

Diseño y construcción de mapas acústicos por medición: una metodología aplicada a Uruguay

Design and construction of acoustic maps by measurements: a methodology for Uruguay

Desenho e construção de mapas acústicos por medição: uma metodologia aplicada ao Uruguai

Alice Elizabeth González

DIA-IMFIA, Facultad de Ingeniería, UdelaR

Correo de contacto: elizabet@fng.edu.uy

Este artículo está basado en la conferencia dictada por la autora en el Ciclo de Conferencias de la Federación Iberoamericana de Acústica FIA 2024.

Resumen

Uruguay es un pequeño país de América Latina, con unos 3.400.000 habitantes. Su legislación ambiental aún está incompleta; por ejemplo, no existe una regulación nacional sobre ruido sino sólo Ordenanzas departamentales en cada uno de sus 19 Departamentos. Si bien es sabido que son muy buenas herramientas de gestión, los mapas de ruido no son obligatorios en Uruguay. El Grupo de Investigación en Ruido Ambiental de la Universidad de la República ha desarrollado un proyecto de investigación que busca la mejor metodología práctica para construir mapas de ruido a través de mediciones manuales. El trabajo de campo incluyó la determinación del tiempo de estabilización de mediciones de ruido, la comparación entre mediciones de largo y corto tiempo, la comparación entre mediciones tomadas a 1,20 m y 3,50 m, y la obtención de una curva nacional de personas altamente molestas (% HA) con base en mediciones de campo y encuestas de opinión simultáneas realizadas en sitio. En este artículo se presentan los resultados de estos trabajos y la metodología propuesta para la construcción de mapas de ruido en Uruguay.

Palabras clave: mapas acústicos, mediciones acústicas, tiempo de estabilización, altura de medición, %HA

Abstract

Uruguay is a small country in Latin America, with around 3,400,000 inhabitants. Its environmental legislation is still incomplete; for example, there is no national regulation on noise but only departmental Ordinances in each of its 19 Departments. Although it is well-known that they are very good management tools, noise maps are not mandatory in Uruguay. The Research Group on Environmental Noise at Universidad de la República has developed a research project that seeks the best practical methodology to build noise maps through manual measurements. The field work included the determination of the stabilization time of noise measurements, the comparison between long- and short-time measurements, the comparison between measurements taken at 1,20 m and 3,50 m, and the obtention of a national curve of highly annoyed people (%HA) with basis in the field measurements and simultaneous survey carried out on site. In this paper, the results of these works and the proposed methodology for building noise maps in Uruguay are presented.

Keywords: noise maps, noise measurements, stabilization time, measurement height, %HA

Resumo

O Uruguai é um pequeno país da América Latina, com cerca de 3.400.000 habitantes. A sua legislação ambiental ainda está incompleta; por exemplo, não existe regulamentação nacional sobre ruído, mas apenas regulamentos departamentais em cada um dos seus 19 departamentos. Embora se saiba que são ferramentas de gestão muito boas, os mapas de ruído não são obrigatórios no Uruguai. O Grupo de Pesquisa em Ruído Ambiental da Universidade da República desenvolveu um projeto de pesquisa que busca a melhor metodologia prática para construir mapas de ruído através de medições manuais. O trabalho de campo incluiu a determinação do tempo de estabilização das medições de ruído, a comparação entre medições de longo e curto prazo, a comparação entre medições realizadas a 1,20 m e 3,50 m e a obtenção de uma curva nacional de pessoas altamente perturbadas (% HA) com base em medições de campo e levantamento simultâneo de opinião realizado no local. Neste artigo, os resultados destes trabalhos e a metodologia proposta para a construção de mapas de ruído em Uruguai são apresentados.

Palavras-chave: mapas acústicos, medições acústicas, tempo de estabilização, altura de medição, %HA

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de mapas acústicos por medición es una práctica usual en muchos países en los que los datos para implementar una modelación por software no son tan abundantes. En el caso de Uruguay, conocer los coeficientes de absorción de las fachadas o contar con una buena caracterización de sus tipologías demanda un conocimiento detallado del que no se dispone ni aun en las principales ciudades del país, menos aún en ciudades de menor porte. Además, aun cuando se acceda a la realización de mapas acústicos aplicando software, es ineludible la realización de mediciones que permitan ajustar / calibrar los resultados del modelo, para asegurar su validez. Esto, simplemente para reafirmar que las mediciones de niveles de presión sonora siguen siendo necesarias hasta cuando el mapeo se realice a través de software específico para ello.

Asegurar la representatividad de las mediciones implica, entre otras cosas, garantizar que se haya alcanzado el tiempo de estabilización, que la altura de las mediciones esté de acuerdo con el objetivo buscado y que la ecuación que relaciona la densidad de tránsito clasificado con los niveles de presión sonora sea válida en el lugar en que se trabaja. La selección de puntos de medición con miras a identificar / caracterizar áreas homogéneas es también un aspecto muy sensible en la realización de mapas acústicos.

En lo que sigue se presentan los resultados de un proyecto de investigación tendiente a definir una metodología aplicable a la realización de mapas acústicos por mediciones manuales en Uruguay. Para ello, se realizó trabajo de campo en tres ciudades del interior del país y en Montevideo; los datos se procesaron con vistas a obtener diferentes resultados de interés. En las siguientes secciones se presenta un resumen de los resultados obtenidos para los principales aspectos de la metodología. Por último, se presenta ésta con un breve análisis crítico de sus principales limitaciones.

2. TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo realizado se llevó adelante con dos sonómetros de clase 1, un Bruel & Kjaer 2250 y un Casella CEL-63X, ambos con pantalla antiviento y trípode. Ambos registran niveles con escala de ponderación A y en bandas de tercios de octava.

Además, se empleó un mástil para mediciones en altura, de modo de realizar registros simultáneos a dos alturas diferentes.

Se efectuaron mediciones de 12 horas de duración y de 1 hora de duración en las ciudades de Montevideo, Maldonado, Minas y Rocha. En Montevideo se realizaron mediciones de 12 horas en tres puntos de características diferentes. Las ciudades del interior del país son capitales departamentales que se eligieron por su diferente población y perfil socioproductivo. Maldonado (capital del Departamento homónimo), es la segunda ciudad más poblada del interior del país y la que presenta mayor tasa de crecimiento poblacional en todo el país; forma un conurbano con el balneario Punta del Este. Minas es la capital del Departamento de Lavalleja; es una pequeña ciudad en una zona de serranías dedicada principalmente a la forestación, aunque tiene también una presencia industrial significativa en el área de producción de cemento Pórtland y cal. Rocha (capital del Departamento de Rocha) es una pequeña ciudad del Este del país que tiene poca actividad productiva propia -depende del turismo estival en la costa del Departamento- y un decaimiento sostenido en su población.

Simultáneamente, se realizaron sondeos de opinión siguiendo un formulario elaborado previamente. En la Tabla 1 se resumen los principales datos del trabajo realizado.

2.1 Selección de puntos de muestreo

La selección de los puntos de muestreo respondió a criterios diferentes en Montevideo y en las ciudades del interior del país.

En Montevideo, para la realización de las mediciones de 12 horas de duración, se buscaron puntos con diferentes tipologías de calle, edificación, densidad y composición del tránsito. El punto sobre calle Ellauri corresponde a una zona residencial de poder adquisitivo medio alto, es cercano a un colegio de enseñanza primaria y secundaria, el flujo vehicular es relativamente bajo y el pasaje de camiones y autobuses es escaso. El punto sobre Avenida Uruguay se ubica en una calle ancha, con edificaciones antiguas de una sola planta a ambos lados de la calle y alto flujo de autobuses y camiones. El punto sobre Avenida Rivera está en un barrio de clase media y tiene alto flujo de tránsito de todo tipo, desde vehículos livianos a autobuses.

Tabla 1. Resumen del trabajo de campo realizado

	Población	Mediciones de 12 horas	Mediciones de 1 hora	Tránsito horario promedio	Sondeos de opinión
Montevideo	1318800	3	---	---	240
Maldonado	87000	1	28	350	80
Minas	38400	1	20	196	78
Rocha	25400	1	26	367	82

En las ciudades del interior del país, los puntos para las mediciones de 12 horas de duración se eligieron de modo de trabajar en calles de una sola mano, próximas al centro comercial de las ciudades y con acceso a corriente eléctrica para asegurar la continuidad de los registros de medición. Los demás puntos se eligieron en función de la ubicación de centros de salud, escuelas, liceos y otras singularidades, de modo de dejar áreas más o menos homogéneas entre puntos de medición. Se tomaron siempre puntos alejados de los cruces de calle, es decir, puntos situados a mitad de cuadra, para caracterizar la realidad de una vía de tránsito sin ingresar en la complejidad de fuentes y propagación en las intersecciones, estén o no semaforizadas.

La cantidad de puntos elegidos en cada ciudad del interior permite obtener las relaciones que se muestran en la Tabla 2.

2.2 Altura de las mediciones

Durante las mediciones de 12 horas de duración, se tomaron registros simultáneos a dos alturas diferentes: 1,20 m y 3,50 m. Se compararon estadísticamente los registros a ambas alturas, aplicando la prueba de Mann & Whitney (Sachs, 1980). Se trata de una prueba estadística no paramétrica (cabe recordar que las muestras de ruido urbano son mayoritariamente no normales o, en el decir de Don and Rees (1982), ‘anything but gaussian’) que permite comprobar si dos muestras pertenecen o no a una misma población, con un cierto grado de confianza que se ha asumido en el 95 %.

Las comparaciones ratificaron el resultado obtenido por Jaramillo et al. (2008) en la ciudad de Medellín, Colombia: aunque los niveles sonoros continuos equivalentes arrojen valores muy próximos, las realidades que describen las series de niveles sonoros obtenidos en un mismo punto a diferentes alturas, son diferentes. En la Tabla 3 se presenta una síntesis de los resultados obtenidos.

En consecuencia, si se desea evaluar la situación a nivel de calle, corresponderá tomar mediciones a 1,20 m de altura y no a 4 m, como se requiere para mapas acústicos obtenidos por aplicación de herramientas de software.

2.3 Determinación del tiempo de estabilización de las mediciones

El tiempo de estabilización de las mediciones ambientales de niveles de presión sonora es un concepto presentado por González (2000). Se refiere al tiempo t^* que es el tiempo mínimo a partir del cual el L_{A,eq,t^*} y el $L_{A,eq,T}$ del tiempo estudiado (en este caso, 1 hora) difieren en menos de una tolerancia ϵ predeterminada, que puede fijarse en función de la aplicación que se propone realizar.

Para seleccionar un tiempo de medición representativo del nivel de presión sonora de 1 hora, se efectuaron 6 mediciones de 12 horas de medición en puntos diferentes: tres de ellas se realizaron en Montevideo, en puntos elegidos por su diferente tipología y densidad de tránsito, y las otras en las tres ciudades del interior del país mencionadas previamente. Los resultados se sintetizan en la Figura 1.

Tabla 2. Resumen de las características de los puntos de muestreo en las ciudades del interior del país

Ciudad	Minas, Lavalleja	Maldonado, Maldonado	Rocha, Rocha
Habitantes según censo 2011	38.400	87.000	25.400
Superficie aproximada	8,2 km ²	25 km ²	8 km ²
Puntos de registro 1 h	20	28	26
Densidad media de puntos (puntos/km ²)	2,4	1,1	3,3
Densidad media de puntos (puntos/1000 hab)	0,52	0,32	1,02

Tabla 3. Cantidad de mediciones simultáneas comparables y no comparables a dos alturas diferentes en un mismo punto, durante un total de 12 horas de medición en cada caso

	Comparables	No comparables
Montevideo – Calle Ellauri	11	1
Montevideo – Av. Uruguay	12	0
Montevideo – Av. Rivera	0	12
Ciudad de Maldonado	1	11
Ciudad de Minas	7	5
Ciudad de Rocha	5	7

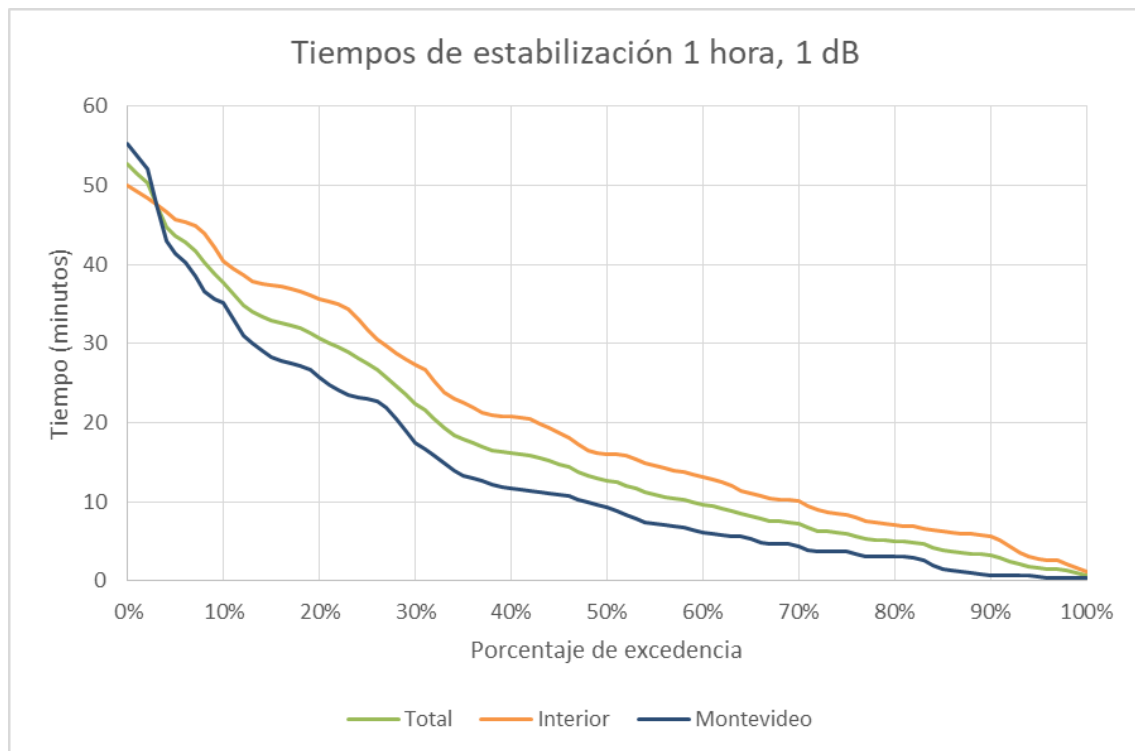


Figura 1. Tiempos de estabilización medios para Montevideo e interior, para mediciones de 1 hora con tolerancia de 1 dB

Cuanto menor es la población de la ciudad, mayores son los tiempos de estabilización obtenidos. Pero esto no quiere decir que los tiempos de estabilización en Montevideo sean mucho más breves: esto depende fuertemente del flujo y tipología del tránsito. En general, puede verse que no es recomendable tomar un tiempo de medición inferior a 45 minutos si se desea trabajar con una tolerancia de 1 dB y lograr estabilizar el 95 % de las mediciones; para mantener la misma tolerancia pero estabilizando un 90 % de las muestras, el tiempo de medición puede bajarse a 40 minutos.

Un aspecto que es importante destacar es que, cuando se toman mediciones de no menos de 40 minutos de duración, la probabilidad de estar representando adecuadamente los niveles sonoros del período de 8 a 20 horas en el punto considerado es del 95 %.

La relación entre el tiempo de estabilización y el tráfico horario total (considerando todos los datos generados en el proyecto) se presenta en la Figura 2. Puede verse que si fuera suficiente con estabilizar el 50 % de las muestras, un tiempo de muestreo de 10 minutos podría ser adecuado; sin embargo, con una exigencia mayor, ese tiempo podría aplicarse solamente para lugares con un flujo vehicular de por lo menos 1000 veh/hora. Para estabilizar el 75 % de las muestras, con hasta 500 vehículos hora no sería recomendable medir menos de 20 minutos y con menos de 200 veh/hora, se requeriría medir aproximadamente 35 minutos.

2.4 Niveles de molestia experimentados por la población

Para conocer la opinión de la población en relación al ruido ambiental e intentar construir una curva de niveles de molestia en relación con el nivel de presión sonora, se diseñó y aplicó un formulario de diez (10) preguntas, más otras cinco (5) tendientes a obtener datos acerca del encuestado (edad, sexo, ocupación, nivel educativo, horas de trabajo semanal). Se priorizó que fuera un formulario de respuestas rápidas, aunque esto pudiera conducir a relegar otros aspectos. El formulario se aplicó en forma simultánea con la medición de niveles de presión sonora, lo que permitió asignar luego un nivel sonoro ambiental a cada formulario. En Montevideo, los formularios se recogieron durante las mediciones de 12 horas. En las demás ciudades, se recogieron durante todas las mediciones (no solamente las de 12 horas).

Se procuró que las preguntas fueran induciendo progresivamente al encuestado a pensar sobre el ruido ambiente, comenzando por una consulta acerca de los problemas ambientales de su barrio que consideraría más urgentes a solucionar. En primer término, cabe indicar que el ruido no apareció como un problema relevante en la amplia mayoría de las respuestas: en todos los puntos, menos del 10 % de los encuestados lo consideró como un problema urgente a resolver.

En Montevideo, el tránsito aparece como la principal fuente de molestia en cerca de un 50 % de los casos, pero en ninguna de las tres ciudades del interior consideradas supera el 20 %. Dentro de las

componentes del ruido de tránsito, en los seis puntos de muestreo resultó que lo más molesto son las motos y los escapes libres.

Asimismo, siguiendo la metodología propuesta por Ramírez (2012), se correlacionaron los niveles de presión sonora medidos y el nivel de molestia instantánea manifestado por los encuestados (“¿Cómo califica usted el ruido que siente en este momento, aquí y ahora?”). Esto permitió trazar mapas de nivel de molestia en una escala de 1 a 5, donde 5 es extremadamente molesto y 1 es nada molesto.

Pese a que la cantidad de encuestas no es grande, resultó suficiente para trazar una curva de $L_{Aeq,12h}$ y población altamente molesta (% HA), como se muestra en la Figura 3. Si bien el parámetro de comparación no es el que se usa convencionalmente (L_{DN}) para estas curvas, puede entenderse como una primera aproximación para un caso en que no se dispone de registros de suficiente duración como para obtener el valor de L_{DN} .

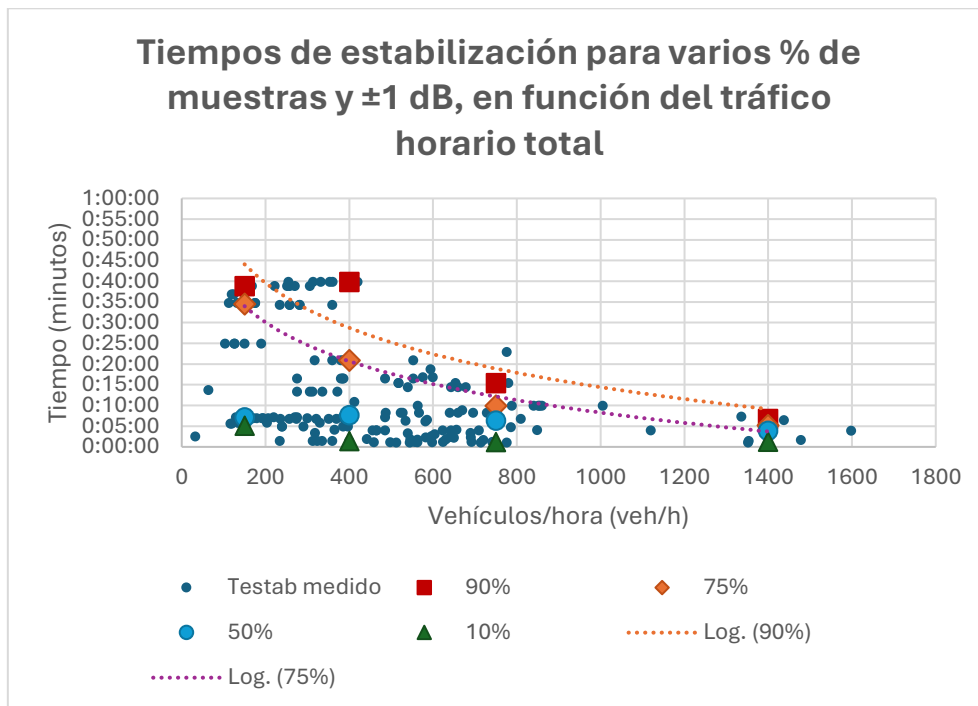


Figura 2. Tiempo de estabilización medidos, para diferentes % de muestras y tolerancia ± 1 dB, en función del tránsito horario total

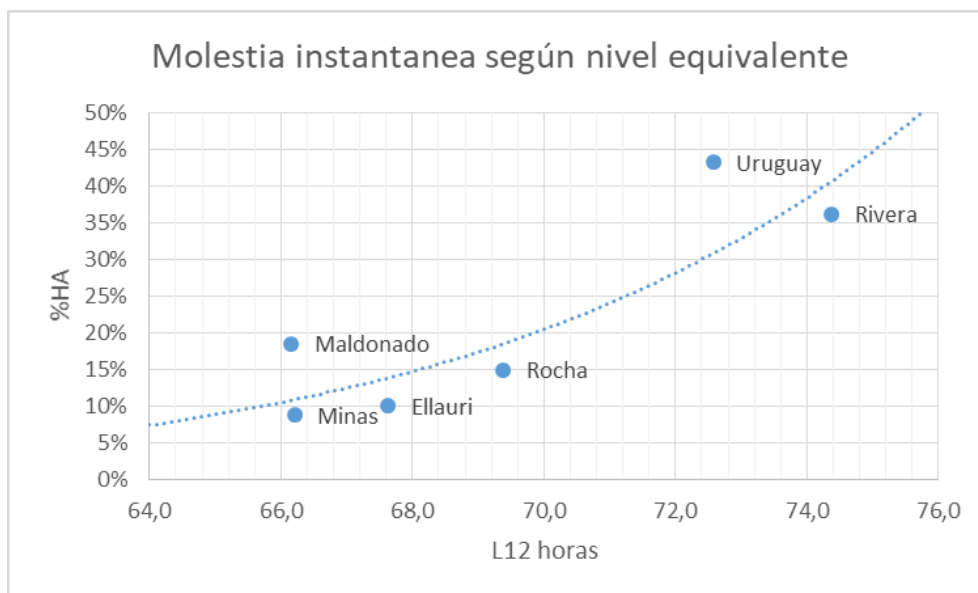


Figura 3. Porcentaje de población altamente molesta en función del $L_{Aeq,12h}$ medido

Cuando se preguntó a los encuestados cuáles eran sus sugerencias para mejorar la calidad acústica de la ciudad, las respuestas se volcaron mayoritariamente al control y fiscalización de los escapes libres en las motocicletas.

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta para construir mapas acústicos por medición en Uruguay incluye los siguientes aspectos:

3.1 Selección de puntos de medición

Deseablemente se deben cubrir las diferentes realidades de la ciudad, sin omitir los puntos singulares, como puntos cercanos a centros de salud, locales de enseñanza, grandes superficies comerciales, locales industriales, etc. De acuerdo con los resultados obtenidos y las orientaciones resultantes del trabajo de campo dadas en la Tabla 2, se sugiere utilizar el valor mayor entre 4 puntos por km² o un punto cada 1000 habitantes. Las mediciones se deben realizar en puntos alejados de las intersecciones con las calles transversales, procurando la mayor representatividad de la ubicación elegida dentro de la cuadra (por ejemplo, si en general se trata de veredas angostas, evitar tomar la medición en un punto en que ocasionalmente es ancha; o si en general hay jardines al frente y retiro frontal de las edificaciones, evitar elegir un punto en que ocurra lo contrario). Siempre debe realizarse un croquis del lugar, anotar frente a qué número de puerta se ha colocado el sonómetro y describir los principales elementos del lugar. En forma simultánea con el registro de niveles sonoros, se debe realizar conteo simultáneo de tránsito clasificado y registro horario e identificación de los eventos anómalos que pudieran ocurrir (bocinazos, ladridos, alarmas, etc.).

3.2 Altura de medición

Salvo que se persiga un objetivo diferente, para caracterizar los niveles sonoros y la molestia a nivel de los peatones, las mediciones se realizarán a 1,20 m de altura. Si el objetivo perseguido es otro, la altura de medición se ajustará según las recomendaciones correspondientes o en busca de captar lo más directamente posible la realidad que se desea representar.

3.3 Duración de las mediciones

En ciudades uruguayas, salvo que se disponga de mejor información específica del lugar, las mediciones de niveles sonoros en la vía pública deben durar un

mínimo de 45 minutos para ser representativas de los niveles de presión sonora de una (1) hora de duración. Si se dispone de datos de tráfico horario total, la duración podrá ajustarse en función de ese valor, tomando como mínimo la duración que corresponde a la estabilización del 90 % de las muestras en la Figura 2. Se recomienda elegir una duración múltiplo de 5 minutos (es decir, en vez de 13 minutos tomar 15, en vez de 38 minutos tomar 40, etc.).

3.4 Modelo predictivo

Es deseable que la ecuación predictiva que se emplee para complementar la información medida haya sido por lo menos validada en el lugar en que se realiza el mapa acústico. Es bastante común emplear ecuaciones desarrolladas para describir realidades disjuntas de la que se estudia, con el consiguiente incremento del margen de error. La ecuación predictiva cuyos coeficientes se ajustaron con la información de este proyecto es tendiente a obtener el nivel de presión sonora de 1 hora a partir del tránsito clasificado horario. La forma de la curva se había obtenido en González (2000), fue inicialmente ajustada para la Avenida 18 de Julio de Montevideo en González et al. (2020), y nuevamente mejorada para contemplar los datos correspondientes a las 4 ciudades en que se trabajó. La ecuación resultante que se entiende representativa de la realidad de Uruguay 2023 es la que sigue:

$$L_{A,eq,estimado} = 43,5 + 10 \cdot \log(a + 2,5 \cdot m + 10,4 \cdot c + 24,8 \cdot o) + 22,6 \cdot Q^{-0,3811} + 10 \cdot \log(d)$$

Donde:

a: cantidad de automóviles/hora

m: cantidad de motocicletas/hora

o: cantidad de ómnibus/hora

c: cantidad de camiones/hora

Q = a + m + c + o tránsito total horario

d: distancia al eje de calle en m

3.5 Evaluación de la población altamente molesta

Para evaluar el porcentaje de personas altamente molestas, en una primera aproximación se sugiere emplear la curva de la Figura 4 y los niveles de presión sonora diurnos del lugar. Si se desea evaluar el porcentaje de población residente altamente molesta, se sugiere considerar los datos de densidad de población del Censo Oficial de Población y Viviendas más reciente y reducir los niveles de presión sonora medidos en acera en 5 dB (Cuadro, 2023).

4. PRINCIPALES LIMITACIONES DE ESTE ESTUDIO

Sin dudas, disponer de mayor información de campo hubiera permitido lograr mejores aproximaciones para los tiempos de estabilización de las mediciones y para el número de puntos en función del tamaño de la ciudad.

Sin embargo, se considera que esta aproximación metodológica permitirá construir mapas de ruido por medición directa razonablemente bien descriptos y con un costo accesible.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece al equipo técnico que participó en el Proyecto CSIC I+D que da origen a este trabajo, y a la CSIC UdelaR por la financiación del Proyecto de investigación “Mapas Acústicos Estratégicos: una metodología adaptada a Uruguay”.

REFERENCIAS

- Cuadro, Vivian (2023). Comunicación personal.
- Convenio Universidad de la República, Fundación Ricaldoni, Intendencia de Montevideo, (2020). Estudio de niveles sonoros en Avenida 18 de Julio.
- Don, C.G. & Rees, I.G. (1985) Road traffic sound level distributions, *Journal of Sound and Vibration*, 100(1), (1985), pp. 41-53.
- European Commission Working Group (2006). Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure. Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN). Position Papers. Version 2. 13th Jan. 2006.
- González, Elizabeth; Gerardo, Rocco (1997). Niveles de contaminación sonora en la ciudad de Salto.
- González, A.E. (2000). Contaminación Sonora en Ambiente Urbano: Optimización del tiempo de muestreo en Montevideo y desarrollo de un modelo predictivo en un entorno atípico. Tesis para obtener el grado de Doctora en Ingeniería (Ingeniería Ambiental). Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.
- González, AE; Jorysz, A (2001). Herramientas para potenciar un mapa acústico. 4ª Jornada Regional sobre Ruido Urbano, 14th July 2001, Montevideo, Uruguay.
- González, AE; Gavirondo Cardozo, M; Pérez Rocamora E; Bracho AA (2007). Urban noise: measurement time and modeling of noise levels in three different cities. *Noise Control Engineering Journal*, 55 (3), (May-June 2007), pp. 367-372.
- González, A. E. (2011). Mapas acústicos: Mucho más que una cartografía coloreada. Congreso Latinoamericano de la Audio Engineering Society AES 2011, Congreso de la Sociedad de Ingeniería de Audio. Montevideo, Uruguay, agosto 2011. https://www.fing.edu.uy/imfia/grupos/contaminacion-acustica/archivos/90115_Gonzalez_mapas%20acusticos.pdf
- González, Alice Elizabeth; Gianoli Kovar, Pablo; López Parard, Malena; Luzardo Rivero, Micaela; Pais, Juan Ignacio; Ramírez, Lady Carolina (2020). Estudio de niveles sonoros en Avda. 18 de Julio. Informe Final. [Sound pressure levels in 18 de Julio Ave. Final Report]. Noviembre, 2020. DIA-IMFIA, Facultad de Ingeniería, UdelaR.
- González, Alice Elizabeth; Gianoli Kovar, Pablo; Suarez Dorez, Ignacio (2023). Proyecto CSIC I+D: Metodología para desarrollar mapas acústicos estratégicos en Uruguay. Informe Final.
- IMFIA (1998). Contaminación Sonora en Ambiente Urbano. Informe Final. Proyecto de Iniciación a la Investigación CONICYT 2040. Montevideo, Uruguay: Facultad de Ingeniería UdelaR.
- Intendencia Municipal de Montevideo – Facultad de Ingeniería (1999). Convenio IMFIA-IMM: Mapa acústico de Montevideo. Informe Final del Convenio. Montevideo, Uruguay.
- Jaramillo, A., González, A., Betancur, C., Correa, M. (2009) Estudio comparativo entre las mediciones de ruido ambiental urbano a 1,5 m y 4 m de altura sobre el nivel del piso en la ciudad de Medellín, Antioquia – Colombia. *Revista Dyna*, 157 pp. 71-79.
- Ramírez González, Alberto (2012). Caracterización y modelación micro y macroscópica del ruido vehicular en la ciudad de Bogotá. Tesis para optar al título de Doctor en Estudios Ambientales y Rurales. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá Colombia.
- Sachs, Lothar (1980). Estadística aplicada. España: Labor.
- Universidad de Medellín. Protocolo para la medición de emisión de ruido, ruido ambiental y realización de mapas de ruido, Medellín, Colombia, 2009.