

# Monitoreo de los niveles de ruido ambiental en el barrio el Poblado

aplicando la técnica geoestadística del kriging poligonal

## Environmental noise level monitoring in el Poblado neighborhood

measured by the kriging polygonal geostatistical technique

Recibido para evaluación: 24 de Marzo de 2010

Aceptación: 01 de Julio de 2010

Recibido versión final: 21 de Julio de 2010

Luis Hernán Sánchez A.<sup>1</sup>

Juan Carlos Galeano P.<sup>2</sup>

### RESUMEN

Este artículo contiene los resultados del monitoreo del ruido ambiental (RA) sobre la franja horaria diurna (LEQD) en los barrios El Poblado (14 muestras) y Lalinde (2 muestras), del área urbana del municipio de Medellín. El muestreo fue realizado durante 7 días en el mes de julio de 2008 y la información fue evaluada en el Centro de Geoestadística de la Universidad Nacional de Colombia.

El análisis estructural de la variable ruido ambiental se basó en la regionalización de 417 datos tomados en el área urbana del municipio de Medellín, para el proyecto "Mapas acústicos y de concentración de monóxido de carbono de los municipios del área metropolitana del valle de Aburrá". La estructura variográfica fue acoplada a un modelo cúbico con rango de influencia de 780 metros y una desviación estándar real de 4.45 dB(A), la cual representa el 97% de la varianza teórica o estadística. Con base en estos resultados, se estimó para el barrio El Poblado utilizando la técnica del Kriging Poligonal, el nivel de RA entre 65 y 69 dB(A) con un error relativo del 4%, que permite considerar geoestadísticamente este nivel de ruido en la categoría de probado. Por otro lado, el nivel de RA estimado para el barrio Lalinde podría variar en el intervalo 66 y 74 dB(A), con un error relativo del 38%, categorizado como un nivel de RA Posible; este último resultado indica que no es suficiente una muestra para categorizar el nivel acústico.

El nivel de RA máximo estimado permite considerar el barrio El Poblado en el estándar de RA (decreto 0627/2006) adecuado para un Sector C y apropiado para zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos.

**Palabras Clave:** Ruido ambiental, Geoestadística, Kriging poligonal, Monitoreo.

### ABSTRACT

In this study, the results of the environmental noise (RA) monitoring during the daytime period (LEQD) in El Poblado (14 samples) and Lalinde (2 samples) neighborhoods, within the urban area of Medellín city, are shown. This sampling was carried out during a 7-day period in July, 2008, and the information was assessed at the Geostatistics Center at the National University of Colombia (Centro de Geoestadística de la Universidad Nacional de Colombia).

The structural analysis for the environmental noise variable was based on the regionalization of 417 data taken in the urban area of the municipality of Medellín, for the project «Acoustic and carbon monoxide concentration maps for the municipalities in the Aburrá valley metropolitan area». The variographic structure was coupled to a cubic model with a range of influence of 780 meters and a real standard deviation of 4.45 dB (A), representing the 97% theoretical or statistical variance. Based on these results, the level of environmental noise (RA) was estimated between 65 and 69 dB(A), for El Poblado neighborhood using the Kriging Polygonal technique and with a relative error of 4%. These results lead to classify this noise level, geostatistically, as proved. On the other hand, The environmental noise level estimated for Lalinde neighborhood could range in an interval between 66 and 74 dB(A), with a relative error calculated on 38%, which falls into the category of possible environmental noise level.

The maximum estimated environmental noise level classifies El Poblado neighborhood in the environmental noise related to a Sector C (law 0627/2006) which is allowed to areas for commercial use, such as shopping centers, shops, premises or similar facilities such as mechanical and industrial shops, sport and recreation centers, gyms, restaurants, bars, taverns, discotheques, bingo houses, and casinos.

**Key Words:** Environmental noise, geostatistics, Kriging Polygonal, monitoring.

---

1. *Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Centro Nacional de Geoestadística, lhsanche@unal.edu.co*

2. *Estudiante de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Centro Nacional de Geoestadística, jcgalean@unal.edu.co.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los estudios de contaminación por el ruido ambiental son cada vez más comunes en Colombia para un uso adecuado del territorio. El estudio más reciente sobre ruido ambiental en la ciudad de Medellín fue elaborado por el Politécnico Jaime Isaza Cadavid y la Universidad Nacional de Colombia para la Corporación Área Metropolitana del Valle de Aburrá en el año 2007. Las nuevas regulaciones ambientales de Colombia requieren que las ciudades con más de 100.000 habitantes preparen mapas de ruido; además es necesario elaborar programas permanentes de control y monitoreo.

Utilizando técnicas geoestadísticas, la Universidad Nacional de Colombia preparó el primer mapa de ruido ambiental diurno y nocturno de la zona urbana del municipio de Medellín, con base en la elaboración de un muestreo sistemático ejecutado por el Politécnico Jaime Isaza Cadavid. Para la elaboración del mapa en la franja horaria diurna, se estimaron 3 millones de datos con base en la técnica conocida como kriging Ordinario de Bloques (KOB), teniendo en cuenta un rango de influencia de las muestras de 560 metros y donde los barrios El Poblado y Lalinde mostraron niveles de ruido ambiental entre 65 y 70 dB(A).

Con base en la información suministrada por el estudio de ruido ambiental en la zona urbana del municipio de Medellín, se apropió la tecnología del Kriging Poligonal, muy común para la estimación global de yacimientos minerales, y además muy apropiado para apoyar programas de control y monitoreo del ruido ambiental. En este caso, los polígonos adaptados correspondieron a la cobertura de barrios de la ciudad de Medellín y como prueba piloto, se elaboró una muestra compuesta de 14 puntos distribuidos en el barrio El Poblado y 2 puntos de muestreo en el barrio Lalinde.

El objetivo central de este artículo es proponer un modelo de caracterización del nivel de ruido para las zonas urbanas con base en mediciones escasas. Por lo tanto, este estudio presenta la metodología del kriging poligonal como una herramienta apropiada para llevar a cabo programas de control localizados; además propone un sistema de clasificación geoestadístico del RA, que permita a las autoridades ambientales tomar decisiones inmediatas, sin necesidad de gastar dinero en muestreos exhaustivos.

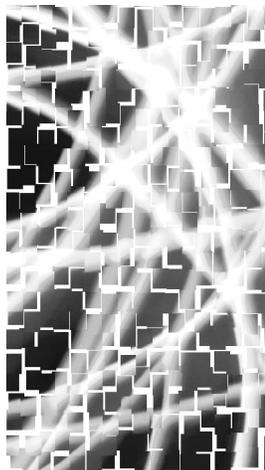
## 2. METODOLOGÍA

Cuando se tiene una serie de valores discretos, producto de haber realizado  $n$  mediciones de nivel sonoro con un determinado periodo de muestreo fijo y asumiendo que el nivel sonoro se mantiene constante dentro de cada periodo, los niveles de presión sonora fueron estimados con la siguiente ecuación:

$$\frac{Leq_A}{HorarioLeq_A} = 10 \text{ Log} \frac{\sum_{i=1}^N 10^{\frac{Li}{10}}}{N}$$

en la cual,  $Li$  es el nivel sonoro continuo equivalente obtenido en cada una de las mediciones hechas en el respectivo turno y  $N$  el número de mediciones que se hicieron en el punto, en el respectivo turno.

El horario escogido para las mediciones fue desde las 6:00 a.m. hasta las 6:00 p.m. durante 7 días de la semana, aunque según la resolución 627/2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, esta franja ha sido establecida entre las 7:01 a.m. y las 9:00 p.m. El horario de medición se seleccionó con base en que el equipo de muestreo no contó con los rubros suficientes para garantizar la seguridad. El equipo utilizado para la medición fue un sonómetro marca QUEST (tipo II) con su respectivo calibrador, propiedad de la Universidad Nacional de Colombia. De acuerdo con el tiempo de medición establecido, se obtuvieron cerca de 240 datos por día y un total de 1680 mediciones en todo el programa de monitoreo. Con esta



información, se calculó el LEQD de cada punto de medición que representa el valor del ruido promedio durante la franja horaria diurna. Debido a que el muestreo previo realizado para el área urbana del municipio de Medellín fue tomada a una altura de 1.5 m, se decidió conservar esta misma altura de medición.

### Kriging poligonal

El kriging Poligonal (KP) es la herramienta que se utiliza para caracterizar globalmente el nivel de ruido ambiental en cada una de las franjas horarias.

El objetivo es estimar el valor medio de la variable  $\overline{RA}_{LEQD}$  y su correspondiente varianza de estimación  $\sigma_{LEQD}$  con un procedimiento similar al de kriging ordinario de bloques, para lo cual existe abundante literatura. El objetivo de la estimación fue encontrar un conjunto de pesos  $\lambda_i$ , correspondientes a la superficie de intersección entre una celda vi centrada en ci y el polígono (cobertura del barrio), donde se deben imponer dos condiciones:

1. Que no ocurra un error sistemático, es decir, que el error promedio sea cero, o sea que  $\sum \lambda_i = 1$  y

2. Que la varianza del error sea mínima (óptima)

$$\overline{RA}_{LRQD} = \sum \lambda_i R_i$$

$$\sigma_{RA}^2 = \text{Var}[RA^* - RA] \text{ mínima}$$

RA\* = Ruido Ambiental estimado

RA = Ruido Ambiental Real

Para encontrar los valores de los  $\lambda_i$ , es necesario plantear un sistema de n+1 ecuación con n+1 incógnita, lo cual garantiza una solución única. Para resolver el problema fue necesario usar una notación matricial, donde se introduce un multiplicador de lagrange para garantizar la minimización de la varianza.

$$\begin{bmatrix} C_{\alpha\beta} & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_i \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\alpha 0} \\ 1 \end{bmatrix}$$

0 = centro del polígono donde se estima RA.

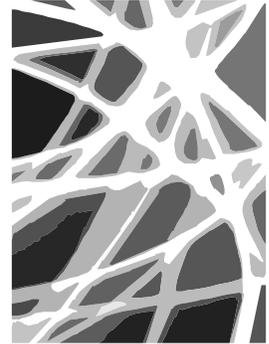
$C_{\alpha\beta}$  = Covarianza entre cada uno de los valores experimentales de RA.

$C_{\alpha 0}$  = Covarianza entre los valores experimentales y el punto de estimación sobre el polígono.

$\lambda_i$  = Pesos a ser estimados a ser calculados.

$\mu$  = Multiplicador de Lagrange.

El error de estimación (Varianza mínima) se puede calcular utilizando la siguiente expresión:



$$\sigma^2_{\overline{RA}} = C_{00} \lambda_i C_{\alpha 0} - \mu$$

Resumiendo, la estimación poligonal consiste en estimar el valor promedio de la variable regionalizada y su varianza sobre cada campo (polígono). Este promedio constituye una magnitud global, pues sería calculable si la realidad fuera conocida exhaustivamente. El principal aporte de esta técnica es la toma en cuenta de la posición de las observaciones y de la estructura espacial de la variable estudiada en el cálculo de una varianza de estimación global.

**Sistema de clasificación geoestadística del nivel de ruido ambiental.**

Se propone una tabla de categorización geoestadística del RA (tabla 1), de acuerdo con la medida del error relativo del ruido estimado  $\frac{\overline{RA}_{95}}{\overline{X}}$ . Para definir el error relativo del  $\overline{RA}$  estimado,

se multiplica la desviación estándar relativa  $\frac{\sigma_{\overline{RA}}}{\overline{RA}}$ , por un «Factor de Student (t)», el cual es estimado para un 95% de confianza, dependiendo del número de muestras tomadas en campo.

$$\frac{\overline{RA}_{95}}{\overline{X}} = \frac{\sigma_{\overline{RA}}}{\overline{RA}} * t * 100$$

**Tabla 1. Sistema de clasificación del ruido estimado con técnicas geoestadísticas**

Error Relativo (95%) $\frac{\overline{RA}_{95}}{\overline{X}}$	Categoría de Ruido Estimado
0-10	Probado
10-20	Probable
>20	Posible

Debido a que las técnicas geoestadísticas no solo aportan el valor estimado, sino también el error cometido, el sistema de clasificación propuesto se puede aplicar tanto para estimaciones globales como locales. Se define en la categoría de ruido estimado probado aquel en el cual el error relativo no supera el 10 %, ruido estimado probable cuando el error relativo estimado está entre un 10- 20 % y ruido estimado posible; si el error relativo supera el 20%.

**3. RESULTADOS**

El barrio El Poblado en el municipio de Medellín es considerado, según los usos del suelo, como un sector de actividad múltiple, donde se permiten locales de tipo comercial, almacenes, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos, etc. Un sector que cumple con estas características es considerado según la resolución 0627/2006 como un sector tipo C con nivel máximo permisible de ruido diurno de 70 dB(A). Con los valores obtenidos en el muestreo realizado por la Universidad Nacional de Colombia y el Politécnico Jaime Isaza Cadavid, para el área urbana del Municipio de Medellín, se obtuvieron, teniendo en cuenta rangos de influencia de 0, 400 y 800 metros, valores de 70, 69 y 68 dB(A) respectivamente, como se observa en la tabla 2.

El error relativo para un vecindario de 400 y 800 metros corresponde al mismo valor, que lo ubica dentro de la categoría de Probado (ver tabla 1). Para efectos de optimización, la mejor estrategia es tomar 10 muestras con un radio de influencia de 400 metros para monitorear el RA, que 26 muestras en un vecindario de 800 m. Es decir, se acepta un valor de 69 dB(A) con un intervalo de confianza entre 68-70 dB(A).

BARRIO		Vecindario =0 m.	Vecindario=400 m.	Vecindario=800
$Z^*$	POBLADO	70	69	68
$\sigma/Z^*$		0.03	0.01	0.01
CORR. Z/Z*		0.9	1	1
Nº MUESTRAS		1	10	26
$\frac{R_i}{X} * 100$		-	2%	2%

Tabla 2. Valores estimados de ruido, coeficientes y número de muestras con diferente rango de influencia en el barrio Poblado.

Por otro lado, el barrio Lalinde cumple con las condiciones, según los usos del suelo, de ser un sector residencial. La Resolución (0627/2006) ubica este tipo de uso en la categoría B. Un sector con esta clasificación es considerado una zona de tranquilidad y ruido moderado donde el uso del suelo es apto para ser dedicado a zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo habitacional, hotelería y hospedajes. Los resultados obtenidos en este estudio de monitoreo del RA para este barrio, están reportados en la tabla 3, donde también se consideraron rangos de influencia del fenómeno RA de 0, 400 y 800 m respectivamente.

El error relativo en este caso muestra que para obtener una medida optimizada de ruido en el barrio Lalinde son necesarias la toma de 11 muestras, que permitirían clasificar el RA de este barrio en la categoría de probado.

BARRIO		Vecindario =0 m.	Vecindario=400 m.	Vecindario=800
$Z^*$	LALINDE	68	68	68
$\sigma/Z^*$		0.03	0.03	0.03
CORR. Z/Z*		0.9	1	1
Nº MUESTRAS		2	11	24
$\frac{R_i}{X} * 100$		38 %	7%	6%

Tabla 3. Valores estimados de ruido, coeficientes y número de muestras con diferente rango de influencia en el barrio Lalinde.

Según la resolución 0627/2006, para un sector de categoría B, los niveles permisibles de ruido diurno máximo son de 65 dB(A), pero los resultados obtenidos (Tabla 3) indican que el nivel de RA probado es de 68 dB(A), con un intervalo de confianza entre 64-72 dB(A).

El mapa de la figura 1 muestra los niveles de RA, con base en las muestras tomadas para el municipio de Medellín y aplicando la tecnología del Kriging Poligonal con un rango de influencia

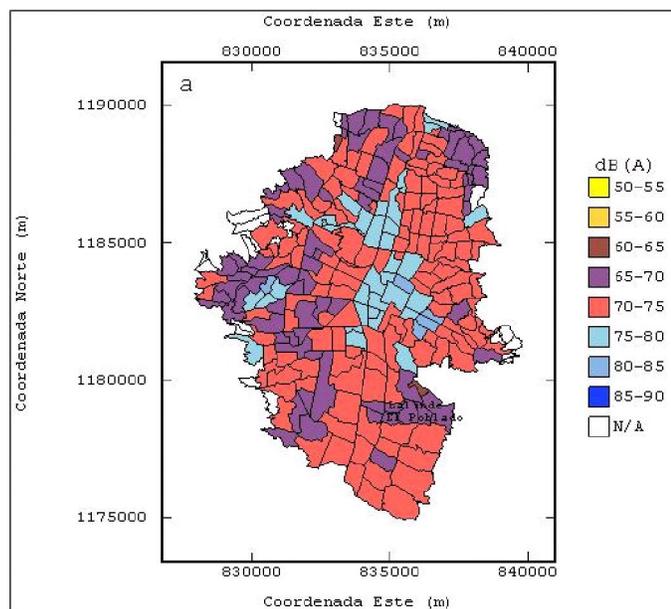


Figura 1. Mapa de ruido ambiental del área urbana del Municipio de Medellín, basado en los datos del estudio a toda el área urbana.

de 400 m. Las categorías corresponden a las establecidas en la resolución 0627/2006 y no a los intervalos de confianza del valor reportado arriba, de esta manera los valores de RA cartografiados corresponden a los valores estimados. Aquí se destacan los barrios El Poblado y Lalinde con niveles de RA entre 65-70 dB(A).

En este sentido, el Kriging Poligonal aplicado a los datos del convenio 680/2005 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá- Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid y Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín) indica que el barrio El Poblado aplica como un sector de RA intermedio restringido, mientras que el barrio Lalinde; considerado de uso residencial, no aplica para los niveles de ruido permisibles en la resolución 0627/2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

El muestreo de los 16 puntos en los barrios de Lalinde y El Poblado, llevado a cabo con el fin de realizar monitoreo del RA, sirvió para verificar cómo seguían las condiciones encontradas en el estudio previo para toda la zona urbana del Municipio de Medellín. El muestreo arrojó como resultado los valores que se observan en la tabla 4. Es importante aclarar que el diseño del experimento para la toma de muestras fue basado en la estadística y no en la geoestadística, debido a que no se contó con la técnica de trabajo aplicada a la cobertura poligonal de los barrios al momento de la realización del muestreo.

**Tabla 4. Valores estimados de ruido, coeficientes y número de muestras con diferente rango de influencia en el barrio El Poblado y Lalinde.**

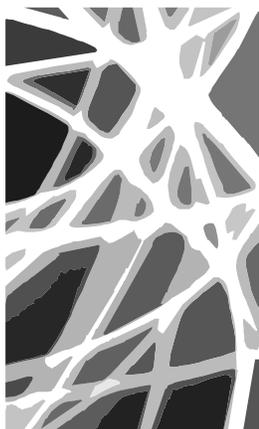
BARRIO	Z*	$\sigma/z^*$	CORR. Z/Z*	Nº MUESTRAS	$\frac{R_i}{\bar{X}} * 100$
El Poblado	67	0.02	1	14	4%
Lalinde	70	0.03	0.9	2	38%

Estos valores son positivos en el caso de El Poblado, dado que indican que está disminuyendo el nivel de RA y presenta valores ahora dentro de la norma según la Resolución 0627/2006.

Considerando que el nivel de RA está normalmente distribuido en el área urbana del municipio de Medellín e involucrando la desviación estándar del valor estimado (error kriging), los niveles de ruido para este ejercicio de monitoreo podrían variar para el barrio El Poblado entre 65 y 69 dB(A), lo cual indica un nivel de RA aceptable. En el caso de Lalinde, en esta fase de monitoreo, se obtuvo un valor de RA de 70 dB(A), con un intervalo de confianza de  $\pm 4$  dB(A) y un error relativo que clasifica este nivel de ruido en la categoría de posible, indica que con solo 2 muestras tomadas, no es posible evaluar el nivel de ruido de este barrio. En este último caso, el no cumplimiento de la norma obliga a que se ubique en un estado de alerta, dado que sus niveles están por encima del permitido. Utilizando la desviación estándar de la varianza kriging, el barrio Lalinde podría tener sus valores cercanos a 66 dB(A) en el mejor de los casos y a 74 dB(A) en caso contrario.

La figura 2 muestra el rango de ubicación para el monitoreo del RA de cada uno de los barrios en estudio. Los resultados obtenidos con base en las medidas tomadas para el programa de monitoreo indican que el barrio El Poblado continúa con los niveles de ruido ambiental evaluados con los datos del proyecto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Al contrario, el barrio Lalinde (de uso residencial), en este proceso de monitoreo, ha quedado ubicado en el rango de 70 a 75 dB(A) cuando su máximo valor permisible es de 65 dB(A).

El error relativo generado para El Poblado según el muestreo de los 16 puntos, lo ubica dentro de la categoría de probado. El error relativo del 38% atribuido a Lalinde lo ubica dentro de la categoría de posible según se observado en la tabla 4. En el segundo caso, el resultado no es confiable por el elevado error relativo, y este aspecto indica que se deben tomar más muestras que ayuden a definir los mecanismos de control de la contaminación ambiental.



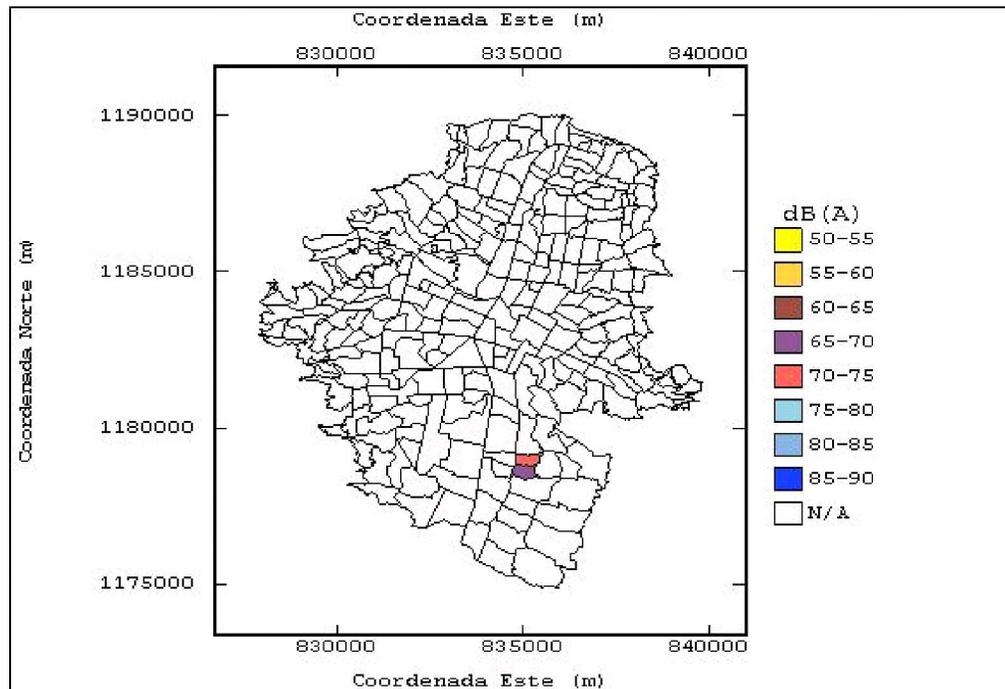


Figura 2. Mapa de ruido de los barrios Lalinde y El Poblado.

#### 4. CONCLUSIONES

1. Se aplicó la técnica del Kriging poligonal para la realización de mapas de ruido ambiental, teniendo en cuenta tamaños de muestras pequeñas.
2. El principal aporte de esta técnica es la toma en cuenta de la posición de las observaciones y de la estructura espacial de la variable estudiada en el cálculo de una varianza de estimación global. Para la evaluación se trabajó con polígonos irregulares correspondientes a los barrios El Poblado y Lalinde del área urbana del municipio de Medellín.
3. Los resultados obtenidos, en esta fase de monitoreo indican que el barrio El Poblado continúa con niveles de ruido ambiental característicos de sectores tipo con niveles sonoros permisibles hasta de 75 dB(A). Para un nivel de confianza del 95%, el error relativo del 4% permite considerar el valor de ruido estimado en 67 dB(A) en la categoría de probado. El barrio Lalinde, considerado de uso residencial, mostró un error relativo del 38%, para un nivel sonoro de 70 dB(A), que no da alta seguridad para emprender programas de control antes de proceder a tomar nuevas muestras.
4. La metodología implementada en este estudio podrá servir de referencia a las autoridades ambientales para definir futuros programas de monitoreo sobre sectores de la ciudad susceptibles de contaminación por ruido ambiental utilizando muestras de tamaño pequeño.
5. Se define en la categoría de ruido estimado probado aquel en el cual el error relativo no supera el 10%, ruido estimado probable cuando el error relativo estimado está entre un 10- 20% y ruido estimado posible; si el error relativo supera el 20%.

## AGRADECIMIENTOS

Este artículo es una contribución al proyecto 6586 de la DIME: «Elaboración de los Mapas de Ruido Ambiental Urbano».

## REFERENCIAS

- ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ, 2007. Proyecto de elaboración de los mapas acústicos para los municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Chilés, J., Delfiner, P., 1999. Geostatistics Modeling Spatial uncertainty: Wiley Series in Probability and Statistics. United States of America.
- Jaen, S., 2008. Ajuste de distribuciones de probabilidad con el programa estadístico R. Universidad Nacional de Colombia. Escuela de informática Facultad de Minas – Simulación de sistemas. pp. 1- 8
- Sánchez, L., 2007. Análisis Geoestadístico de la información acústica y de monóxido de carbono del Municipio de Medellín: Informe técnico, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas, 40 P.
- Yepes, D., Gómez, M., Sánchez, L., et al, 2009. Metodología de elaboración de mapas acústicos como herramienta de gestión del ruido urbano, caso Medellín: Revista Dyna No 76(158), pp 29-40.

