

Resolución espacial en la elaboración de mapas de ruido por interpolación

Diego M Murillo

Universidad de San Buenaventura, Medellín. Facultad de Ingenierías
diego.murillo@usbmed.edu.co

(Tipo de Artículo: Investigación Científica y Tecnológica. Recibido el 06/02/2017. Aprobado el 21/02/2017)

Resumen. Un análisis sobre la resolución espacial requerida en mediciones de ruido para generar mapas acústicos por interpolación es discutido. El proceso se basa en la generación de cartografía de referencia utilizando el software de predicción acústica SoundPLAN. Posteriormente, los resultados son exportados como receptores puntuales con diferentes resoluciones emulando mediciones en campo. Estos receptores son utilizados para construir mapas de ruido por interpolación que son comparados con su respectiva referencia. Entornos poco y densamente poblados han sido considerados en el presente estudio. En adición, una evaluación utilizando mediciones de ruido registradas en el barrio Estadio de la ciudad de Medellín también es presentada. Los hallazgos indican que la resolución requerida para una correcta representación de la propagación sonora es dependiente de la complejidad del entorno. Para evaluaciones generales en las que se proyecta tener una estimación global de la condición acústica, una resolución de 80 m provee información estadísticamente representativa en asentamientos urbanos.

Palabras clave. Mapas de ruido, interpolación, resolución espacial.

Spatial resolution for noise mapping based on interpolation methods

Abstract. *An analysis of the spatial resolution required for the noise measurement grid to generate noise maps based on interpolation methods is discussed. The process is based on the generation of reference cartography using the commercial package SoundPLAN. Subsequently, the results are exported as point receivers with different resolutions emulating in-situ measurements. These receivers are used to produce noise maps using interpolation techniques, which are compared to the respective reference. Low and densely populated environments have been considered in the current research. In addition, an evaluation using noise measurements from the Estadio's neighborhood of the city Medellin is also presented. The outcomes indicate that the spatial resolution required to correctly represent the sound propagation depends on the complexity of the environment. For a general assessment, in which a global estimation of the acoustical condition is expected, a resolution of 80 m provides statistical representative information in urban scenes.*

Keywords. *Noise mapping, interpolation, spatial resolution.*

1. Introducción

Los mapas de ruido son herramientas que permiten la evaluación de la condición acústica en un área determinada [1]. Mediante su uso, es posible estimar la cantidad de población expuesta a diferentes niveles de sonoros, pero también soportar la toma de decisiones concernientes a la gestión ambiental. En adición, son insumo fundamental en la determinación de los usos del suelo y el desarrollo de planes de ordenamiento territorial [2].

Diferentes metodologías existen para la elaboración de mapas de ruido. La más utilizada corresponde a la implementación de métodos de cálculo que estiman la emisión acústica de la fuente y la propagación del sonido considerando fenómenos como absorción, atenuación, reflexión y difracción [3]. Métodos internacionales ampliamente reconocidos para predecir el ruido producido por fuentes automotoras [4], férreas [5], industriales [6] y aéreas [7] pueden ser hallados en la literatura científica.

Aunque el uso de métodos de cálculo es la metodología más asertiva para pronosticar la condición acústica en un sector, el alto costo de los programas informáticos que implementan dichos algoritmos limita su uso y aplicación en estudios de pequeña escala. Otra metodología basada en la toma de mediciones *in-situ* y la posterior interpolación de la información para generar superficies continuas que representan la distribución espacial de los niveles de ruido puede ser utilizada en estos casos [8].

La principal limitación de utilizar interpolación para elaborar mapas de ruido es que la propagación del sonido no es considerada en la generación de los contornos acústicos, sino la relación espacial entre los puntos de muestreo. Esto conlleva a una alta densidad de puntos de medición con el propósito de registrar adecuadamente su variación espacial (e.g. el efecto de apantallamiento generado por los edificios en un entorno urbano o la atenuación del sonido debido a la distancia). Pese a esta restricción, la interpolación continúa siendo un método alternativo ampliamente utilizado en la elaboración de mapas de ruido [9-14].

En el presente artículo se efectúa un análisis sobre la resolución espacial requerida para elaborar mapas de ruido por interpolación de acuerdo a diferentes entornos acústicos. Escenarios simples basados en propagación a campo libre y ambientes complejos (urbanos) son considerados. Tanto simulaciones numéricas utilizando el software SoundPLAN V 7.4 [15] como mediciones de ruido en una zona piloto de la ciudad de Medellín son utilizadas para el presente estudio.

2. Métodos

La interpolación es un proceso estadístico en el que se estiman valores desconocidos a partir de datos conocidos [16]. Métodos tanto determinísticos como geo-estadísticos son comúnmente utilizados para predecir información espacialmente referenciada [17].

En el ámbito de acústica ambiental, su principal aplicación es la generación de contornos continuos que representan la variación espacial del ruido. El parámetro nivel continuo equivalente ponderado A (LAeq) [18] es comúnmente utilizado como indicador de evaluación en este tipo de mapas. El proceso se basa en la realización de mediciones de ruido georreferenciadas acorde a una retícula espacialmente distribuida y su posterior análisis en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Esto posibilita la integración de la información con otros datos espaciales (e.g. cantidad de población) fortaleciendo el análisis del mapa [19].

El método de interpolación seleccionado corresponde a *Kriging* [20] ya que estudios previos indican mayor precisión en la generación de mapas de ruido comparado con otros métodos como *Inverse Weighting Distance* [21]. *Kriging* es un estimador lineal basado en la auto correlación espacial que existe entre las variables. El método asume que la media es constante y que las variables son estacionarias y sin tendencias. Posibilita la transformación de datos, eliminación de tendencias y provee estimaciones de error. La auto correlación es determinada partir de semivariogramas y vecindades que son obtenidos por medio de un análisis exploratorio de la información. El semivariograma permite, a partir de la covarianza entre los puntos medidos, estimar su variabilidad y dependencia en función de la distancia y la dirección. La fórmula general está dada por:

$$p(\mathbf{x}) = \beta(\mathbf{x}) + \varepsilon(\mathbf{x}), \quad (1)$$

donde p es la variable de interés (Leq), β es una constante desconocida, ε son errores aleatorios de estimación y \mathbf{x} es un vector en un espacio euclidiano R^n que representa las coordenadas espaciales. La predicción en el punto \mathbf{x} está dada por:

$$\tilde{p}(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^N \lambda_n p(\mathbf{x}_n), \quad (2)$$

en el cual es \tilde{p} es la variable estimada, λ es el peso de cada variable, p es la variable medida y n es el índice que representa cada punto medido. El error ε se define como:

$$\varepsilon(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^N \lambda_n p(\mathbf{x}_n) - p(\mathbf{x}). \quad (3)$$

En adición, la suma de los pesos λ_n debe ser igual a 1 para que los valores estimados no se encuentren sesgados. Finalmente, con el propósito de minimizar el error se agrega el multiplicador de Lagrange (Γ):

$$\mathbf{g} = \Gamma \boldsymbol{\lambda}, \quad (4)$$

donde Γ es la matriz de valores del semivariograma teórico, $\boldsymbol{\lambda}$ es el vector de pesos a resolver y \mathbf{g} es el vector de semivarianza teórica de cada punto. Para el presente estudio, se implementó *Kriging* Ordinario ya que no se

considera que la media entre los puntos evaluados es constante (en caso contrario se implementaría *Kriging Simple*). Esto se debe a las características físicas de cómo se propaga el sonido.

La eficiencia de la interpolación es determinada mediante un análisis de normalidad en la información y el cálculo del error (ϵ). Para evaluar la distribución normal en los datos, se calcula el coeficiente de sesgo y si su valor absoluto es mayor a la 0.5 ($|\beta| > 0.5$) se efectúa una transformación de los datos de tipo raíz cuadrada o logarítmica. En adición, una comparación en términos de media, mediana, moda y desviación estándar es realizada. Finalmente, diferentes tipos de errores son estimados con base en ϵ :

$$\text{Promedio Estándar (ASE)} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \sigma^2(x_n)}{N}}, \quad (5)$$

$$\text{Raíz Cuadrática Media (RMS)} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\epsilon_n)^2}{N}}, \quad (6)$$

$$\text{Media Estandarizada (MSE)} = \frac{\frac{\sum_{n=1}^N \epsilon_n}{\sigma(x_n)}}{N}, \quad (7)$$

$$\text{RMS Estandarizada (RMSS)} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \left(\frac{\epsilon_n}{\sigma(x_n)}\right)^2}{N}}. \quad (8)$$

La selección corresponde al escenario cuyo ASE y RMS sean menores, el MSE sea más cercano a cero y el RMSS sea más próximo a la unidad [22]. Por otra parte, valores estadísticos (mínimo, máximo y desviación estándar) estimados a partir del proceso de interpolación son comparados con los valores medidos como criterio de validación.

Para el desarrollo del presente estudio, información de referencia es generada en el software SoundPLAN. La selección de esta metodología se debe a la factibilidad de exportar receptores puntuales con diferentes resoluciones espaciales lo que permite evaluar la robustez del método de interpolación. Diferentes escenarios acústicos tanto simples como complejos son evaluados. En primera instancia, la emisión de una vía a campo libre y con gradiente de elevación 0 es simulada utilizando el método de cálculo alemán RLS 90 [3]. Receptores puntuales con una resolución espacial de 40 m, 80 m y 240 m son exportados y utilizados para generar mapas de ruido por interpolación.

Posteriormente, un entorno urbano correspondiente al centro de la ciudad de Medellín es considerado. El mapa de ruido corresponde a un área aproximada de 353 m² en el cual el ruido producido por el tráfico automotor es predominante. Esta zona presenta una alta complejidad debido a que múltiples rutas de transporte público de la ciudad convergen en ella. La información de entrada requerida para la simulación fue adquirida de acuerdo a

las recomendaciones establecidas por la *European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise* [23]. Información concerniente al aforo y velocidad vehicular fue recolectada directamente en campo. Cartografía concerniente a vías, edificios y curvas de nivel fue provista por la secretaria de catastro de la ciudad. Mayor detalle sobre el proceso de simulación y validación puede ser consultado en la siguiente referencia [24]. La Figura 1 muestra el área seleccionada.



Figura 2. Zona de Estudio (Centro – Medellín)

Finalmente, mediciones de ruido ambiental acorde a la Resolución 0627 de 2006 [25] son realizadas en una zona correspondiente al barrio Estadio en la ciudad de Medellín (ver Figura 2). Estas mediciones son utilizadas para generar mapas de ruido por interpolación con base en información registrada en campo. De esta manera, es posible evaluar la incidencia que tiene la variabilidad intrínseca de las mediciones de ruido cuando no se realizan de manera simultánea. Estas variaciones se asocian a cambios en el flujo vehicular, velocidad de recorrido, uso de claxon o el aporte hecho por fuentes externas de tipo comunitario.



Figura 3. Zona de Estudio (Barrio Estadio – Medellín)

3. Resultados

3.1 Escenario simple, simulación a campo libre

Este modelo corresponde al ruido generado por una vía con un nivel de emisión de ruido (L_{me}) de 68.6 dB. El entorno corresponde a campo libre lo que conlleva a una propagación de tipo cilíndrica. Mapas de ruido generados con diferentes resoluciones espaciales son ilustrados en la Figura 3. Los resultados indican variaciones significativas en los niveles de ruido proyectados. La mayor discrepancia se encuentra en el área cercana a la fuente en donde la atenuación por la distancia es más relevante. En el caso del mapa construido con una resolución espacial de 240 m, no es posible asociar los contornos de ruido a un tipo de fuente acústica (e.g. cilíndrica) debido a la dispersión en la información.

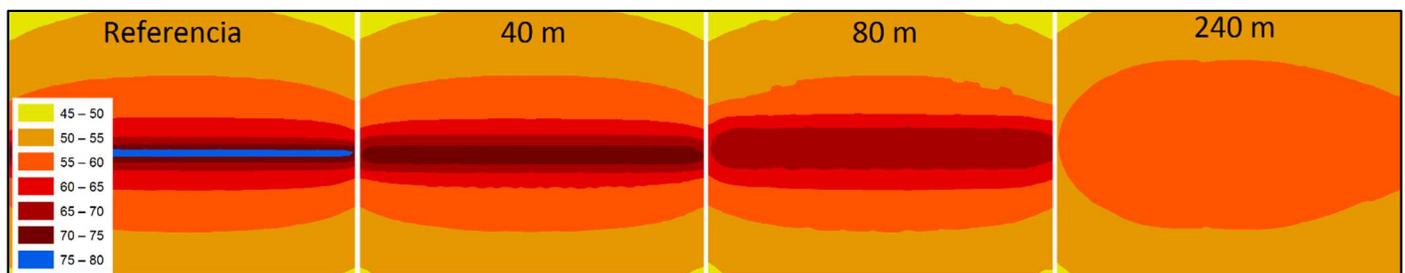


Figura 4. Mapas de ruido, simulación de escenario simple a campo libre.

Un análisis complementario utilizando los valores estimados por el proceso de interpolación es llevado a continuación. Para esto, los contornos continuos ilustrados en la Figura 3 son procesados como archivos tipo raster. La Figura 4 muestra el error ζ el cual es definido como la diferencia aritmética entre cada celda

del mapa de referencia y los interpolados (Ecuación 9). El uso de ζ obedece a tener información de referencia que puede ser contrastada con la estimada.

$$\zeta(\mathbf{x}) = \tilde{p}(\mathbf{x}) - p(\mathbf{x}). \quad (9)$$

corresponde a 40 m. En contraste, las mayores divergencias se hallan con una resolución de 240 m.

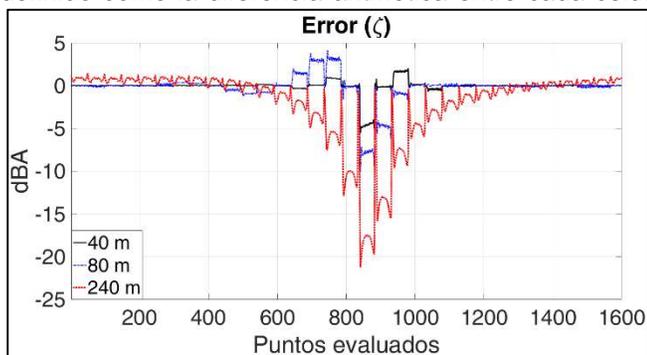


Figura 5. Error ζ para diferentes resoluciones espaciales, escenario campo libre

La Figura 4 indica que ζ es mayor para el mapa construido con una resolución espacial de 240 m. En este caso, existen diferencias de hasta 20 dBA entre puntos. En general, los resultados indican que el error decrece al disminuir el espaciamiento en la retícula. Esto se debe a que la atenuación del LAeq debido a la distancia es mejor caracterizada. La Tabla 1 ilustra los errores dependientes de ε (ecuaciones 5-8). Los indicadores sugieren que el mejor escenario

Tabla 2. Errores basados en ε , escenario campo libre

Error	40 m	80 m	240 m
ASE	0.358	0.732	3.68
RMS	0.222	0.646	2.62
MSE	0.009	-0.013	0.123
RMSS	0.635	1.102	0.693

3.2 Escenario complejo, simulación entorno urbano

La Figura 3 ilustra el mapa de ruido asociado a la zona centro de la ciudad de Medellín. Los hallazgos sugieren que una resolución espacial de 40 m permite delimitar las zonas con mayores niveles de ruido y facilita la identificación de las fuentes emisoras. En contraste, la resolución de 80 m solo provee una descripción global de los niveles de ruido del sector. En el caso de 240 m, los niveles de ruido son sobreestimados en la parte sur y subestimados en la parte norte, respectivamente. Un análisis en términos de parámetros estadísticos (diferencia aritmética entre predichos y referencia) es presentado en la Tabla 2.

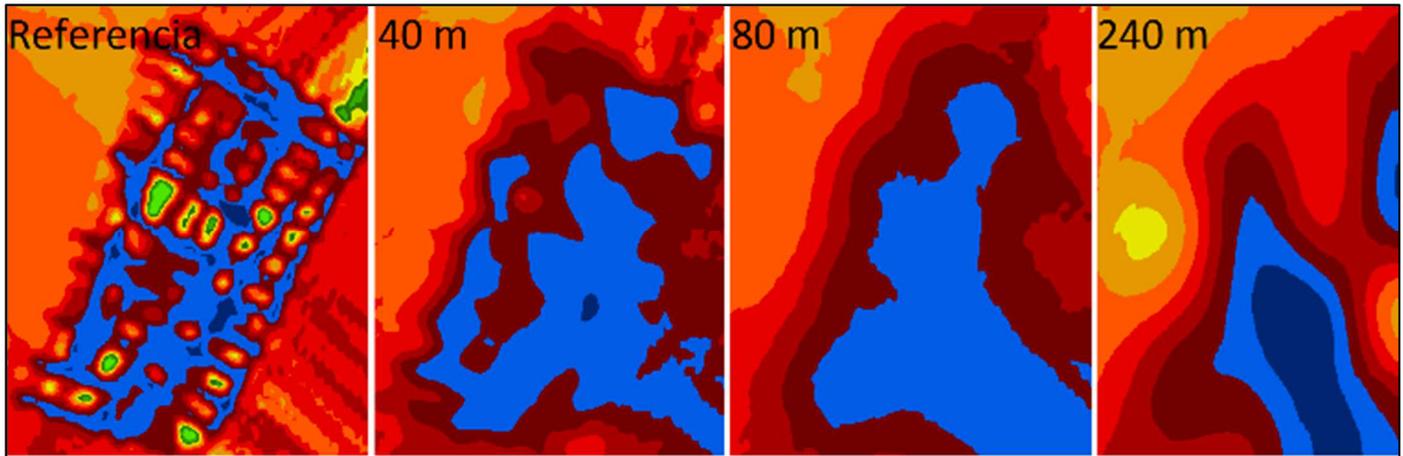


Figura 6. Mapas de ruido, simulación de escenario complejo zona centro de Medellín.

Tabla 3. Diferencia entre estadísticos, zona centro

Parámetro/Resolución	40 m	80 m	240 m
Valor Mínimo	25.4	30.5	33.1
Valor Máximo	-2.6	-7.8	-10.2
Desviación estándar	-1.9	-4.5	-5.0
Media	0,3	3.4	3.4
Mediana	-2.8	2.2	2.3

Los resultados indican que la mayor correlación entre los parámetros estadísticos es obtenida utilizando una resolución espacial de 40 m. En general, la mayor diferencia se encuentra en el valor mínimo. Esto se debe a que los puntos exportados no coinciden con las coordenadas en que el aislamiento acústico provisto por los edificios atenúa de manera significativa los niveles de ruido. Un análisis en términos de ε es presentado en la Tabla 3.

Tabla 4. Errores basados en ε , zona centro

Error	40 m	80 m	240 m
ASE	5.537	6.295	7.590
RMS	5.806	6.816	8.327
MSE	0.006	-0.013	0.015
RMSS	1.040	1.066	1.077

Los resultados son congruentes con los hallazgos obtenidos para el escenario a campo libre en los que los errores son más desfavorables al utilizar una menor resolución espacial (240 m).

3.3 Escenario complejo, medición entorno urbano

Con base en los resultados obtenidos en la sección anterior, 82 mediciones de ruido ambiental han sido registradas en un área aproximada de 353 m². Esta relación conlleva a una resolución espacial de 80 m entre puntos de medición. Este distanciamiento fue seleccionado con el propósito de obtener un balance razonable entre los costos económicos y la precisión del mapa. La metodología de medición corresponde al protocolo establecido por la normativa nacional [25]. La Figura 6 muestra la zona bajo estudio con los respectivos puntos de medición.



Figura 7. Puntos de medición de ruido ambiental Barrio Estadio

Inicialmente, un análisis exploratorio es realizado con el propósito de efectuar una valoración preliminar de la información. Para esto, una evaluación sobre la normalidad en la distribución de los datos es conducido. Este procedimiento es implementado para determinar si se debe aplicar alguna transformación o si hay información atípica que debe ser descartada por errores en el proceso de captura. A continuación, en la Tabla 4, se reporta el coeficiente de sesgo, media, mediana, moda y desviación estándar de los datos registrados.

Tabla 5. Análisis de normalidad, Barrio Estadio

$ \beta $	Media	Mediana	Moda	σ
1.015	70.014	68.075	62.45	8.556

Los valores indican que los datos no concuerdan de manera adecuada a una distribución normal. En este caso, el coeficiente de sesgo es mayor a la unidad por lo que se aplica una transformación logarítmica para ajustar la información. La Tabla 5 muestra los parámetros de validación posterior a la transformación de los datos. Aunque los resultados indican una optimización en la información, el valor de sesgo continúa siendo mayor a 0.5.

Tabla 6. Análisis de normalidad datos transformados, Barrio Estadio

$ \beta $	Media	Mediana	Moda	σ
0.723	4.24	4.22	4.22	0.117

Por consiguiente, se descartaron 4 registros que contenían valores extremos basado en una curva de normalidad. La Tabla 6 ilustra los valores posteriores a la eliminación de dichas mediciones y a la aplicación de una transformación de tipo raíz cuadrada.

Tabla 7. Análisis de normalidad datos descartados y transformados, Barrio Estadio

Error	Gauss	Esférico	Exponencial	Circular	Tetra-Esférico	Penta-Esférico
ASE	0.252	0.253	0.272	0.253	0.251	0.256
RMS	0.241	0.245	0.250	0.244	0.245	0.246
MSE	-0.027	-0.021	-0.028	-0.009	-0.024	-0.024
RMSS	0.955	0.966	0.916	0.965	0.973	0.957

Acorde a la Tabla 7, el mejor escenario para este caso en específico corresponde a un modelo Tetra-Esférico. La Figura 9 ilustra el mapa de ruido de la zona estadio utilizando el método de interpolación seleccionado.

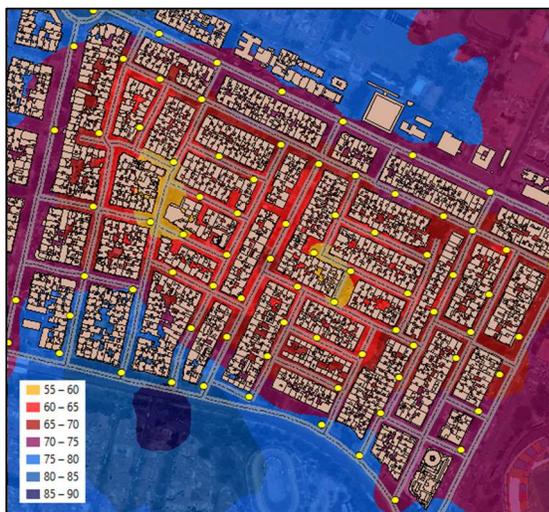


Figura 8. Mapa de ruido, interpolación zona Estadio

Condición	$ \beta $	Media	Mediana	Moda	σ
Datos eliminados	0.587	68.853	67.775	64.10	6.963
Datos eliminados y transformación $n \sqrt{\quad}$	0.484	8.288	8.233	7.97	0.415

Posteriormente, diferentes escenarios de interpolación son generados utilizando múltiples modelos de semivariograma. La selección corresponde a la configuración que presenta mejor ajuste a los errores dependientes de ε (Ecuaciones 5-8). Este proceso es comúnmente usado como método de evaluación en el proceso de interpolación. El cálculo de ε se realiza en cada punto a partir de los puntos restantes. Es decir, que en el caso del mapa del barrio Estadio cuya interpolación se genera con 78 receptores puntuales (4 registros son descartados), 77 de esos receptores son utilizados para predecir el punto bajo análisis. Este proceso se repite para todos los 78 receptores. La implementación de esta metodología se debe a la carencia de un escenario de referencia lo cual imposibilita la evaluación de ζ . La Tabla 7 presenta los errores dependientes de ε para varias configuraciones de interpolación con diferentes modelos de semivariograma.

Tabla 8. Errores dependientes de ε , Barrio Estadio

Como es de esperarse, los mayores niveles de ruido se encuentran en el perímetro del mapa el cual corresponde a vías principales. En el centro de la zona bajo análisis, los niveles se reducen debido a una significativa disminución en el flujo vehicular que transita en estas vías. Aunque la interpolación no genera contornos de ruido específicamente relacionados con las fuentes generadoras (vías), la información proyectada es lo suficientemente representativa para establecer una relación entre estas variables. Esto posibilita pronosticar las vías que mayor impacto acústico generan en el sector.

4. Discusión

Los resultados indican una alta dependencia entre la resolución espacial y la precisión de la interpolación. En todos los casos, utilizar una retícula de 240 m entre vértices conlleva a mapas de ruido que no describen la condición acústica correctamente. En el escenario correspondiente a campo libre, utilizar esta resolución provee contornos de ruido que solo son precisos en áreas lejanas a la fuente en donde no hay una variación significativa en los niveles de ruido. En adición, la

precisión la interpolación será menor cuando se utilizan mediciones de ruido ambiental debido a la intrínseca variabilidad del fenómeno. Una retícula no homogénea en la que se utilice un mayor número de puntos en áreas cercanas a las fuentes principales de ruido puede mejorar la predicción.

En entornos urbanos, debido a la alta variabilidad en los niveles de ruido, una resolución de 40 m es necesaria para análisis detallados. En el caso de una evaluación global de los niveles de ruido, utilizar una retícula de 80 m es suficiente para describir la condición acústica del entorno. Es relevante resaltar que la normativa nacional [25] recomienda el uso de retículas de hasta 2 km para entornos rurales (similar al escenario en campo libre) y de hasta 250 m en entornos urbanos. Los hallazgos obtenidos en el presente estudio sugieren que estas retículas no tienen la suficiente resolución espacial para generar mapas de ruido por interpolación. El uso de las mismas debería ser enfocado a la validación de mapas de ruido generados mediante modelación cuya calibración y validación se realiza con base a mediciones in-situ. Es importante resaltar que dichas mediciones deben considerar un intervalo temporal significativo con el propósito de representar la condición acústica a largo plazo o ser enfocadas a fuentes puntuales.

5. Conclusiones

Un análisis sobre la resolución espacial requerida para la elaboración de mapas de ruido por interpolación ha sido presentado. Los resultados indican que en entornos en que los niveles de ruido varían rápidamente de manera significativa un menor distanciamiento entre puntos de medición es requerido.

En estudios en los cuales la propagación del sonido debe ser caracterizada con detalle, una resolución espacial de mínimo 40 m es requerida. Un distanciamiento de 80 m entre puntos de medición es suficiente para evaluaciones globales de la condición acústica en entornos urbanos.

La resolución espacial entre puntos de medición de ruido establecida por la Normativa Colombiana no es adecuada para la generación de mapas de ruido por interpolación. Para este tipo de aplicaciones una mayor resolución espacial es requerida.

6. Referencias

- [1] E. Murphy and e. King. "Environmental Noise Pollution: Noise Mapping, Public Health, and Policy"; Elsevier; 1st edition; San Diego; 2014.
- [2] EU. "Directive 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise"; 2002.
- [3] D. Murillo, J. Gil, V. Zapata & J. Tellez. "Assessment of the RLS-90 calculation method for predicting road traffic noise in Colombian conditions". Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia; Vol. 75, pp. 175-188, Jun. 2015.
- [4] C. Steele. "A critical review of some traffic noise prediction models". Applied Acoustics Vol. 62, No 3, pp. 271-287, 2001.
- [5] M. Szwarc, B. Kostek, J. Kotus, M. Szczodrak and A. Czyzewski. "Problems of Railway Noise—A Case Study". International Journal of Occupational Safety and Ergonomics; Vol. 17, No 3, pp. 309-325, 2011.
- [6] ISO. "ISO 9613-2:1996 Acoustics, Attenuation of sound during propagation outdoors -- Part 2: General method of calculation"; 1996.
- [7] U. Isermann and B. Vogelsang. "AzB-2008 and ECAC Doc.29 – two modern European aircraft noise calculation models". Noise Control Engineering Journal; Vol. 58, No 4, pp. 455-461, 2010.
- [8] H. Doygun and D. Guran. "Analysing and mapping spatial and temporal dynamics of urban traffic noise pollution: a case study in Kahramanmaraş, Turkey". Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 142, No 1, pp. 67-72, 2008.
- [9] K. Tsai, M. Lin and Y. Chen. "Noise mapping in urban environments: A Taiwan study". Applied Acoustics. Vol. 70. No 7. pp. 964-972. 2009.
- [10] A. Alesheikh and M. Omidvari. "Application of GIS in Urban Traffic Noise Pollution". International Journal of Occupational Hygiene. Vol. 2. No 2. pp. 79-84. 2010.
- [11] B. Harman, H. Koseoglu, C. Yigit. "Performance evaluation of IDW, Kriging and multiquadric interpolation methods in producing noise mapping: A case study at the city of Isparta, Turkey". Applied Acoustics. Vol. 112. pp. 147-157. 2016.
- [12] M. Mehdi, M. Kim, J. Seong and M. Arsalan. "Spatio-temporal patterns of road traffic noise pollution in Karachi, Pakistan". Environmental International. Vol. 37. No 1. pp. 97-104. 2011.
- [13] O. Delgado and J. Martinez; "Elaboración del mapa de ruido del área urbana de la Ciudad de Cuenca – Ecuador, empleando la técnica de interpolación geoestadística Kriging ordinario". Ciencias Espaciales. Vol. 8. No 1. pp 411-440.2015.
- [14] DAGMA. "Mapa de ruido de Santiago de Cali año 2015". [En línea] <https://www.datos.gov.co/browse?q=mapa+de+ruido> Revisado el 25 de enero de 2017.
- [15] SoundPLAN. En <http://www.soundplan.eu/english> Revisado el 25 de enero de 2017.
- [16] E. Isaaks. "An Introduction to Applied Geostatistics". Ed. Oxford University Press. 1st ed. Oxford. 1989.
- [17] B. Ripley. "Spatial Statistics". Ed. John Wiley & Sons. 2nd ed. New Jersey, 2004.
- [18] M. Crocker. Fundamentals of Acoustics, Noise and Vibration". In "Handbook of Noise and Vibration Control", chapter 2, Ed. John Wiley & Sons. 1st edition. New Jersey. 2007.
- [19] H. Kluijver and J. Stoter. "Noise mapping and GIS: optimising quality and efficiency of noise effect studies". Computers, Environment and Urban Systems. Vol. 27. No 1. pp. 85-102. 2003.
- [20] M. Stein. "Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging". Ed. Springer, 1st ed. New York. 1999.
- [21] D. Murillo; I. Ortega; J. David Carillo; A. Pardo and J. Rendón; "Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos". Revista Ingenierías USBMED, Vol. 3 No 1. pp 62-68. 2012.
- [22] R. Cañada et al. "Sistemas y análisis de la información geográfica". Ed. Alfaomega. 2da ed., Madrid. 2008.
- [23] European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise. "Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure. Final Draft," [En línea]. <http://sicaweb.cedex.es/docs/documentacion/Good-Practice-Guide-for-Strategic-Noise-Mapping.pdf> 25 de enero, 2017.
- [24] C. Echeverri, D. Murillo, G. Valencia. "Simulación de ruido de tránsito automotor como herramienta para el rediseño de rutas de transporte público colectivo en el municipio de Medellín". Revista Ingenierías Universidad de Medellín; Vol. 10, No. 18; pp 20-29. 2011.
- [25] MAVDT. "Resolución 0627 del 7 de abril de 2006 sobre ruido ambiental", 2006.