

METODOLOGÍA DE ELABORACIÓN DE MAPAS ACÚSTICOS COMO HERRAMIENTA DE GESTIÓN DEL RUIDO URBANO - CASO MEDELLÍN

ACOUSTIC MAP MAKING METHODOLOGY AS A TOOL FOR URBAN NOISE HANDLING – MEDELLÍN CASE

DORA L. YEPES

Grupo de Higiene y Gestión Ambiental, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, doraluz.yepes@gmail.com

MIRYAM GÓMEZ

Grupo de Higiene y Gestión Ambiental, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, miryamgomezmarin@gmail.com

LUIS SÁNCHEZ

Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, lhsanche@unal.edu.co

ANA C. JARAMILLO

Grupo de Higiene y Gestión Ambiental, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, anacatajara@gmail.com

Recibido para revisar marzo 3 de 2008, aceptado septiembre 24 de 2008, versión final noviembre 27 de 2008

RESUMEN: Dada la naturaleza de la variable ruido y su variabilidad espacio – temporal, se tomó como base fundamental la aplicación de la metodología Geoestadística para la predicción y valoración de la distribución del ruido en las zonas de estudio del proyecto “Elaboración del Mapa Acústico para el Municipio de Medellín”, realizado en el año 2006, mediante Convenio 680 de 2005, entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, con la participación de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Con base en esta metodología se concluyó que Medellín presenta un nivel de ruido diurno global de 73dB(A), indicando que su zona urbana tiene niveles de ruido apropiados solo para sectores industriales. De igual manera en la noche, se presenta un nivel de ruido global de 68 dB(A), apropiado solo para el mismo tipo de sector.

PALABRAS CLAVE: Ruido, Mapa Acústico, Geoestadística.

ABSTRACT: Based on the nature of the noise variable and its space-temporal variability, it was taken into account the application of Geostatistical methodology for the prediction and assessment of the distribution of noise in the zones of study of the Project entitled "The Making of the Acoustic Map for the Municipality of Medellin" was carried out in the year 2006, by means of the Agreement 680 as of 2005, between the Metropolitan Area of the Aburrá Valley and the 'Jaime Isaza Cadavid' Colombian Polytechnic. For its execution, the National University of Colombia, Medellin Branch also participated in it. Based on this methodology, it can be concluded that Medellin has a Global Daytime Noise Level of 73 dB(A), which shows that its Urban Zone has appropriate Levels of Noise just for Industrial Sectors. Likewise at Night, the Global Noise Level reaches 68 dB(A), also be appropriate for the same type of sector.

KEYWORDS: Noise, Acoustic Map, Geostatistics.

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de los Niveles de Ruido para el municipio de Medellín, hace parte del Plan Integral de Desarrollo Metropolitano del Valle de Aburrá [1], teniendo en cuenta que:

“...la contaminación atmosférica, de aguas y de suelos y sus efectos sobre la salud y el bienestar...”, son problemas ambientales identificados en los P.O.T's recientemente elaborados que ameritan atención prioritaria, según lo planteado en la dimensión ambiental. Así mismo, se reconoce en el documento en referencia que:

“... al analizar la evolución de la contaminación del aire y el aumento de los niveles de ruido, se advierte su conexión con el uso del transporte automotor pensado como el único medio para resolver problemas de tráfico, potenciando para el área infraestructuras viales circunvalares, junto con la desaparición de separadores de vías, ampliación de vías suprimiendo zonas verdes aledañas, etc., con todo lo cual se está dejando de lado la posibilidad de organizar la ciudad para el beneficio de sus pobladores, lo cual desfavorece los desplazamientos peatonales y la posibilidad que estos ofrecen de incrementar valores vinculados al disfrute de la ciudad por sus habitantes”.

El proyecto fue diseñado y ejecutado a través del convenio 680 de 2005 suscrito entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín como parte del Plan de Acción de los Grupos de Investigación en Higiene y Gestión Ambiental GHYGAM y Grupo GEMA, los cuales propenden por el desarrollo y la aplicación del conocimiento en el área ambiental, para contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de las personas, mediante la preservación y la conservación de los ecosistemas urbanos y rurales.

Hasta ahora las universidades locales y las autoridades municipales y regionales, han

realizado estudios puntuales de Ruido, con diversos sustentos metodológicos, mas con el objeto de determinar el cumplimiento de la reglamentación colombiana, que de desarrollar propuestas metodológicas propias, siendo este el primer estudio de Ruido que se desarrolla cubriendo toda el Área Urbana del Municipio de Medellín.

El estudio es cofinanciado en consonancia con las necesidades del Municipio y del Área Metropolitana del Valle de Aburrá como una Ecorregión, y obedece a la solicitud expresa de esta entidad de “Elaborar los Mapas Acústicos para los Municipios de la Jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá”, acorde con las condiciones locales.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de la investigación fue elaborar la Línea Base del Ruido Ambiental en la zona urbana del Municipio de Medellín, Departamento de Antioquia. Bajo este propósito, se busco específicamente:

- Evaluar los Niveles de Ruido en el Área Urbana del Municipio, utilizando técnicas de modelación y simulación geoestadística.
- Elaborar el Mapa Acústico representativo del Área Urbana del Municipio, como parámetro inicial para facilitar la gestión del ruido y el ajuste de planes de ordenamiento territorial de parte de las autoridades ambientales.

3. METODOLOGÍA UTILIZADA

Teniendo en cuenta que el ruido en los ambientes externos es fluctuante y procede de fuentes diversas y que hay limitantes de obtención de información de toda el área objeto de estudio, se ha utilizado la Geoestadística como herramienta para obtener valores representativos de los niveles de ruido en dicha área para hacer estimaciones, predicciones y simulaciones del comportamiento de esta variable.

A continuación se presenta el diseño experimental del proyecto:

Para determinar el número de puntos de evaluación de los niveles de ruido se consideran dos criterios:

- Un criterio técnico basado en la experiencia de los modelos geoestadísticos, que considera que el número mínimo necesario de puntos para representar adecuadamente la distribución espacial de una variable determinada es 50 [2]
- Un segundo criterio parte de la delimitación geográfica del área objeto de estudio y a partir de la magnitud de dicha área se define un número de cuadrículas regulares para realizar la evaluación en cada una.

Con base en las cartografías digitales suministradas por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, se delimitó el área objeto de estudio la cual cubrió una extensión de 66.88 km² (el área urbana tiene una extensión de 101.65 Km²), comprendidos al oriente por la Carrera 9, al occidente por la Carrera 115A, al norte por la Calle 121 Sur y al sur por la Calle 20C Sur.

El área objeto de estudio fue dividida en casillas cuadradas de 400m de lado y en el centro de cada una de ellas se definió un punto de medición, para un total de 418 puntos. Por razones metodológicas, los puntos de medición se agruparon en 60 zonas de trabajo: 58 zonas con siete (7) puntos de medición cada una y dos (2) zonas con seis (6) puntos cada una.

Se definieron tres (3) turnos de medición así: 06:00 - 14:00, 14:00 - 22:00 y 22:00 - 06:00. La unidad de muestreo fue la casilla y en cada una de ellas se hicieron seis (6) mediciones del ruido por turno, repitiéndolas durante cuatro (4) días, para un total de 72 mediciones por casilla y 30096 en el área objeto de estudio. El Trabajo de campo se realizó entre los meses de enero y agosto de 2006. A partir de esta información se caracterizó el comportamiento del ruido por punto, tanto para el horario diurno como para el nocturno.

Con base en los parámetros señalados se construyó un polígono definido por las coordenadas del área de estudio y buscando una mejor distribución espacial de los puntos de medición, se tomó como origen una de las coordenadas para construir una malla de puntos conformada por los centros de las casillas determinadas, lográndose una distribución espacial óptima sin alterar la cantidad de puntos, 418.

Para la ubicación de los puntos de medición, se hizo un recorrido del área durante tres (3) días, con el fin de determinar la localización exacta de cada uno de los puntos definidos por el Modelo Geoestadístico. En la Figura 1 se ilustra la distribución espacial de estos puntos para el área urbana del municipio de Medellín.

Finalmente, para realizar el análisis de los datos el área de estudio se agrupó en las seis (6) zonas geográficas en las cuales se divide el municipio: zona Nor-oriental, nor-occidental, centro-oriental, centro-occidental, sur-oriental y suroccidental.

En cuanto a la metodología para la realización de las mediciones se tuvieron en cuenta las siguientes variables:

- **Método de medición.** El método de medición siguió las recomendaciones de las Normas Técnicas Colombianas NTC 3520-3521-3522-3428 [3], no obstante, dado que la fecha de inicio del estudio correspondió a enero 2006 y aun no había sido emanada la Resolución 0627 de 2006, del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, solo se tomaron algunos lineamientos de esta norma como referencia
- **Estrategia de Medición.** En cada una de las 418 casillas se midieron: el Nivel Sonoro Continuo Equivalente L_{Aeq} , el Nivel de Presión Sonora Máximo (L_{Max}), el Nivel de Presión Sonora Mínimo (L_{Min}), y el Nivel de Presión Sonora Pico (L_{Peak})

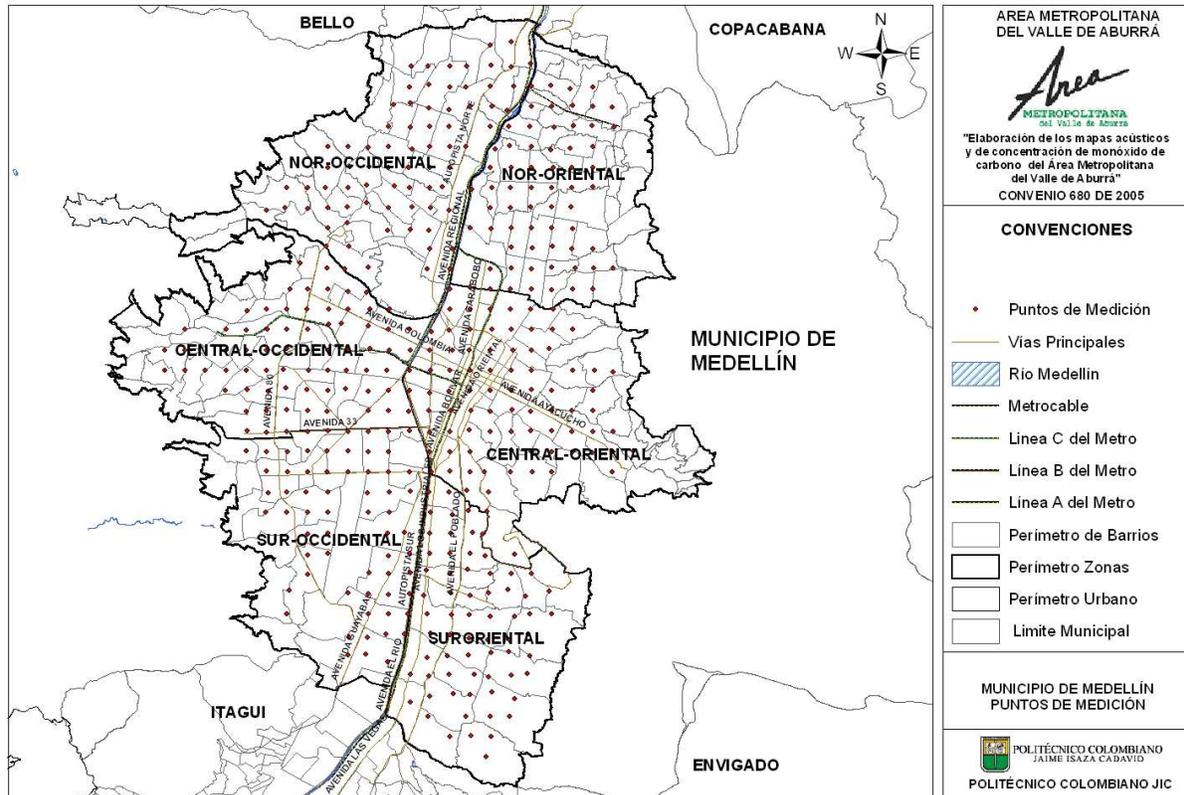


Figura 1. Distribución espacial de los puntos de medición de ruido para el área urbana del municipio de Medellín– Antioquia – Colombia. 2006

Figure 1. Spatial distribution of noise measuring points for urban area of Medellín Municipality – Antioquia – Colombia. 2006

- **Tiempos de medición.** Con el fin de obtener información más representativa de la situación real, cada una de las evaluaciones se hizo por períodos de 60min y los datos fueron registrados cada diez minutos, procediendo luego a promediar los valores obtenidos. Para los desplazamientos de un punto a otro e instalación de los equipos, se requirieron 10min adicionales, lo cual implicó que en total cada evaluación requiriera 70min en promedio.
 - **Tiempo total de medición.** Diariamente fueron evaluados 7 puntos en cada turno. Para el estudio se contó con dos equipos (sonómetros), lo que permitió evaluar 14 puntos diariamente, por turno; para un total 80 días de medición en 418 puntos.
 - **Equipos utilizados.** Dos sonómetros Quest, Modelo 2900 y un sonómetro SoundPro SE/DL Tipo 2, con micrófono unidireccional y tres calibradores Modelo QC - 10 / QC - 20.
- Para la generación de los mapas temáticos de la zona de estudio se utilizó el software Geomedia Profesional 6.0, incorporándole la información cartográfica básica de límites municipales, barrios y comunas por municipio, estratos socioeconómicos, usos del suelo, zonas urbanas y puntos de medición. Para la salida de los mapas, se utilizó el formato ShapeFile (Formato nativo del software ArcGIS) y se diseñó y construyó una base de datos para la administración de la información y el acceso a reportes automáticos requeridos por los análisis geoestadísticos.

Dada la naturaleza de la variable ruido y su variabilidad espacio – temporal, se tomó como base fundamental la aplicación de la metodología geoestadística para la predicción y valoración de la distribución del ruido en las zonas de estudio, como a continuación se detalla: Se elaboró un análisis estructural (el cual es el nombre dado en geoestadística al análisis variográfico) con el fin de identificar el modelo variográfico óptimo representativo sobre el área urbana del municipio de Medellín. Posteriormente se utilizaron dos técnicas de modelación geoestadística puntual [2]: Kriging Ordinario Puntual (lineal) y Kriging Indicador (no lineal), el primero, provee a partir de una muestra de puntos distribuidos de forma regular o irregular, valores estimados de aquellos sitios donde no hay información, asumiendo que no hay variación en los datos; el segunda técnica (no lineal), brinda la posibilidad de obtener más información que la primera en presencia de datos extremos, es decir, no arroja el dato puntual sino, sino que permite elaborar mapas de probabilidad amarrados a determinados niveles de ruido crítico (Cut-Off), es decir, determina la probabilidad de que en cada punto se cumpla o no una condición. Por ejemplo, la probabilidad de que se presente ruido mayor a los 80 dB(A) en una zona. A través de esta técnica se elaboraron mapas de probabilidad, teniendo en cuenta los estándares de ruido establecidos en la Resolución 0627 del 7 de Abril de 2006. Adicionalmente se procesaron 50 simulaciones condicionadas utilizando el Método de Bandas Rotantes [4] cuyo promedio fue considerado como una realidad relativa, éste sirvió como parámetro de conciliación respecto a los datos obtenidos con los métodos de modelación arriba mencionados. Para llevar a cabo la fase de modelación y simulación geoestadística, se procedió al diseño de una malla de estimación de 212km², la cual interceptada con la cobertura urbana del municipio de Medellín, permitió estimar alrededor de 3 millones de puntos.

Por último, con el fin de valorar el nivel global de ruido y establecer un nivel de confianza de los resultados obtenidos, se aplicó la técnica geoestadística de varianza de estimación global o de kriging poligonal [5].

Teniendo en cuenta que en cada uno de los puntos de medición se hicieron varias

mediciones del Nivel Sonoro Continuo Equivalente L_{eqA} , se estimaron promedios empleando la ecuación (1) incluida en la Resolución 0627 de 2006, del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [6], la cual se aplicó tanto a los horarios (día y noche) como a los turnos.

$$\frac{Leq_A}{HorarioLeq_A} = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}}}{N} \quad (1)$$

En la cual, L_i 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.

4. RESULTADOS

4.1 Niveles De Ruido Por Jornada

En general, en ambas jornadas de medición el ruido predominante en la ciudad es mayor a los 65 dB(A), con mayor criticidad en la línea del río Medellín en donde los niveles oscilaron entre los 70 y 80 dB(A).

Durante el día los niveles de ruido predominantes oscilan entre 65 y 80 dB(A) y en la noche entre 65 y 76 dB(A), no obstante en el sector nor-oriental de la ciudad, se alcanzan niveles hasta de 80 dB(A); en la noche, en esta zona se localizan entre otros, el sector de Manrique, el centro tradicional de tango, el Parque Norte, el Jardín Botánico y la Universidad de Antioquia. Estos comportamientos se pueden observar en las Figuras 2 y 3. En el primer esquema se puede apreciar que durante el día los colores azules claros y oscuros que corresponden a los niveles de ruido mayores de 75 dB(A) predominan casi a todo lo largo de la autopista sur (carrera 50), en esta jornada el punto mas crítico de ruido es el sector del Tricentenario entre las autopistas sur y norte de la ciudad con niveles de ruido promedios entre 80 a 85 dB(A). De igual manera predominan los niveles de ruido alto en esta jornada en los sectores de Caribe, Altamira, el Progreso, Cerro el Volador, Robledo, la Facultad de Minas de la Universidad Nacional

de Colombia -sede Medellín, avenida Ayacucho, Bomboná, Buenos Aires y Caicedo principalmente.

En la noche (figura 3) los niveles de ruido bajan en toda la ciudad, a excepción de los sectores de la Cuarta Brigada, Nueva Villa de la Iguaná y Carlos E Restrepo ubicados en la zona noroccidental. Durante esta jornada los niveles máximos de ruido se presentan principalmente en los sectores centro occidente y centro-oriente con niveles mayores a los 70 dB(A)

Analizando el comportamiento del ruido en el Municipio con respecto a los usos del suelo definidos en el P.O.T. y los Niveles Máximos Permisibles (NMP) correspondientes, se puede decir que según la Resolución 0627 de 2006, se están excediendo los límites máximos tanto en el día como en la noche en todo el Municipio, a excepción del ruido nocturno que se presenta en las zonas sur y centro oriental de la ciudad con usos de suelo destinados para la producción de gran empresa

En la Tabla 1 se relacionan los niveles máximos permisibles (NMP) establecidos por la norma vigente y en la Figura 4 se presentan los usos del suelo según el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del Municipio de Medellín.

Tabla 1. Niveles máximos permisibles de ruido ambiental para los usos del suelo en Medellín – Antioquia – Colombia. 2006

Table 1. Environment Noise Maximum Permissible Levels for soil use in Medellín - Antioquia – Colombia. 2006

Uso del Suelo	NMP Día dB(A)	NMP Noche dB(A)
Salud, Ciencia y Tecnología	55	45
Residencial	65	50
Equipamientos Generales (Institucional)	65	50
Producción de Gran Empresa (Industrial)	75	70

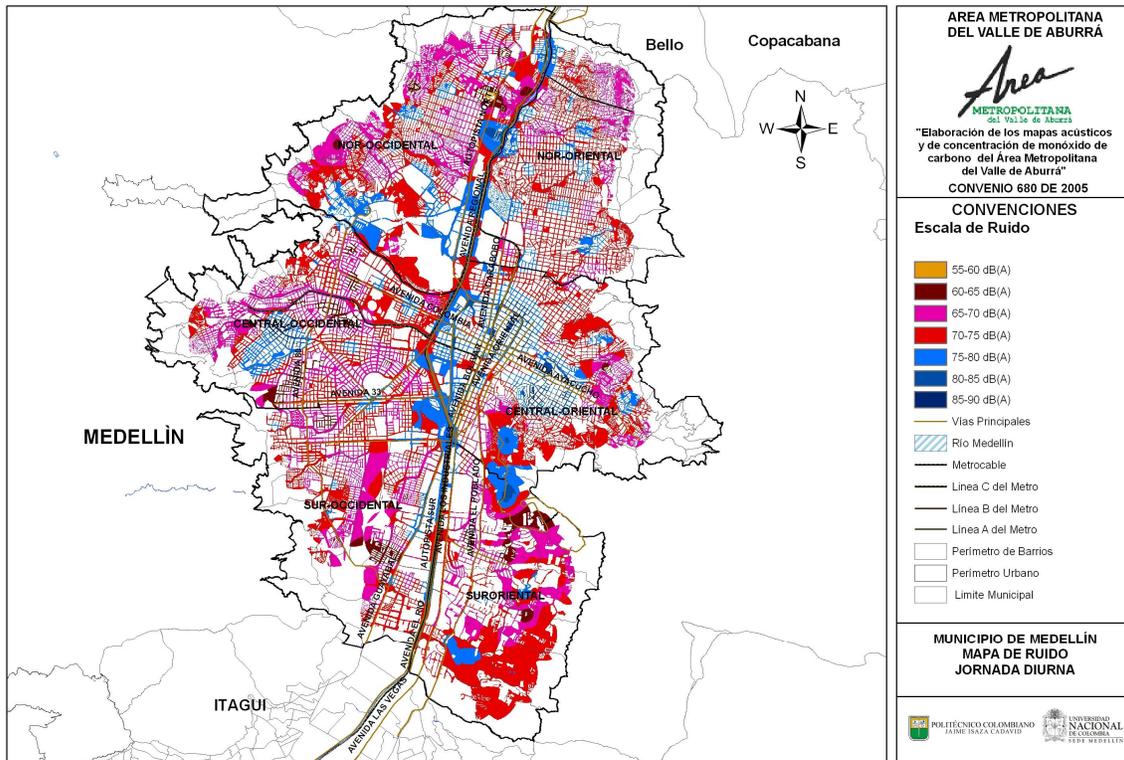


Figura 2. Mapa Ruido Día Municipio de Medellín – Antioquia – Colombia. 2006
Figure 2. Day Noise Map Medellin Municipality -Antioquia – Colombia. 2006

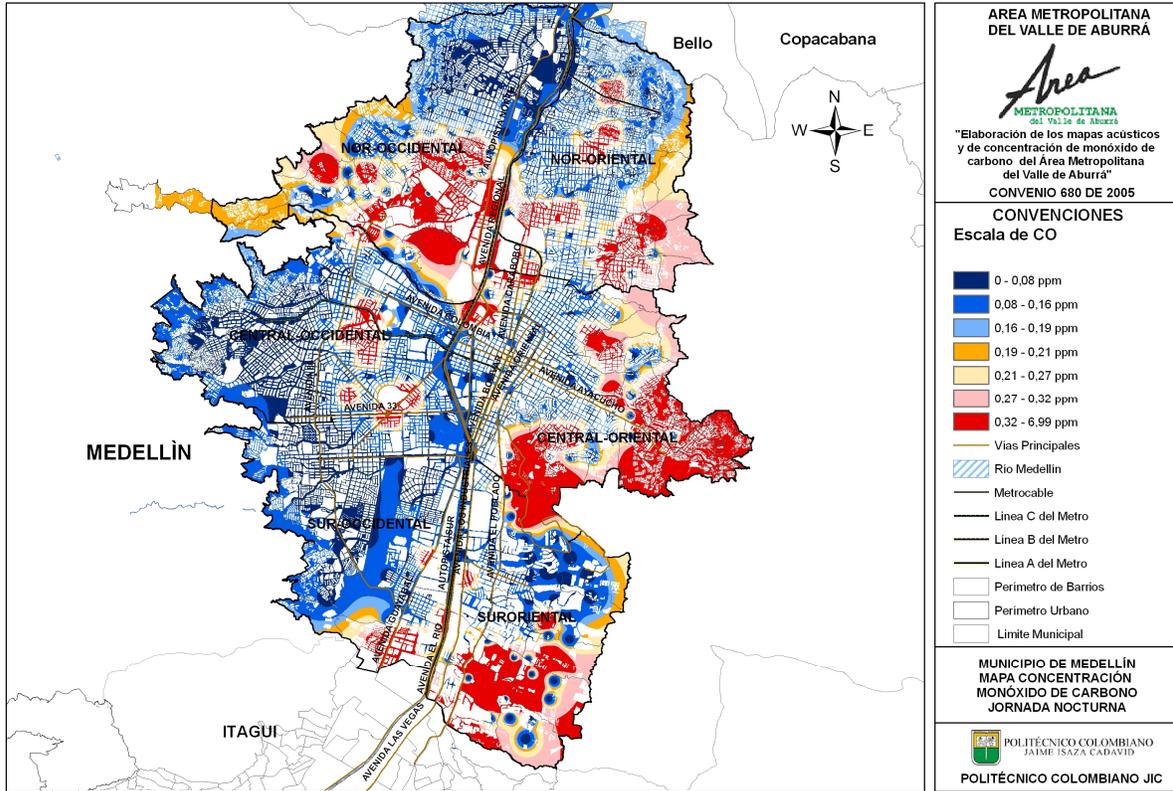


Figura 3. Mapa Ruido Noche Municipio de Medellín - Antioquia – Colombia. 2006
Figure 3. Night Noise Map Medellin Municipality - Antioquia – Colombia. 2006

4.2 Análisis Estadístico De Los Niveles De Ruido

- Franja Diurna

Para el análisis descriptivo se tuvieron en cuenta 417 datos de la localización espacial de las muestras en el horario diurno; de acuerdo con los registros de campo, más del 50% de los datos de la zona urbana del Municipio de Medellín reportan niveles de ruido superiores a 72 dB(A). El comportamiento gaussiano de los datos se refleja, cuando a simple vista miramos las estadísticas descriptivas. Los valores de media y mediana, son del orden de 72 dB(A), el coeficiente de sesgo (Skewness=0.21) tiende a cero y la Kurtosis toma un valor de 3.1. Gráficamente se pueden apreciar estos resultados a través del histograma de los datos. Ver figura 4

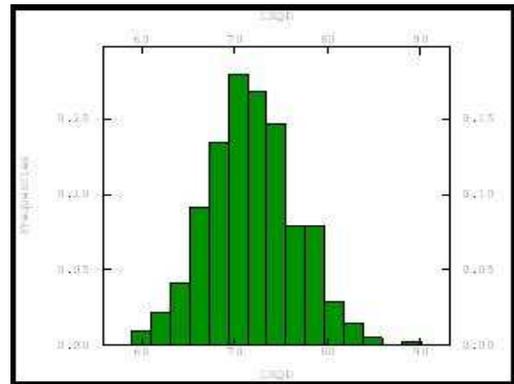


Figura 4. Histograma de datos para la jornada diurna. Municipio de Medellín –Antioquia– Colombia. 2006

Figure 4. histogram for day – Medellín Municipality – Antioquia – Colombia. 2006

- Franja Nocturna

En la franja horaria nocturna más del 50% de los datos reportan niveles de ruido superiores a 68 dB(A). Las distribución de los datos también muestran tendencias a estar normalmente distribuidos, el coeficiente de sesgo alcanza un valor de 0.72 y la kurtosis de 4.2, la media y la mediana toman valores de 68 dB(A).

Adicionalmente, comparando el día con la noche, Las partes (b) y (c) de la figura siguiente muestran los histogramas para las dos poblaciones y la densidad estimada en línea continua para éstas. De acuerdo con los datos, hay una diferencia entre los niveles de ruido entre el día y la noche. El intervalo para el cociente de las varianzas entre el día y la noche es (0.5206292, 0.7650536), lo cual significa que la prueba de igualdad de varianzas dio diferencia significativa entre éstas, siendo mayor la varianza en las noches.

El boxplot ilustrado en la figura 5 (a), muestra que, efectivamente hay una diferencia entre las medias. La prueba de hipótesis para la diferencia entre las medias produjo un resultado significativo, y el intervalo de confianza para esta diferencia se calculó con la aproximación de Welch (o Satterhwaite). El resultado fue el intervalo del 95% de confianza (3.324722, 4.752017); esto es, hay una diferencia mínima del nivel de ruido entre las medias del día y de la noche de 3.324722 dB(A) y una máxima de 4.752017 dB(A). La prueba t para la diferencia entre las medias arrojó un estadístico $t = 11.1072$, con $df = 832$, grados de libertad y un valor $p < 2.2e-16$. Es decir, hay rechazo de igualdad de medias con un valor razonable de error tipo I.

La misma figura 5 (a) muestra los valores atípicos que se presentaron tanto en el día como en la noche. El nivel mínimo observado en el día fue de 59db y el máximo fue 90dB(A). Durante el día hubo otro dato atípico, éste alcanzó los 85db. En la noche, en cambio, se presentaron siete datos atípicos por encima de los 82db y un dato atípico inferior de 53db. Esto explica, en parte, la mayor variabilidad entre los turnos.

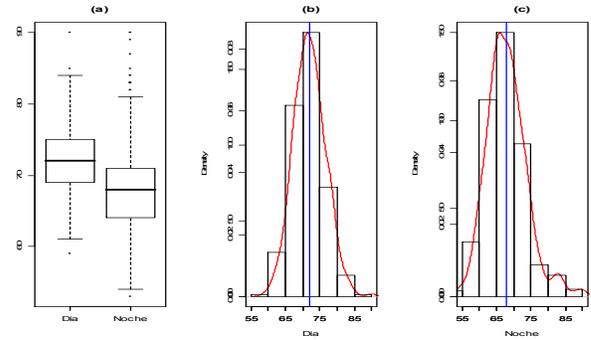


Figure 5. Boxplots e histogramas comparativos para el día y la noche

Figure 5. Comparative Boxplots and histograms for day and night

4.3 Análisis geoestadístico de los niveles de ruido

- Resultados arrojados por el método Kriging Ordinario

- Kriging ordinario franja horaria diurna

Las estadísticas de 3 millones de puntos estimados con la técnica del kriging ordinario, indican que el valor mínimo estimado es de 58 dB(A) con un promedio de 72 dB(A) y un valor máximo de 91 dB(A). Este método de estimación considerado el mejor estimador lineal es óptimo, dado que, como se anotó anteriormente los datos de campo se acomodaron a una distribución gaussiana. El percentil 25, nos está indicando que el 75% de los valores estimados tienen valores de ruido superiores a 69 dB(A), lo cual implica que la zona urbana del municipio de Medellín dispone solamente de un 25% de área compatible con zonas de tranquilidad y silencio (sector A, Resolución 0627 de 2006) y tranquilidad y ruido moderado (sector B, Resolución 0627 de 2006).

- Kriging ordinario franja horaria nocturna

Según las estadísticas, los datos estimados para esta franja horaria fueron alrededor de 4 millones de puntos, con niveles de ruido variando entre 60 dB(A) y 80 dB(A). Estos datos se muestran mucho más críticos puesto que el 95% de los datos cartografiados corresponden a niveles del ruido por encima de 70 dB(A). En este caso el percentil 25 equivalente a 63 dB(A),

indica que el 75% de los datos superan estos niveles de ruido estimados.

- **Algunos resultados arrojados por el método de Kriging indicador (ki)**

A través del Kriging Indicador podemos identificar más claramente áreas o zonas vulnerables a este tipo de contaminación ambiental. El KI es un método de modelación geoestadístico no lineal, por lo tanto permite obtener mas información que el kriging ordinario. La principal ventaja de esta técnica es que para su aplicación, los datos no tienen que estar amarrados a ningún tipo de distribución y como se menciona permite la cartografía a diferentes Cut Off.

- Kriging indicador franja horaria diurna y nocturna

Con los resultados obtenidos se elaboraron Curvas de Grado (niveles de ruido) - Proporción para los Cut Off 55 dB(A) y 60 dB(A) para la variable $L_{eqDiurno}$ y $L_{eqNocturno}$ respectivamente. Esto significa, por ejemplo, que para el nivel crítico evaluado en la noche, existe la probabilidad de encontrar un 20% de los datos con niveles de ruido superiores a 70 dB(A). Del mismo modo en el día, con nivel crítico de 60 dB(A), existe un 20% de probabilidad de encontrar valores superiores a 75 dB(A), como se muestra en la figura 6

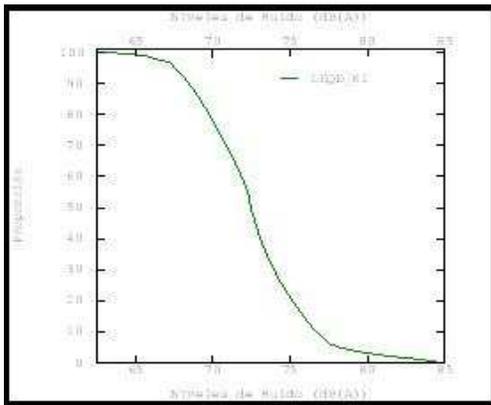


Figura 6. Curva de Niveles de Ruido (Cut Off)-
Proporción para el Horarios Diurno
Figure 6. Noise Levels Curv (Cut Off) -
Proportion for day

- **Resultados arrojados por el método de Kriging Poligonal**

Para caracterizar globalmente el nivel de ruido durante el día y la noche, se utilizó la herramienta Kriging Poligonal (KP) y según los resultados arrojados por este modelo, Medellín presenta un nivel de ruido diurno global de 73 dB(A), indicando que es una zona urbana con niveles de ruido apropiados sólo para sectores industriales. De igual manera, en la noche, el nivel de ruido global es de 68 dB(A), apropiado solo para el mismo tipo de sector.

Cabe anotar que estos resultados arrojaron errores relativos muy bajos para cada una de los horarios (2% para el día y 4% para la noche), teniendo en cuenta 417 muestras tomadas en cada uno de ellos y un 95% de nivel de confianza, lo cual significa que el ruido estimado, se califica como probado, fueron confiables y de buena calidad

- **Simulación condicionada por el método de bandas rotantes**

La estimación en Geoestadística por el Krigeage, ofrece una imagen suave o lisa de la realidad, existiendo aplicaciones en las que interesa algo más que simplemente obtener valores aproximados a una realidad desconocida, es decir, resultaría útil una representación que pueda sustituir la realidad relativa. Con tal intención se propone, la Simulación Geoestadística, a través de la cual se obtienen realizaciones con igual comportamiento espacial que la información observada en las localizaciones muestreadas.

La simulación condicional de la geoestadística reproduce los dos primeros momentos experimentales (media y covarianza $C(h)$ o Semivariograma $g(h)$) de los datos reales, así como el histograma; es decir, se reproducen las principales características de dispersión del fenómeno real de acuerdo a la información disponible.

4.4 Niveles De Ruido Por Zona Geográfica Y Usos Del Suelo

Los resultados arrojados para cada una de las zonas geográficas muestran que para casi todas las zonas y usos del suelo se está excediendo la norma permisible, a excepción de dos zonas, así:

- La zona centro-oriental clasificada con uso de suelo de Producción de gran empresa: Esta zona está ubicada básicamente en el barrio Perpetuo Socorro, la cual en las horas de la noche no sobrepasa los límites permisibles.
- La zona sur (oriente y occidente) con uso de suelo de Producción de gran empresa, pese a ser una zona caracterizada por su gran

dinamismo comercial e industrial, tampoco excede los niveles máximos permisibles tanto durante el día como de noche, esta zona está comprendida por la franja que va desde la Avenida Universidad de Medellín, paralela a la autopista sur y hasta el límite con el sector de San Fernando en el municipio de Itagüí. En la figura 7 se puede observar el mapa de usos del suelo según el Plan de Ordenamiento Territorial [7].

En la Tabla 2 se relacionan las zonas, el uso del suelo asignado según el POT municipal y los niveles hallados en cada una., donde puede constatare en comparación con la tabla 1 que las zonas descritas anteriormente son las únicas que no exceden los niveles máximos permisibles de ruido ambiental.

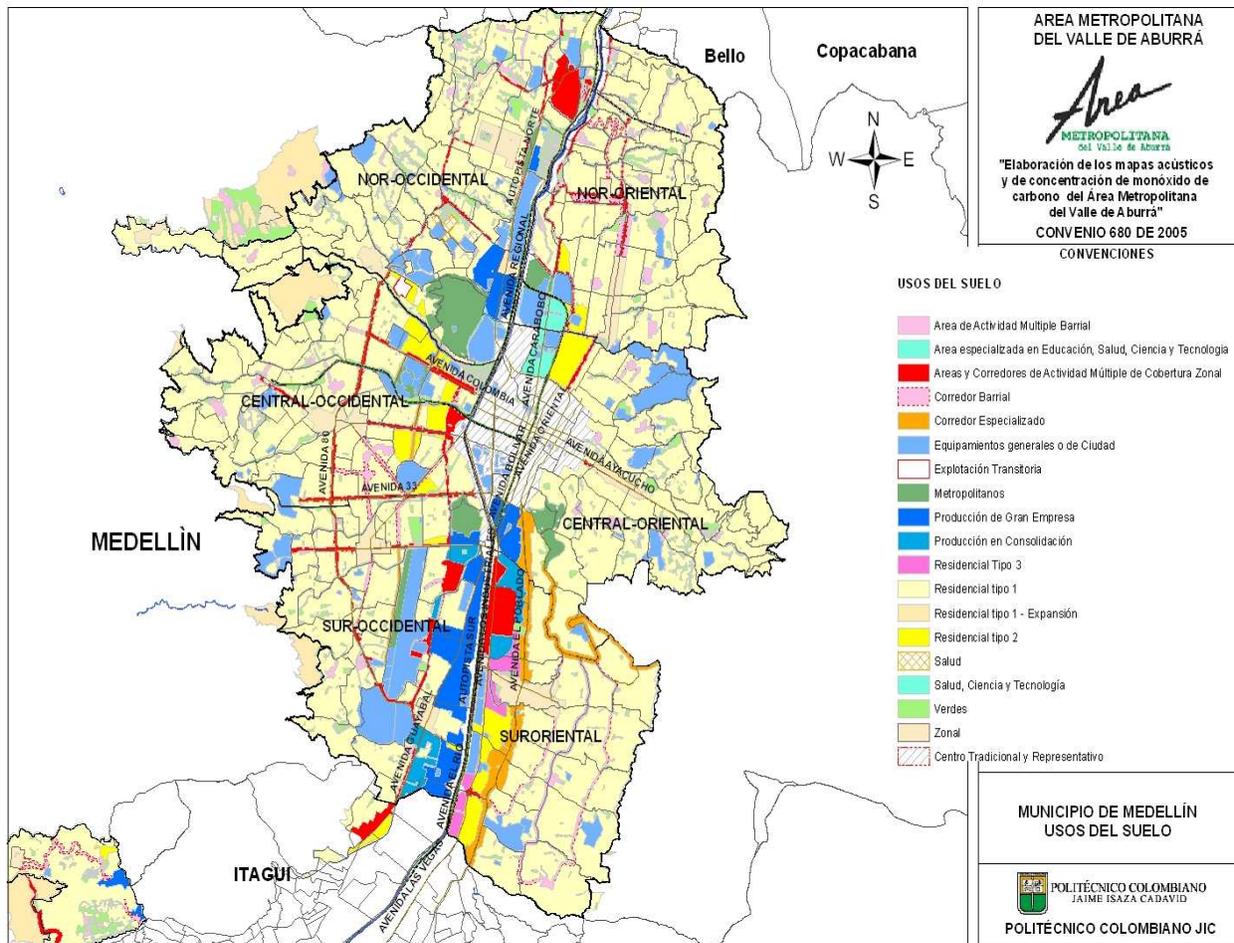


Figura 7. Usos del suelo municipio de Medellín según el POT
Figure 7.. Soil use of Medellín Municipality according to (POT)

Tabla 2. Niveles de ruido ambiental por zonas geográficas y usos del suelo en Medellín – Antioquia – Colombia. 2006

Table 2. Environment Noise levels for Geographic zones and soil use in Medellín - Antioquia –Colombia. 2006

Zona geográfica	Uso del Suelo	Niveles de ruido - Día		Niveles de ruido -Noche	
		Leq dB(A)	Comparación con la norma	Leq dB(A)	Comparación con la norma
1 Nor-oriental	Residencial	65-80	Excede	60-70	Excede
	Equipamientos Generales (Institucional)	65-75	Excede	65-70	Excede
2 Nor-occidental	Residencial	65-80	Excede	60-75	Excede
	Equipamientos Generales (Institucional)	70-80	Excede	65-75	Excede
	Producción de Gran Empresa (Industrial)	75-80	Excede	65-75	Excede
3 Centro-oriental	Salud, Ciencia y Tecnología	70-80	Excede	70-75	Excede
	Residencial	65-80	Excede	65-80	Excede
	Equipamientos Generales (Institucional)	70-80	Excede	65-75	Excede
	Producción de Gran Empresa (Industrial)	55-80	Excede	65-70	No Excede
4 Centro-occidental	Residencial	65-80	Excede	65-75	Excede
	Equipamientos Generales (Institucional)	60-75	Excede	65-75	Excede
5 Sur-oriental	Residencial	65-80	Excede	60-70	Excede
	Equipamientos Generales (Institucional)	65-80	Excede	65-70	Excede
	Producción de Gran Empresa (Industrial)	65-75	No Excede	65-70	No Excede
6 Sur-occidental	Residencial	65-75	Excede	60-70	Excede
	Equipamientos Generales (Institucional)	65-75	Excede	60-70	Excede
	Producción de Gran Empresa (Industrial)	65-75	No Excede	65-70	No Excede

5. CONCLUSIONES

Globalmente, Medellín puede ser considerado un municipio altamente ruidoso, con niveles de ruido promedio de 72 dB(A) en el día y 68 en la noche.

Con respecto al cumplimiento de la norma, puede decirse que casi todo Medellín excede Los límites permisibles de ruido ambiental, a excepción de dos sectores: El sector centro oriental clasificado como Producción de Gran Empresa o industrial, el cual excede la norma solo en las horas de la noche; y todo sector sur para el mismo uso del suelo, tanto para el día como para la noche.

En el día, los niveles de ruido predominantes oscilan entre 65 y 80 dB(A) y en la noche entre 65 y 76 dB(A); sin embargo, en el sector nor-oriental, se alcanzan niveles hasta de 80 dB(A) durante la noche.

Puede decirse, en términos generales, que los niveles de ruido en la noche tienden a ser menores. Durante esta jornada los niveles máximos de ruido se presentan principalmente en los sectores centro occidental y centro-oriente con niveles mayores a los 70 dB(A).

El análisis estructural, como una de las fases geoestadísticas más importantes, permitió regionalizar las variables $L_{eqDiurno}$ y $L_{eqNocturno}$ para la zona urbana del municipio de Medellín. La franja horaria diurna regionalizó con una estructura gaussiana de rango de 566m y una varianza de 19.66 dB(A), la cual representa el 92% de la varianza estadística. De acuerdo con este resultado el diseño de una futura red de control y monitoreo puede localizar sonómetros dentro de este rango de influencia. La franja horaria nocturna se acopló a un modelo de semivariograma anidado compuesto por un fuerte efecto de pepita y una estructura gaussiana con rango de influencia de 1100 m. Debido a este fuerte error reflejado en el modelo se propone para la elaboración de una futura red de muestro, localizar puntos espaciados a 400 m equivalentes aproximadamente a un 40% de este rango, de este modo para control y monitoreo en el día se pueden ubicar sonómetros en las zonas críticas espaciados a 600m en el día y a 400m en la noche.

Los mapas de probabilidad para niveles de ruido, servirán de apoyo para control y monitoreo permanente en el área urbana del Municipio de Medellín.

Los mapas de simulación condicionada brindan mayor cantidad de información mientras que los métodos de estimación por kriging producen patrones de variación espacial mas suavizados que los reales y tienden a ajustarse en promedio a los valores reales, mientras que los valores simulados reproducen mejor el aspecto de las fluctuaciones del fenómeno real.

REFERENCIAS

- [1] ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ. Proyecto Metrópoli 2002 - 2020 Plan Integral de Desarrollo Metropolitano. Medellín. 2002.
- [2] CHILÉS, J. and DELFINER P. Geoestadistics Modeling Spatial uncertainty: Wiley Series In Probability and Statistics. United Sates of America: s.n. 1999.
- [3] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. NTC 3520. Bogotá. 1993.
- [4] CHRISTIAN LANTUÉJOUL, Geostatistical Simulation (Models and Algorithms): Springer-Verlag Berlin, Heidelberg. New York. 2002.
- [5] BLINES Y OTROS. Casos de estudio en Isatis: geovariances. Francia. 2008.
- [6] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (Colombia). Resolución 0627 del 7 de abril de 2006. Bogotá. 2006.
- [6] ALCALDÍA DE MEDELLÍN. Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín. Departamento Administrativo de Planeación. 2006.