultados fueron procesados en un entorno SIG. Se obtiene, en primera instancia, la jerarquización y los pesos en cada uno de los criterios o variables y subcriterios o clases, materializados en capas de formato vectorial. Al procesar esta información, de acuerdo al modelo, se obtiene la superposición ponderada de variables ofreciendo una visión geoespacial de la vulnerabilidad ante la contaminación sonora en la zona de estudio. Se debe señalar que el presente estudio realizó la selección de las variables mediante el criterio de expertos con la utilización del AHP, por su amplia presencia en investigaciones documentadas (Díaz-Ferrer *et al.*, 2020).

Dada la existencia de varios criterios con distintos grados de importancia y el propósito de alcanzar un mapa de síntesis que refleje la suma ponderada de dichas variables y que por tanto ofrezca una visión acertada del panorama de vulnerabilidad ante la contaminación sonora en la zona de estudio, se empleó el método de suma lineal ponderada:

$$S = \sum_{i=1}^n P_{wi} * M_i$$

Donde:

- S: Suma de valores para obtener la vulnerabilidad general.
- P_{wi} : Peso ponderado de cada criterio i.
- M_i Valor de cada criterio i.

De esta manera, se obtuvo un valor de vulnerabilidad a partir de un enfoque multicriterio de los elementos que la caracterizan, en cada una de las unidades espaciales de análisis. Los valores de vulnerabilidad fueron normalizados a una escala de medición entre una y 10 unidades para hacerlos operables mediante álgebra de mapas con los niveles de peligro.

MODELADO GEOESPACIAL DEL RIESGO ANTE LA CONTAMINACIÓN SONORA URBANA POR TRÁFICO RODADO

El riesgo es la probabilidad de que el desastre suceda como consecuencia de la combinación de las amenazas con las condiciones de vulnerabilidad; puede ser estimado por el probable número y características de pérdidas humanas, heridos, propiedades dañadas e interrupción de actividades económicas que podría producirse luego de un desastre (Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil, 2016). Teóricamente, el riesgo (R) es el producto del peligro (P) o amenaza por la vulnerabilidad (V):

$$R = P * V$$

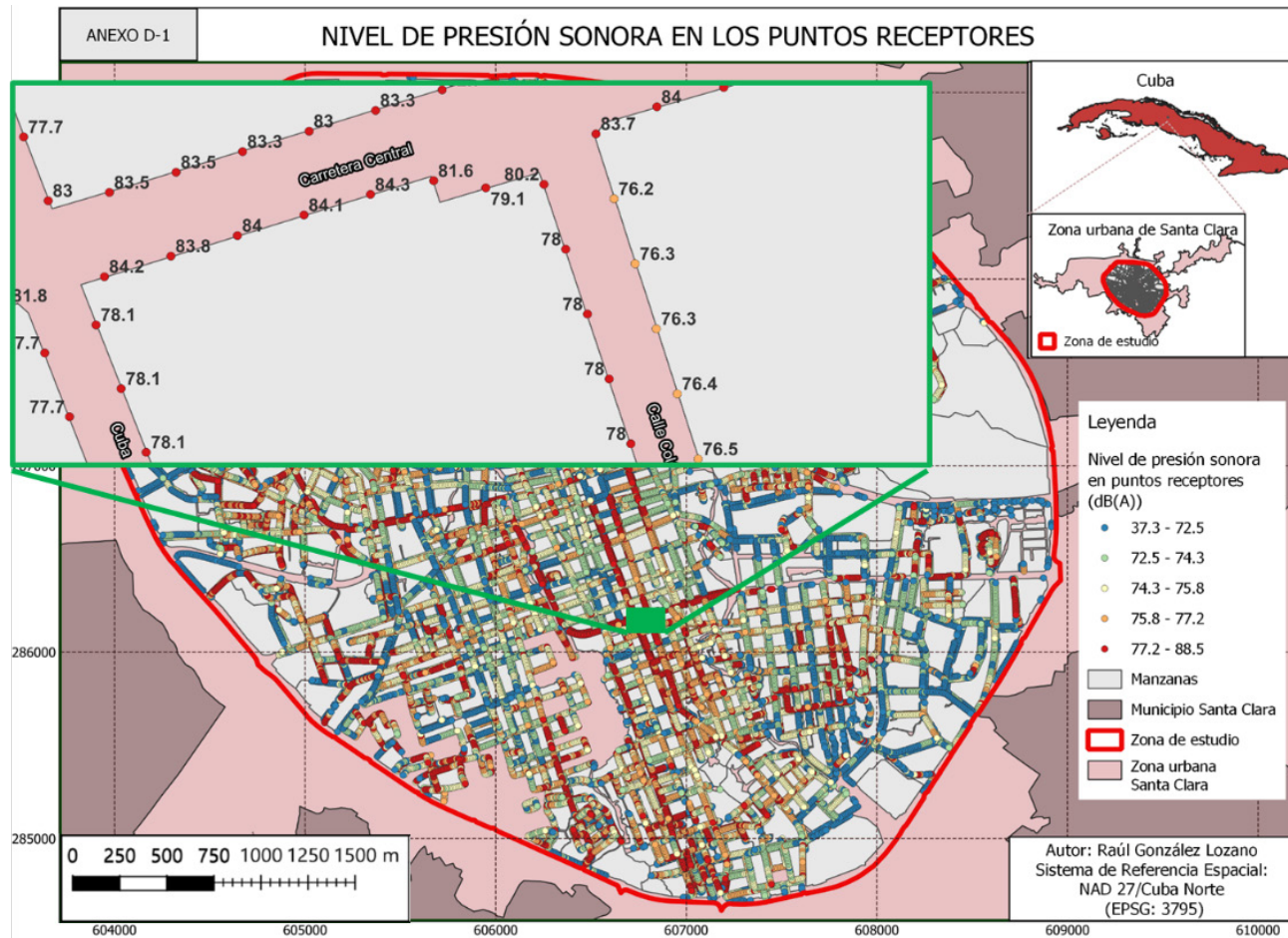
Una vez que se obtuvo el modelado geoespacial de la contaminación sonora y se asignaron niveles de vulnerabilidad a las unidades espaciales de análisis (manzanas), fue posible calcular el riesgo mediante la operación de multiplicación de estos dos factores. Así se obtuvo el mapa de riesgo ante la contaminación sonora en la zona de estudio. Para ello se consideraron los contornos areales de las estructuras político-administrativas disponibles dentro de los datos geoespaciales fundamentales de partida.

Resultados

El cálculo de los niveles sonoros en cada punto receptor a partir de la metodología desarrollada se realizó en cada uno de los puntos receptores presentes en la zona de estudio (35.749 puntos totales). Una vista detallada de algunos elementos de la base de datos geoespacial de los puntos receptores, con los niveles de ruido calculados, se muestra en la Figura 4.

La norma de referencia establece los niveles máximos admisibles y tolerables (NMA y NT respectivamente) en zonas habitables, tanto en el interior de la vivienda como en las áreas urbanizadas aledañas. De acuerdo con los límites establecidos en dicha norma, el valor del NT, en el período diurno para áreas urbanizadas estables, producido por el tráfico rodado es de 68 *dba*. Por concepto de área se puede plantear que aproximadamente el 87% de la zona de estudio se encuentra bajo un ambiente contaminado acústicamente. Para mostrar este resultado se calcula el exceso del nivel de presión sonora existente respecto al valor del NT (Figura 5).

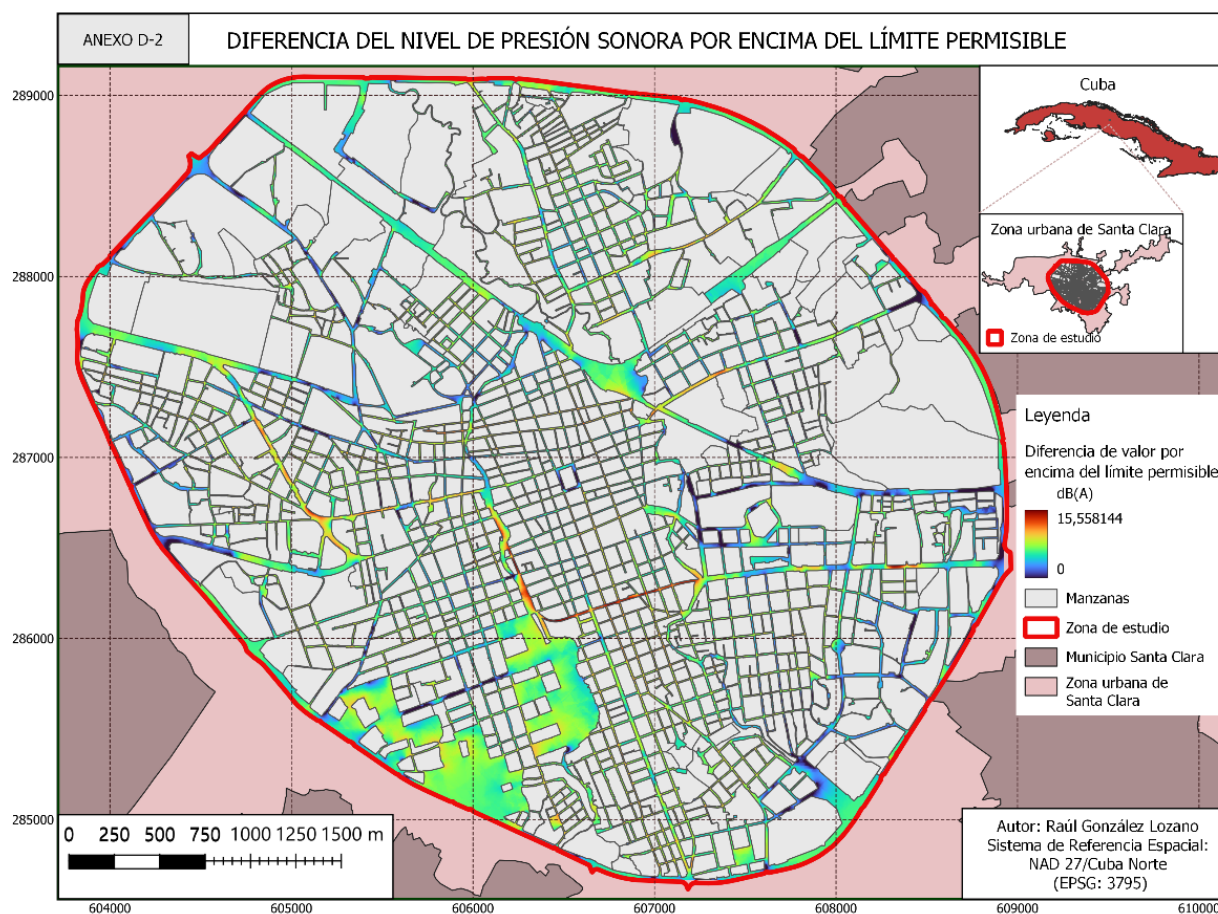
Figura 4.
Cálculo del $L_{(eq,A)}$ en una red de puntos receptores creada a efectos del modelado.



Fuente: González-Lozano (2023).

Figura 5.

Mapa que muestra el valor en el que se supera el nivel tolerable establecido por la norma de referencia.



Fuente: González-Lozano (2023).

Para la evaluación de la calidad de la predicción se calculó el error medio cuadrático:

$$emc = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}$$

Donde:

- x_i : valor del dato (observación) i .
- y_i : *valor real que corresponde a la observación i .*
- n : número total de datos (observaciones).

El resultado obtenido fue de ± 2.76 dB, el cual está en el rango de los ± 3 dB propuesto por la norma de referencia.

En la Tabla 2 se observa un extracto de los resultados obtenidos durante la validación y el valor calculado de Error Medio Cuadrático y Desviación Estándar. La nomenclatura asignada a las columnas se explica a continuación:

- ID: Identificador único del punto de predicción.
- ID_CONSTRUCCION: Identificador único de la construcción a la cual se asocia el punto de predicción.
- PREDICHO: valor de la predicción del $L_{eq,A}$ en el punto.
- MEDIDO: valor de la medición directa del $L_{eq,A}$ en el punto.
- DIFERENCIA: diferencia entre el valor de $L_{eq,A}$ predicho y el medido.

Tabla 2.

Muestra de los valores medidos y predichos en los puntos de observación.

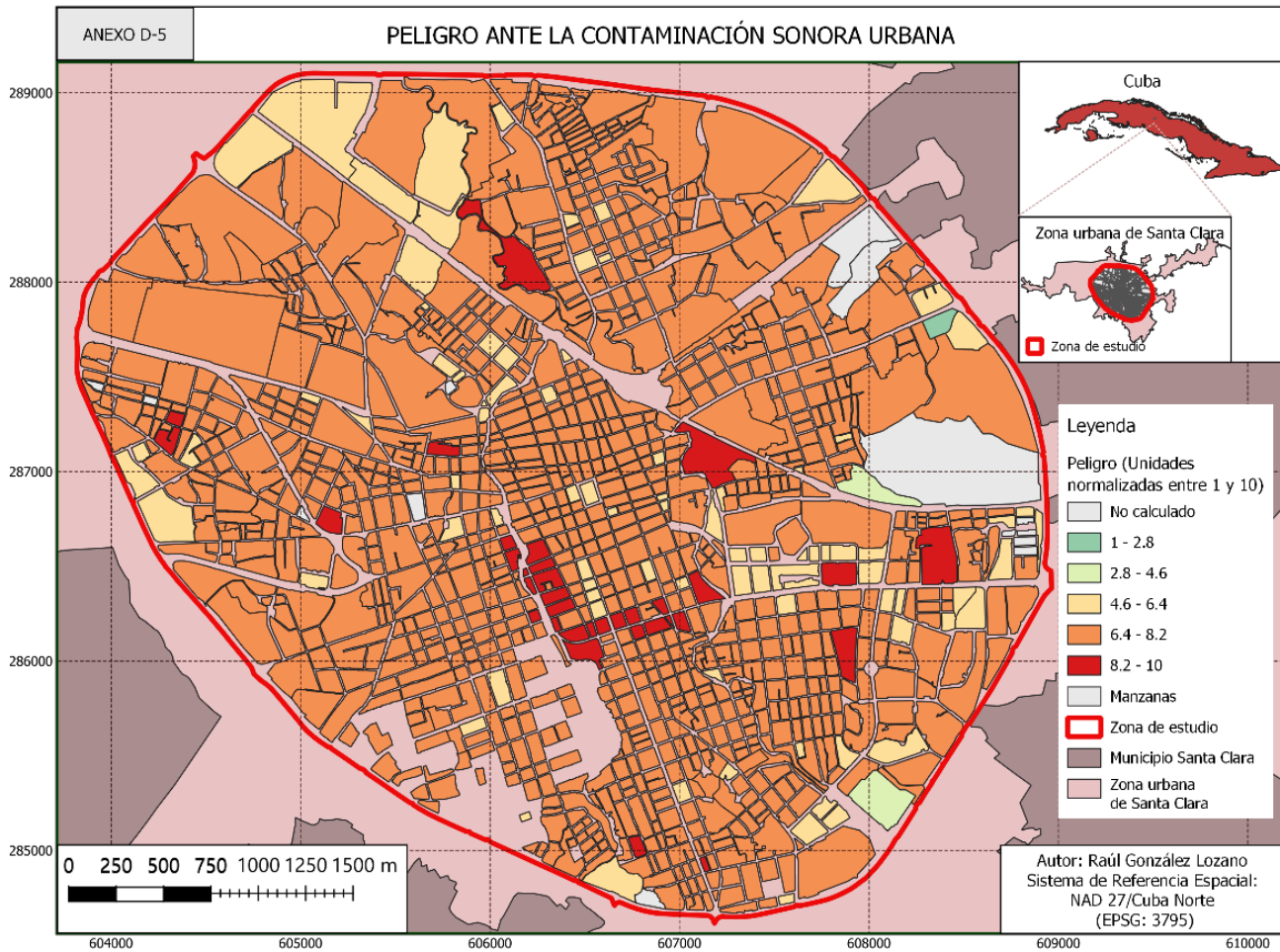
Id	Id_Construccion	Predicho $L_{eq,A}$	Medido $L_{eq,A}$	Diferencia
...
147	2	74.0	77.0	3.0
241	3	77.0	78.1	1.1
282	4	76.6	79.8	3.2
322	4	78.1	77.5	-0.6
448	7	85.0	86.2	1.2
612	10	76.0	74.0	-2.0
743	13	75.1	72.7	-2.4
1090	26	72.4	68.6	-3.8
1142	27	69.3	67.9	-1.4
...
Error medio cuadrático		Desviación estándar de las predicciones		
±2.8		±3.7		

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se calcularon los $L_{(eq,A)}$, con el método de modelado geoespacial desarrollado en el presente estudio, se asignaron los valores correspondientes a los objetos de la capa de construcciones y mediante un proceso de reclasificación se obtuvo el mapa de peligro (Figura 6).

En el mapa elaborado se observa una manzana con valores de peligro comprendidos entre una y 2.8 unidades, dos manzanas con valores entre 2.8 y 4.6 unidades, 87 manzanas con valores entre 4.6 y 6.4 unidades, 991 manzanas entre 6.4 y 8.2 y 34 manzanas con valores entre 8.2 y 10 unidades.

Figura 6.
Mapa de peligro por contaminación sonora en la zona de estudio.



Fuente: González-Lozano (2023).

En el cálculo de la vulnerabilidad general ante la contaminación sonora, de acuerdo con la metodología planteada en el presente estudio, mediante la aplicación del método AHP se obtuvo, en primer lugar, la matriz de importancia relativa de cada uno de los criterios seleccionados. En la Tabla 3 se observa este resultado.

Tabla 3.

Matriz de importancia relativa de cada uno de los criterios empleados en el análisis de la vulnerabilidad.

	1	2	3	4	5	6	7	Suma	Pesos	Pesos *suma
1	1.000	0.840	1.139	0.926	1.040	0.820	1.005	6.769	0.137	0.930
2	1.190	1.000	1.250	1.042	1.075	0.952	1.058	7.568	0.154	1.162
3	0.878	0.800	1.000	0.847	0.990	0.775	0.976	6.266	0.127	0.797
4	1.080	0.960	1.180	1.000	1.042	0.901	1.026	7.188	0.146	1.049
5		0.930	1.010	0.960	1.000	0.893	0.995	6.750	0.137	0.925
6	1.220	1.050	1.290	1.110	1.120	1.000	0.995	7.785	0.158	1.230
7	0.995	0.945	1.025	0.975	1.005	1.005	1.000	6.950	0.141	0.980
SUMA	7.325	6.525	7.894	6.860	7.272	6.346	7.055	49.276	1.000	7.072
N	7					\wedge (LAMBDA)	IC	RC		
IR	1.3200					7.0723	0.0121	0.0091		
Leyenda										
1	Instituciones docentes en la zona de estudio (id)									
2	Instituciones de salud en la zona de estudio (is)									
3	Otras instituciones de interés en la zona de estudio (oi)									
4	Instituciones científico-técnicas en la zona de estudio (ict)									
5	Densidad de niños en la zona de estudio (dn)									
6	Densidad de población total en la zona de estudio (dp)									
7	Densidad de adultos mayores en la zona de estudio (da)									

Fuente: González-Lozano (2023).

Con los pesos de cada uno de los criterios se realizó la suma lineal ponderada en cada una de las unidades de análisis mediante la siguiente ecuación:

$$S = 0.158*DP + 0.137*DN + 0.141*DA + 0.154*IS + 0.137*ID + 0.146*ICT + 0.127*OI$$

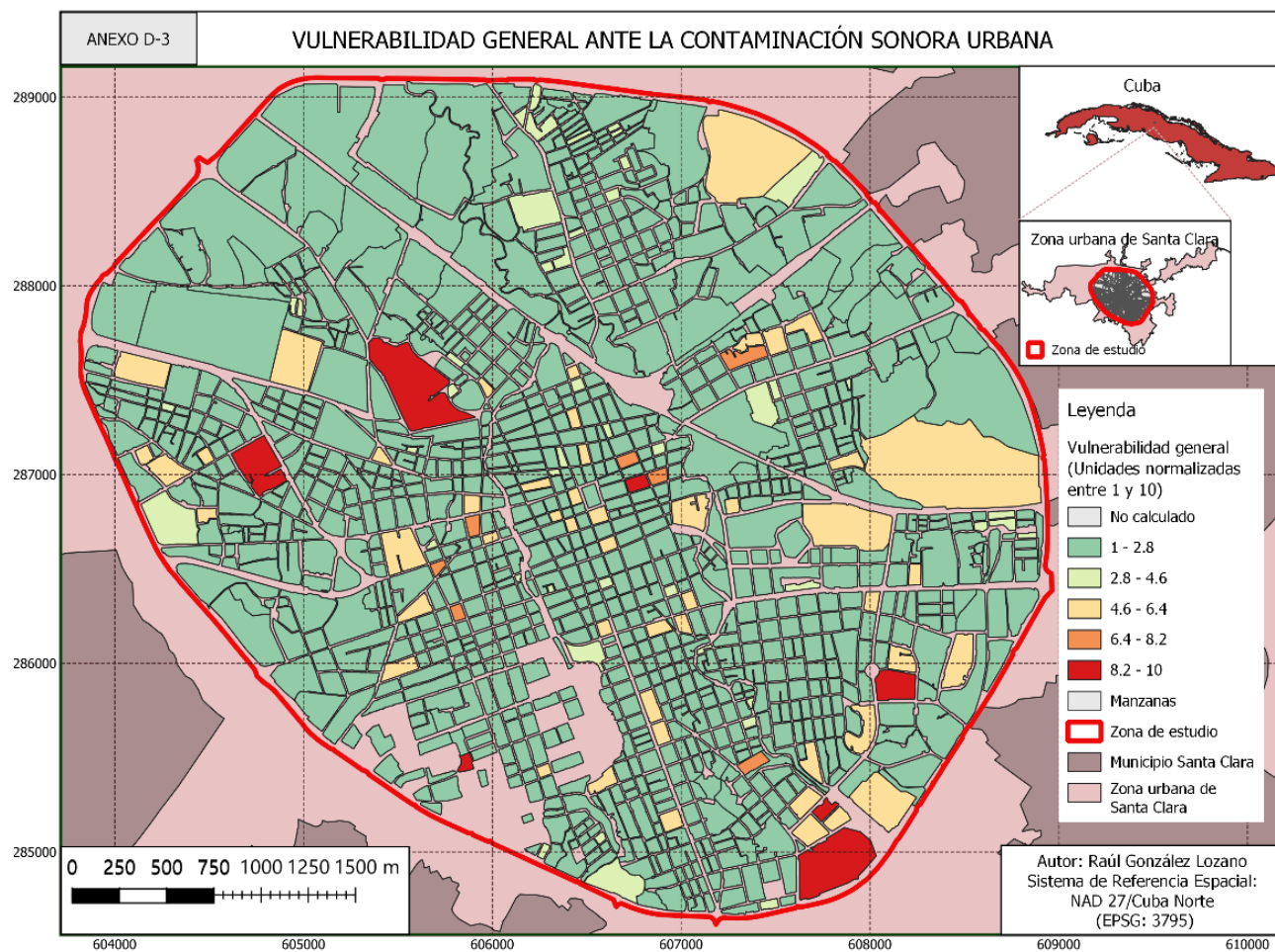
Posterior al cálculo de la vulnerabilidad por unidad espacial de análisis, se realizó una reclasificación en cinco clases obteniéndose el mapa de vulnerabilidad general (Figura 7). Se muestra un total de 1018 manzanas con niveles de vulnerabilidad comprendidos entre 1 y 2.8 unidades, 46 manzanas con valores entre 2.8 y 4.6 unidades, 51 manzanas con valores entre 4.6 y 6.4 unidades, siete manzanas entre 6.4 y 8.2 y otras siete manzanas con valores entre 8.2 y 10 unidades. Se aprecia que los mayores niveles de vulnerabilidad se agrupan en el sector comprendido entre el extremo oeste, el centro y el extremo sur de la zona de estudio. Este hecho responde a la alta concentración de centros sanitarios y docentes existentes, así como a la presencia de las manzanas con mayor densidad de población en el área de estudio.

Finalmente, a través de la combinación del peligro existente en cada unidad espacial de análisis y la vulnerabilidad en dichas unidades se obtuvo el mapa de riesgo ante la contaminación sonora por tráfico rodado en la zona de estudio (Figura 8).

Como información relevante se observa un agrupamiento de las manzanas con alto riesgo por contaminación sonora alrededor de la carretera Central. Este hecho está dado por los altos niveles de ruido producido por esta vía urbana. De manera general, la afectación mayor se presenta en el sector comprendido entre el oeste y el sur de la zona de estudio. En esta área se concentra una gran cantidad de instituciones altamente vulnerables (centros sanitarios, centros docentes, etc.) que, en conjugación con los altos niveles de ruido característicos en la zona de estudio, favorecen la existencia de manzanas con altos niveles de riesgos en el sector.

Figura 7.

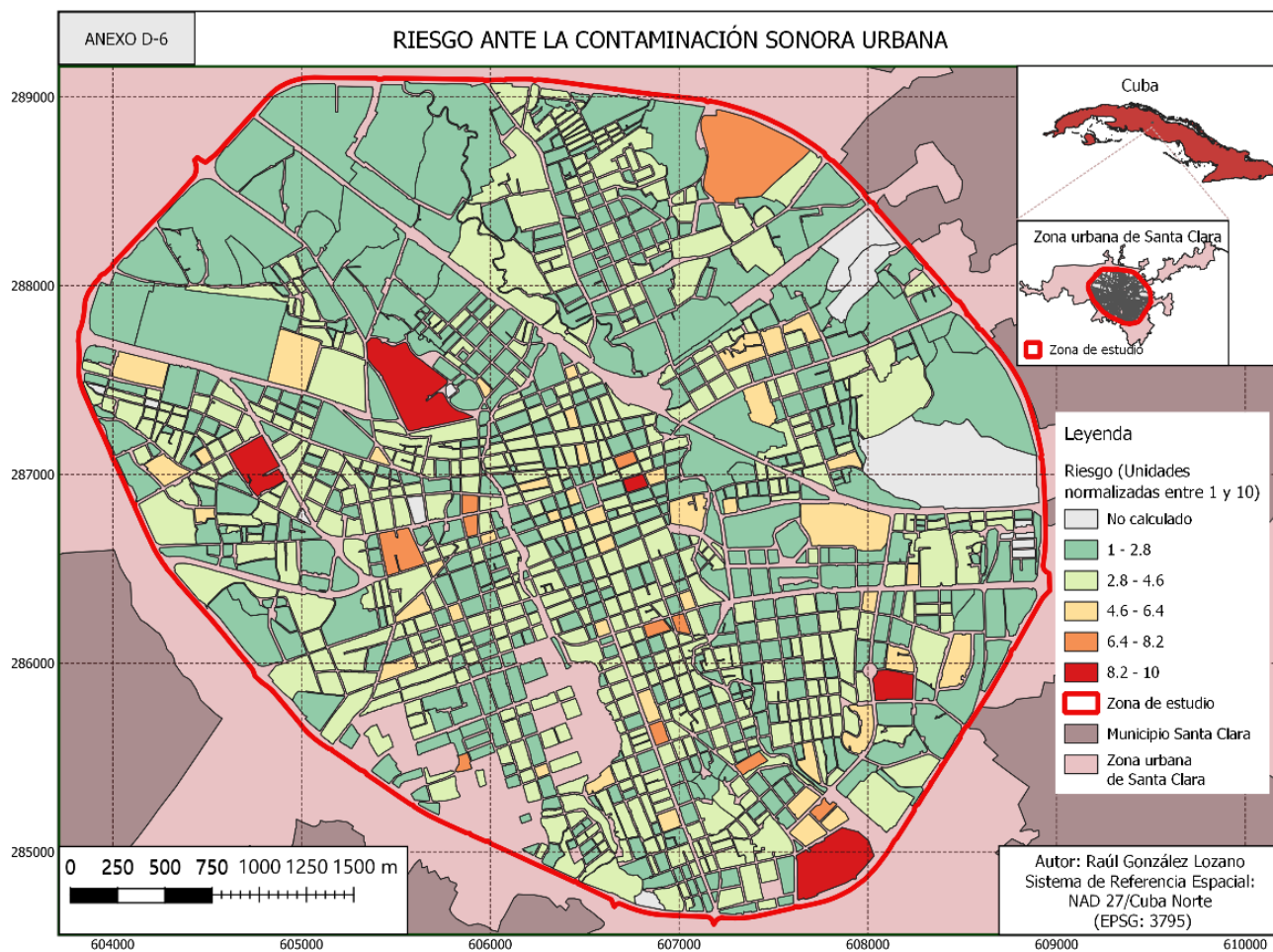
Mapa de vulnerabilidad general ante contaminación sonora en la zona de estudio.



Fuente: González-Lozano (2023).

Figura 8.

Mapa de riesgo por contaminación sonora en la zona de estudio.



Fuente: González-Lozano (2023).

Discusión

En el contexto del presente estudio, se utiliza la definición de modelado geoespacial de González-Lozano (2023) como una abstracción para explicar un fenómeno de la realidad, en este caso el ruido, considerando una dependencia principal de los elementos del espacio geográfico y cuyo marco referencial espacial es un sistema de coordenadas geocéntrico o topocéntrico. Estos elementos del espacio geográfico son, en muchas ocasiones, los objetos que se modelan; en otras, son elementos que dictan las reglas del modelado, subordinadas a alguna relación funcional con el objeto a modelar. Mediante la aplicación de la definición anterior en el presente trabajo se evidenció el rebasamiento del Nivel Tolerable del ruido para áreas urbanizadas estables señalado en la norma de referencia (68dBA) en gran parte del área que comprende la zona de estudio. Este resultado cuantitativo se corresponde con valoraciones realizadas en estudios que abordan esta problemática territorial, como en Armenteros (2011), donde se afirma que aproximadamente el 50% de las quejas de la población que se reciben en las instituciones ambientales de la ciudad están vinculadas directamente a la problemática del ruido. En referencia a lo anterior, también en investigaciones realizadas por Díaz Remond (2012) y Salameh (2010) se concluye que la zona de estudio se encuentra acústicamente comprometida por la presencia de elevados niveles de ruido a lo largo de sus principales ejes viales. La exactitud de las predicciones realizadas se encuentra comprendida en el rango de los $\pm 3dB$ exigidos por la norma de referencia en el presente estudio. A pesar del valor anterior, se debe observar en cada estudio la precisión de los resultados de la predicción en aras de contribuir a minimizar errores en la determinación final del riesgo. A efectos prácticos de la presente investigación, el proceso de normalización reduce considerablemente el margen de influencia del error al existir un escalamiento proporcional de los valores y ser este pequeño en comparación con los niveles de ruido existentes en la zona de estudio. El cumplimiento de las exigencias de exactitud en la predicción es un requisito fundamental para una adecuada asignación del peligro a las unidades espaciales de análisis. En la literatura revisada respecto al tema se observan varios estudios (Asensio *et al.*, 2021; Batura y Waligórski, 2021; Cárdenas Torres, 2021; Chappa, 2021; Faulkner y Murphy, 2022; Haro Mendoza, 2021; Iglesias Merchan *et al.*, 2021; Inga Lazón y Rojas Alva, 2021; Marín-Mamani *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2020) que hacen un acercamiento a la temática del ruido desde el punto de vista predictivo, sin abordar la perspectiva del riesgo como un concepto aglutinador del peligro estudiado y la distribución espacial de las particularidades socioeconómicas de la zona de estudio. El análisis de la vulnerabilidad general se enfocó a través de la utilización de la metodología de EEMC mediante la aplicación del AHP y una selección de variables basada en criterios de expertos. Lo anterior permitió la selección de siete criterios de perspectivas socioeconómicas, que fueron organizados jerárquicamente según la opinión de los expertos. Esto permitió la determinación de la vulnerabilidad general, a partir de los criterios aplicados, en cada una de las unidades espaciales de análisis, estableciendo la caracterización de las locaciones en dependencia de las particularidades y circunstancias que las hacen susceptibles a los efectos dañinos de la contaminación acústica por tráfico rodado.

El modelado geoespacial del peligro y de la vulnerabilidad permitió obtener un índice de riesgo ante la contaminación sonora urbana por tráfico rodado en cada una de las unidades espaciales de análisis de la zona de estudio. Este resultado permite realizar un proceso de análisis multidisciplinario para la aplicación de medidas efectivas, desde el punto de vista del peligro y la vulnerabilidad, para la reducción de las causas y condiciones que alimentan los efectos adversos de la contaminación sonora urbana por tráfico rodado en la ciudad de Santa Clara.

Conclusiones

La contaminación sonora, especialmente la originada por el tráfico rodado, es un problema acuciante dentro de la realidad ambiental de la mayoría de las urbes del mundo. A dicha realidad no escapa Cuba, cuya situación se agrava por la presencia de condiciones como un parque automotor envejecido, el desconocimiento general sobre las causas y consecuencias de este tipo de contaminación, el escaso tratamiento jurídico de la problemática y la insuficiente atención del asunto por parte de la colectividad científica del país.

El modelado geoespacial de la contaminación sonora urbana por tráfico rodado mostró la existencia de un clima acústico altamente comprometido en la zona interna a la carretera Circunvalación de la ciudad de Santa Clara, con valores que exceden el Nivel Máximo Admisible y el Nivel Tolerable exigidos por la norma de referencia. La obtención del nivel de presión sonora se realizó mediante la aplicación de algoritmos geoespaciales soportados en un SIG y su validez fue contrastada a partir del desarrollo de mediciones directas en campo, obteniéndose un error medio cuadrático inferior a los $\pm 3dB$. Estos resultados permitieron realizar una asignación y reclasificación del peligro por contaminación sonora en cada una de las unidades espaciales de análisis.

La aplicación de la EEMC para el cálculo de la vulnerabilidad general ante la contaminación sonora urbana por tráfico rodado garantizó una concepción multifactorial de esta dimensión del análisis. Se observaron los mayores niveles de vulnerabilidad en la zona central y periférica del estudio, donde se concentran las mayores densidades de los distintos estratos poblacionales y la mayor cantidad de entidades catalogadas de vulnerables, respectivamente. Los criterios empleados respondieron a aspectos socioeconómicos de interés, los cuales fueron establecidos y jerarquizados a partir del criterio de expertos previamente validados. No obstante, se adecúan efectivamente a la realidad local de la zona de estudio, por lo que una posible línea de trabajo sería la contrastación en diferentes contextos geográficos, económicos y sociales de los resultados de esta investigación en aras de lograr descriptores estandarizados de los diferentes enfoques de la vulnerabilidad ante la contaminación sonora urbana por tráfico rodado.

El cálculo del riesgo por contaminación sonora permitió una concepción aglutinadora de la contaminación bajo estudio y de su impacto en función de los niveles de vulnerabilidad en las zonas donde incide este fenómeno. A la luz de los resultados obtenidos se apreció la existencia de unidades espaciales de análisis de alto riesgo concentradas alrededor de la carretera Central y, de manera general, en el sector comprendido entre el oeste y el sur de la zona de estudio. La novedad del marco propuesto radica en la perspectiva que ofrece sobre la consideración de una adecuada determinación del peligro y la vulnerabilidad para mejorar la eficacia en el enfrentamiento al problema de la contaminación acústica.

Referencias bibliográficas

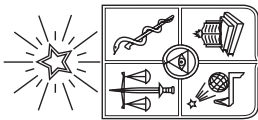
- Agudelo, Ó. A., Marín, C. M., y García, P. G. (2020). Condiciones de tránsito vehicular y uso de un modelo para la predicción de ruido por tráfico rodado en un entorno local de la ciudad de Bogotá-Colombia. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*.
- Alsina-Pagès, R. M., Orga, F., Alías, F., y Socoró, J. C. (2019). Awsn-based suburban dataset for anomalous noise event detection on dynamic road-traffic noise mapping. *Sensors*, 19(11). <https://doi.org/10.3390/s19112480>
- Armenteros, Y. Q. (2011). El ruido también contamina. *Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo*, 11(21).
- Asensio, C., Pavón, I., Ramos, C., López, J. M., Pamiés, Y., Moreno, D., y de Arcas, G. (2021). Estimation of the noise emissions generated by a single vehicle while driving. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 95, 102865. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102865>
- Barceló Pérez, C., Bousa Alonso, O., González Sánchez, Y., Robles Leonard, A., Escobar Rojas, V., y López Alayón, J. (2015). *Caracterización del nivel sonoro del tráfico en las ciudades de La Habana. Pinar del Río y Santiago de Cuba. 2013 – 14*. Convención Internacional de Salud. Cuba Salud 2015.
- Barceló Pérez, C. y González Sánchez, Y. (2018). Sonidos urbanos inusuales en una vecindad al oeste de la ciudad de La Habana. *Revista Cubana de Salud Pública*, 44(3).
- Bastián Monarca, N., Álvarez Rodenbeek, J. P., Suárez Silva, E., y Báez Montenegro, A. (2015). *Elección de un modelo de ruido de tránsito vehicular para Chile* [ponencia]. Tecniacústica 46° Congreso Español de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica European Symposium on Virtual Acoustics and Ambisonics.
- Bastián-Monarca, N. A., Suárez, E., y Arenas, J. P. (2016). Assessment of methods for simplified traffic noise mapping of small cities: Casework of the city of Valdivia, Chile. *Science of The Total Environment*, 550, 439-448. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.139>
- Batura, K. P., y Waligórski, M. (2021). Methodological basis of road acoustic researches. *Combustion Engines*, 185. <https://doi.org/10.19206/CE-139159>
- Berglund, B., Lindvall, T., y Schwela, D. H. (1999). *Guidelines for community noise*. WHO.
- Besnard, F., Hamet, J.-F., Lelong, J., Duc, E. L., Guizard, V., Fürst, N., Doisy, S., y Dutilleux, G. (2009). *Road noise prediction - 1 calculating sound emissions from road traffi*. Sétra.

- Betancourt Morffis, U. y Almeda Barrios, Y. (2022). Elaboración de mapas de ruido en el centro histórico de la ciudad de Matanzas, Cuba. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 37(2), 677-717. <https://doi.org/10.24201/edu.v37i2.2026>
- Bravo Moncayo, L. (2017). *Valoración económica contingente del ruido de tráfico rodado mediante redes neuronales artificiales* [Tesis de doctorado]. Universidad Politécnica de Madrid, España. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.47146>
- Bravo-Moncayo, L., Chávez, M., Puyan, V., Lucio-Naranjo, J., Garzón, C., y Pavón-García, I. (2019). A cost-effective approach to the evaluation of traffic noise exposure in the city of Quito, Ecuador. *Case Studies on Transport Policy*, 7(1), 128-137. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2018.12.006>
- Buhaug, H., y Urdal, H. (2013). An urbanization bomb? Population growth and social disorder in cities. *Global Environmental Change*, 23(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.016>
- Cárdenas Torres, F. O. (2021). *Contaminación sonora en la zona urbana del distrito de Chulucanas, provincia de Morropón, región Piura, año 2020* [Tesis Ingeniero Ambiental]. Universidad Católica Sedes Sapientiae, Perú.
- Chappa, A. R. (2021). Evaluación de los niveles sonoros generados por el parque automotor en el centro urbano, Chachapoyas, Perú. *Revista de Investigación Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 4(1), 25-29. <https://doi.org/10.25127/ucni.v4i1.692>
- Clark, C., y Paunovic, K. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European region: A systematic review on environmental noise and quality of life, wellbeing and mental health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11). <https://doi.org/10.3390/ijerph15112400>
- Coloson, G. y de Bruyn, C. (1989). *Models and methods in multiple criteria decision making*. Pergamon.
- Díaz-Ferrer, Y., Cruz-Ramírez, M., Pérez-Pravia, M. C., y Ortiz-Cárdenas, T. (2020). El método criterio de expertos en las investigaciones educacionales: visión desde una muestra de tesis doctorales. *Revista Cubana de Educación Superior*, 39(1).
- Díaz Remond, J. M. (2012). *Diagnóstico y modelación tridimensional de la relación zona residencial – microclima acústico. Caso de estudio “Reparto Escambray”* [Trabajo de Diploma]. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Cuba.
- Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil. (2016). *Guía metodológica para la organización del proceso de reducción de desastres y procedimientos para evaluar el nivel de reducción de la vulnerabilidad y el riesgo en los organismos, entidades y territorios*. Autor.
- Fajardo-Segarra, A. F., y Mateus-Lucas, C. (2017). Incidencia del ruido producido por el transporte automotor en áreas de valor patrimonial: avenida Jesús Menéndez. *Ciencia en su PC*, (3), 81-90.
- Faulkner, J.-P. y Murphy, E. (2022). Road traffic noise modelling and population exposure estimation using crossovers: Insights from Ireland. *Applied Acoustics*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108692>
- Fernando, P. D. L. (2021). *Revisión de la normativa legal y técnica sobre la gestión de ruido ambiental de países latinoamericanos, Estados Unidos y España*. Universidad Central del Ecuador.
- Fuenzalida, M., Buzai, G. D., Moreno Jiménez, A., y García de León, A. (2015). *Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones*. Triángulo.
- González-Lozano, R. (2023). *Método para el modelado geoespacial de la contaminación sonora urbana por tráfico rodado* [Tesis doctoral]. Universidad Tecnológica Militar José Martí, Cuba.
- González-Lozano, R., y 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*, 3(2).

- Haro Mendoza, P. A. (2021). *Análisis del modelo estadístico predictivo de ruido ambiental urbano a partir del método lineal y multivariante en el sector norte de Quito de Coral y et al para su validación en 2021* [Tesis ingeniería ambiental]. Universidad Internacional SEK, Ecuador.
- Iglesias Merchan, C., Laborda Somolinos, R., González Ávila, S., y Elena Rosselló, R. (2021). Spatio-temporal changes of road traffic noise pollution at ecoregional scale. *Environmental Pollution*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117291>
- Inga Lazón, R. M. y Rojas Alva, R. D. M. (2021). *Mapa de ruido ambiental entre la avenida Miraflores y la avenida Manuel Prado en el distrito de Carabaylo, provincia y departamento de Lima- 2021* [Tesis Ingeniería Ambiental]. Universidad César Vallejo, Perú.
- Marín-Mamani, G., Marín-Paucara, E., Bolívar-Espinoza, N., Enriquez-Mamani, V., y Curro-Pérez, F. (2021). Modelamiento kriging del comportamiento vertical de ruido ambiental mediante mapas temáticos durante festividades culturales en Puno y Juliaca, Perú. *Tecnología en Marcha*, 34(3), 3-14. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.4989>
- Mohsin, M., Abbas, Q., Zhang, J., Ikram, M., e Iqbal, N. (2019). Integrated effect of energy consumption, economic development, and population growth on CO2 based environmental degradation: A case of transport sector. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(32), 32824-32835. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06372-8>
- Münzel, T., Schmidt, F. P., Steven, S., Herzog, J., Daiber, A., y Sørensen, M. (2018). Environmental noise and the cardiovascular system. *Journal of the American College of Cardiology*, 71(6), 688-697. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.12.015>
- Murillo Gómez, D. M. (2017). Resolución espacial en la elaboración de mapas de ruido por interpolación. *Ingenierías USBMed*, 8(1), 56-62. <https://doi.org/10.21500/20275846.2808>
- Neitzel, R. (2018). *Chronic health effects and injury associated with environmental noise pollution* [presentación]. Centers for Disease Control and Prevention.
- Ochoa Villegas, J., Marulanda Orozco, J. S. y Tafur Jiménez, L. A. (2017). Alternativas para la adquisición de datos colaborativos necesarios en la construcción de mapas de ruido de tráfico automotor. *Ingenierías USB-Med*, 8(2). <https://doi.org/10.21500/20275846.2855>
- Oficina Nacional de Normalización. (2012). *Ruidos en zonas habitables-Requisitos higiénicos sanitarios*. NC 26: 2012. Autor.
- Peña Lino, J. L. (2021). *Diseño de red de campus con alta contaminación de ruido en el Parque Centenario de Guayaquil* [Trabajo de titulación]. Universidad de Guayaquil, Ecuador.
- Road noise prediction 2 - Noise propagation computation method including meteorological effects (NMPB 2008). (2009). Sétra.
- Rodríguez-Hernández, S. V. (2013). *Método de evaluación geoespacial multicriterio basada en datos históricos para la gestión del riesgo por ciclones tropicales* [Tesis doctoral]. Instituto Técnico Militar José Martí, Cuba.
- Ruido y salud. (2011). OSMAN.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-i](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-i)
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83. <https://doi.org/10.1504/ijssci.2008.017590>
- Salameh, A. (2010). *La contaminación acústica urbana y su influencia en la calidad del hábitat en la ciudad de Santa Clara* [Trabajo de diploma]. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba.

- Torres Linares, C. (2017). *Estudio ambiental acústico y de iluminación en el hospital provincial docente cardiocentro Ernesto Guevara de Villa Clara* [Trabajo de diploma]. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba.
- Torres Sotolongo, D. E. y Romero Suárez, P. (2014). Procedimiento para la evaluación del ruido ambiental urbano en el municipio de regla (Cuba) utilizando sistemas de información geográfica. *GeoFocus International Review of Geographical Information Science and Technology*, (14).
- World Health Organization Regional Office for Europe. (2018). Environmental noise guidelines for the European Region.
- Zhang, X., Zhao, M., y Dong, R. (2020). Time-series prediction of environmental noise for urban IoT based on long short-term memory recurrent neural network. *Applied Sciences*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/app10031144>

revista invi



Revista INVI es una publicación periódica, editada por el Instituto de la Vivienda de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile, creada en 1986 con el nombre de Boletín INVI. Es una revista académica con cobertura internacional que difunde los avances en el conocimiento sobre la vivienda, el hábitat residencial, los modos de vida y los estudios territoriales. Revista INVI publica contribuciones originales en español, inglés y portugués, privilegiando aquellas que proponen enfoques inter y multidisciplinares y que son resultado de investigaciones con financiamiento y patrocinio institucional. Se busca, con ello, contribuir al desarrollo del conocimiento científico sobre la vivienda, el hábitat y el territorio y aportar al debate público con publicaciones del más alto nivel académico.

Director: Dr. Jorge Larenas Salas, Universidad de Chile, Chile.

Editora: Dra. Mariela Gaete-Reyes Universidad de Chile, Chile.

Editores asociados: Dr. Gabriel Felmer Plominsky, Universidad de Chile, Chile.

Dr. Carlos Lange Valdés, Universidad de Chile, Chile.

Dra. Rebeca Silva Roquefort, Universidad de Chile, Chile.

Mg. Juan Pablo Urrutia, Universidad de Chile, Chile.

Editor de sección Entrevista: Dr. Luis Campos Medina, Universidad de Chile, Chile.

Coordinadora editorial: Sandra Rivera Mena, Universidad de Chile, Chile.

Asistente editorial: Katia Venegas Fonca, Universidad de Chile, Chile.

Traductor: Jose Molina Kock, Chile.

Diagramación: Ingrid Rivas, Chile.

Corrección de estilo: Leonardo Reyes Verdugo, Chile.

COMITÉ EDITORIAL:

Dr. Victor Delgadillo, Universidad Autónoma de la Ciudad de México, México.

Dra. María Mercedes Di Virgilio, CONICET/ IIGG, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Dra. Irene Molina, Uppsala Universitet, Suecia.

Dr. Gonzalo Lautaro Ojeda Ledesma, Universidad de Valparaíso, Chile.

Dra. Suzana Pasternak, Universidade de São Paulo, Brasil.

Dr. Javier Ruiz Sánchez, Universidad Politécnica de Madrid, España.

Dra. Elke Schlack Fuhrmann, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.

Dr. Carlos Alberto Torres Tovar, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Sitio web: <http://www.revistainvi.uchile.cl/>

Correo electrónico: revistainvi@uchilefau.cl

Licencia de este artículo: Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-SA 4.0)