



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A135

Modelamiento del ruido ambiental con el apoyo de herramientas de Sistemas de Información Geográfica

Luis Alberto Tafur Jiménez^(a), Carlos Arturo Castro Castro^(b)

Ingeniería de Sonido, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Buenaventura. Medellín, Antioquia, Colombia. Tel: +57 4 5762645. Fax: +57 4 5138294

(a) E-mail: luis.tafur@usbmed.edu.co

(b) E-mail: carlos.castro@usbmed.edu.co

Abstract

One of the strategies for the control of environmental noise is mapping noise, so as to define the acoustic environment of a study zone and to establish improvement plans, planning projects, thus improving the quality of life. Additionally, these projects must fulfill environmental regulations with very well defined characteristics in each country. Nevertheless, generally these laws consider data of equivalent sound pressure levels in frequency weighting A, which does not consider levels of low frequency noise, which often can have different detrimental effects on health than the loss of hearing. This paper proposes a methodology based on the use of tools of geographic information systems, which allows for the modeling of ambient noise levels in a specific area, taking into account both the effects on hearing and non hearing. The methodology is based on the use of spatial data bases and engineering software and consists of the following phases: to determine the most important sources and effects of environmental noise, weighting process of the sources of noise by means of multi-criteria analysis, spatial analysis model for location of vulnerable zones, pitch correction of Leq and obtaining of loudness levels by the Stevens method, producing a noise map with weights that takes into account low frequencies.

Resumen

Una de las estrategias para el control de ruido ambiental es la elaboración de mapas de ruido tanto para definir el clima acústico de una zona de estudio como para establecer planes de mejoramiento, proyectos de planificación y mejorar así la calidad de vida. Adicionalmente, estos proyectos deben cumplir con regulaciones ambientales con características muy bien definidas en cada país. Sin embargo, generalmente, estas leyes consideran datos de niveles de presión sonora equivalente en ponderación frecuencial A, que no considera niveles de ruido de baja frecuencia, los cuales en muchas ocasiones pueden generar efectos negativos sobre la salud diferentes a la pérdida de la audición. En este artículo se propone una metodología basada en el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica, que permita modelar los niveles el ruido ambiental en una zona determinada, teniendo en cuenta los efectos del ruido tanto auditivos como no auditivos. La metodología se apoya en el uso de bases de datos espaciales e ingeniería del software y consiste en las siguientes fases: Determinar las fuentes y efectos más importantes del ruido ambiental, proceso de ponderación de las fuentes de ruido mediante análisis multicriterio, modelo de análisis espacial para ubicación de zonas vulnerables, corrección tonal del LeqA y obtención de niveles de Sonoridad por método de Stevens, elaboración del mapa de ruido con ponderaciones que tienen en cuenta las bajas frecuencias.

1 Introducción

La acústica es la ciencia que estudia el comportamiento del sonido y el ruido, desde el punto de vista fisiológico e ingenieril es un sonido que causa efectos nocivos sobre la salud.

La Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo define Ruido ambiental como “el sonido exterior no deseado o nocivo generado por las actividades humanas, incluido el ruido emitido por los medios de transporte, por el tráfico rodado, ferroviario y aéreo y por emplazamientos de actividades industriales...” [1]. Las fuentes de ruido ambiental de mayor impacto, son los medios de transporte, porque generan tiempos de exposición muy extensos y por lo tanto crean mayor grado de molestia y efectos adversos en la población. Entre estos efectos están: el estrés, trastornos en el sueño, la interferencia en la comunicación, complicaciones gastrointestinales, alteraciones cardiovasculares, fatiga corporal, la modificación del ritmo respiratorio, entre otros [2] [3].

Los mapas de ruido, han surgido como herramienta fundamental para determinar el clima de ruido de una ciudad, establecer el número de personas expuestas, identificar zonas críticas y sus posibles fuentes, y posibilitan la ejecución de planes de acción para la aplicación de medidas correctivas, preventivas y de seguimiento. En Colombia la resolución 0627 de 2006 define mapa de ruido “como la representación de los datos sobre una situación acústica existente o pronosticada en función de un indicador de ruido, en la que se indica la superación de un valor límite, el número de personas afectadas en una zona dada y el número de viviendas, centros educativos y hospitales expuestos a determinados valores de ese indicador en dicha zona” [4]. Un mapa de ruido debe ser más que un simple mapa con información acústica de una determinada zona geográfica. Es una herramienta que debe permitir la toma de decisiones, teniendo en cuenta las zonas en donde se encuentran los grupos poblacionales más vulnerables al ruido. Es por esta razón, que para el estudio del ruido ambiental es necesario la integración de las herramientas para Sistemas de Información Geográfica y las teorías que se desprenden de las ramas de la acústica (ej: psicoacústica). Un SIG con información georreferenciada, una base de datos, un estudio estadístico y un modelo para el manejo de la información espacial, permite tener un método aplicable a cualquier zona urbana, permitiendo así, un mejor manejo de la información y la actualización de datos en el tiempo, todo esto para la ejecución de planes de acción y la correcta planificación de las ciudades en función de un indicador de ruido.

La importancia de los indicadores de ruido radica en la obtención de valores promedio en determinados horarios, ideales para estimar el clima acústico en la zona geográfica de estudio. El principal indicador de ruido propuesto en la norma colombiana 0627 es el nivel de presión sonora continuo equivalente con ponderación frecuencial A tanto para el periodo diurno, como para el periodo nocturno. Esta ponderación es muy utilizada en la normatividad a nivel mundial en los estudios de ruido, porque se correlaciona muy bien con los daños auditivos y gracias a que ofrece un número único de fácil medición. Sin embargo, existen variables que la ponderación A no tiene en cuenta y que pueden ser determinantes para evaluar los efectos del ruido en el ser humano.

Los efectos del ruido se pueden clasificar como auditivos y extra-auditivos de naturaleza fisiológica o psíquica. Estos efectos dependen de la intensidad, el tiempo de exposición y el contenido frecuencial del ruido. El contenido de baja frecuencia, por ejemplo, es un factor que provoca efectos extra-auditivos en la salud, los cuales pueden llegar a ser incluso más perjudiciales que los efectos auditivos [5]. En la ponderación A se le quita peso a las bajas frecuencias ya que esta ponderación fue concebida para niveles bajos (del orden de los 40 fonos lo cual es equivalente a 40dB en 1000Hz), niveles en donde el sistema auditivo

humano tiene menos capacidad para escuchar estas frecuencias. Por la misma razón, esta ponderación no es ideal para evaluar los efectos del ruido cuando el mismo presenta niveles de presión sonora muy altos, ya que simula la respuesta del oído humano a niveles bajos [2].

Este proyecto presenta una metodología para la gestión del ruido ambiental mediante un sistema de información geográfica que tenga en cuenta los efectos del ruido en ser humano con el apoyo de bases de datos espaciales e ingeniería del software. La metodología del proyecto consiste de las siguientes fases:

- Determinar las fuentes y efectos más importantes del ruido ambiental.
- Alimentar con los datos de las fuentes de ruido la base de datos espacial SIGCARES.
- Proceso de ponderación de las fuentes de ruido mediante análisis multicriterio.
- Aplicar el modelo de análisis espacial SIGNAS para ubicación de zonas vulnerables.
- En las zonas detectadas se miden y/o predicen los niveles de presión sonora por 1/3 de octava. En cuadrículas de 50x50.
- Corrección tonal del LeqA según la norma 0627 de 2006.
- Se aplica el modelo Stevens para hallar los niveles de Sonoridad.
- Elaborar mapa de ruido con valores de LeqA, con LeqA con corrección, Niveles de Sonoridad y con posibles efectos sobre la salud.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Principal

Desarrollar una metodología con el apoyo de herramientas de sistemas de información geográfica para modelar el ruido ambiental teniendo en cuenta los efectos del ruido en el ser humano.

2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar una base de datos espacial para la gestión del ruido ambiental.
- Diseñar un modelo de análisis espacial para la ubicación de las zonas más vulnerables.
- Elaborar un mapa de ruido en una zona vulnerable con valores de LeqA, con LeqA con corrección, Niveles de Sonoridad y con posibles efectos sobre la salud.

3 Marco Conceptual

3.1 Fuentes y Efectos del Ruido Ambiental

La gran cantidad de actividades que realiza el hombre, genera un sin número de fuentes y ámbitos que permiten clasificar el ruido por su naturaleza. Por ejemplo, ruido ambiental o comunitario, ruido industrial, ruido aeronáutico, etc. El tipo de ruido estudiado en esta investigación es el ruido ambiental, definido por la OMS como “el ruido emitido por todas las fuentes, excepto el ruido industrial generado en el lugar de trabajo” [6].

La variable física más importante al momento de evaluar efectos del ruido es el contenido frecuencial. Por ejemplo, un alto contenido frecuencial en bajas frecuencias puede ocasionar efectos como el estrés, efectos vegetativos, efectos cardiovasculares, reducción del rendimiento, fatiga y alteraciones del sueño, entre otros [5]. Debido a que el sistema auditivo humano es poco sensible a estas frecuencias y a que la población en general no conoce sobre

los efectos de este tipo de ruido, las personas pueden llegar a asociar estos efectos con una causa diferente a la exposición al ruido.

3.2 Base de Datos Espacial

Una base de datos espacial es un modelo para el almacenamiento de datos geográficos, sus atributos, sus relaciones (espaciales o no), y comportamiento de cada uno de sus elementos [7].

4 Metodología

4.1 Fuentes de Datos

Para la presente investigación se tuvieron en cuenta las líneas del metro de la ciudad y la malla vial de Medellín como los principales generadores de ruido ambiental, haciendo una diferenciación entre las vías principales y las vías secundarias, ya que las primeras tienen un mayor número de carriles, más flujo vehicular, una velocidad promedio más alta y permiten la movilización de tráfico pesado. Estas características inciden en las variables físicas que componen al ruido, como son: el contenido espectral, la dinámica temporal, la duración y la amplitud. La combinación de estas variables físicas causa determinados efectos perjudiciales para la salud.

4.2 Base de Datos Espacial SIGCARES

El modelo de base de datos, llamado SIGCARES, está diseñado para almacenar, consultar y analizar información referente al ruido ambiental, teniendo en cuenta la norma 0627 de 2006 y los efectos del ruido en el ser humano. El primer paso para la construcción de SIGCARES fue la elaboración de un modelo verbal, para el levantamiento de requerimientos. Posteriormente, se realizó el modelo conceptual para identificar las relaciones entre las diferentes entidades involucradas y a partir de este modelo, se elaboró la estructura con la cual se inició el diseño de SIGCARES.

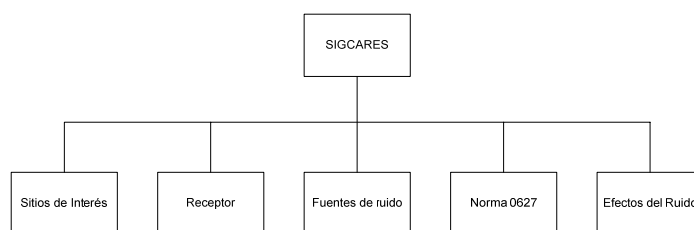


Figura 1. Estructura Base de Datos Espacial SIGCARES.

Para la especificación de requerimientos funcionales se emplearon diagramas de casos de uso. En cada caso de uso se debe identificar los grupos de actores: autoridad ambiental, el ente académico y el administrador del sistema. Una vez definida la estructura, los requerimientos y los casos de uso se elaboró el diagrama de clases que se presenta en la figura 2

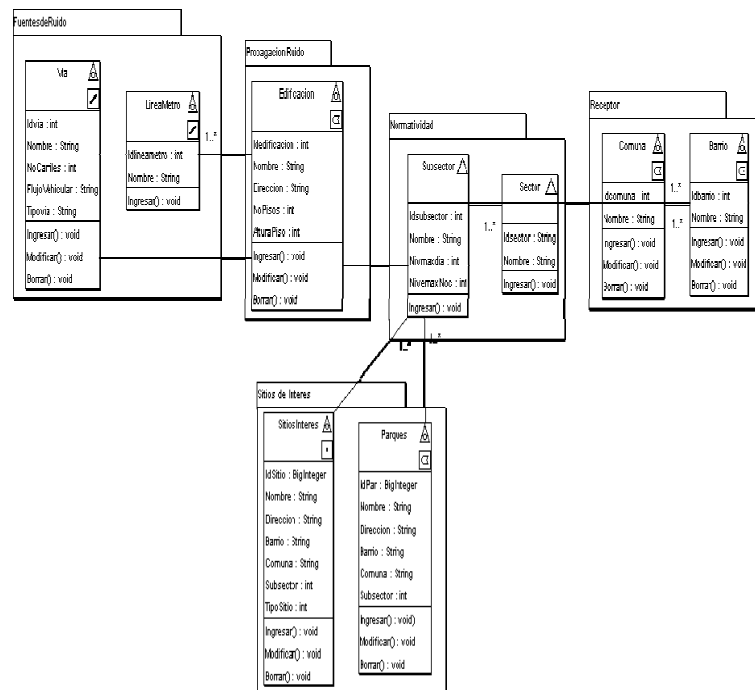


Figura 2. Diagrama de Clases SIGCARES.

El modelo físico de SIGCARES, se elaboró en la Herramienta ArcCatalog, de Arcgis™, teniendo en cuenta la integridad referencial y la estructuración íntegra de de los Feature-Dataset

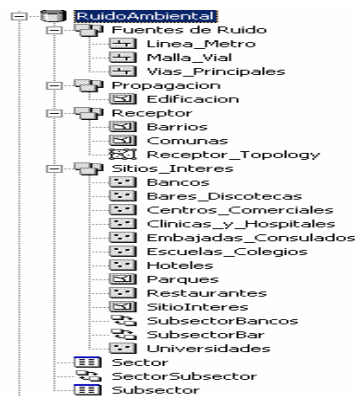


Figura 3. Prototipo Base de Datos Espacial SIGCARES

4.3 Análisis Multicriterio

Para la identificación de las diferentes fuentes de ruido y aun para determinar los criterios de mayor influencia, se empleó el método de Saaty [8], también denominado “Matriz de Comparaciones Binarias” [9]. La idea básica es realizar una matriz de valoración con datos obtenidos de mediciones realizadas para cada fuente de ruido.

Tabla 1. Tabla de Descripción de los Criterios Acústicos de Ruido.

CRITERIOS	DESCRIPCION	UNIDAD
LAeq	Nivel de Presión Sonora Equivalente Ponderado A	dBA
LFN	Contenido de baja frecuencia, Leq de dB x 1/3 octava entre 25HZ-250Hz	dB
TIME	Tiempo de exposición	Horas
Lmax	Nivel de presión sonora superado el 10% del tiempo	dB

Tabla 2. Matriz de Valoración para las diferentes fuentes de ruido.

	Vías Principales	Malla vial	Línea Metro
LAeq	80	70	55
LFN	78	61	52
TIME	24	24	18
Lmax	93	79	64

Con la matriz de valoración se realizó un proceso de cálculo de pesos para cada criterio mediante aproximaciones. Una vez obtenidos estos pesos, se analiza criterio por criterio con el fin de conseguir el peso para cada fuente de ruido. En la tabla 3 se presentan los pesos finales obtenidos mediante este procedimiento.

Tabla 3. Pesos Finales para las fuentes de ruido.

Fuente de Ruido	PESOS FINALES
Vías Principales	0.68
Malla vial	0.23
Línea Metro	0.09

4.4 Modelo de análisis espacial SIGNAS

El modelo de análisis espacial SIGNAS fue elaborado con la herramienta Model Builder del software ARCGIS de ESRI. El modelo SIGNAS toma los datos de la base de datos espacial SIGCARES. SIGNAS es un modelo computacional que toma datos de vías principales, la malla vial y las líneas del metro de la ciudad y mediante procesos de Buffering, es decir, creación de polígonos alrededor de las fuentes de ruido teniendo en cuenta el tipo de fuente y la dispersión del sonido, la rasterización y normalización, y la asignación de los pesos previamente obtenidos se consigue un mapa de zonas vulnerables al ruido y sus efectos.

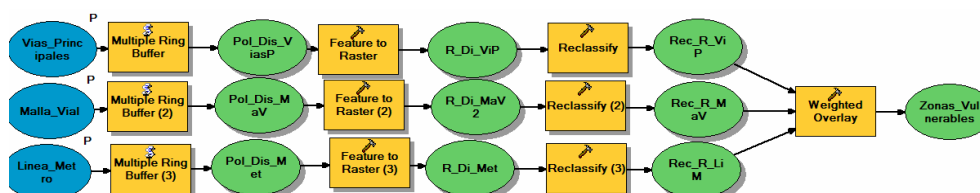


Figura 4. Modelo computacional para la obtención de zonas vulnerables al ruido.

Como resultado del modelo se arroja el mapa que se presenta en la Figura 5.

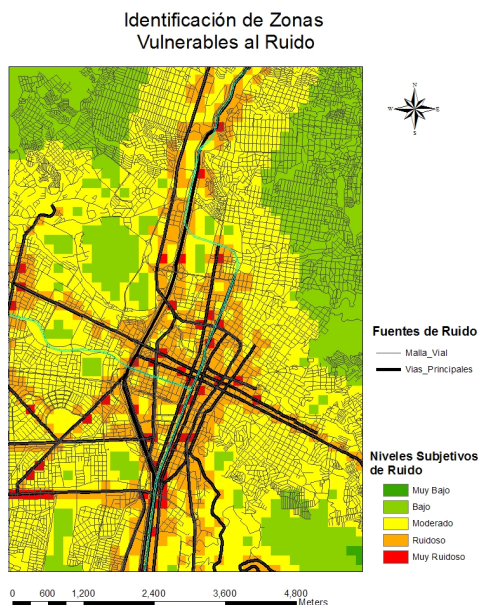


Figura 5. Zonas vulnerables al ruido.

En las zonas cuyo resultado tiene tendencia al anaranjado y especialmente al rojo presupone una alta incidencia de contenido de baja frecuencia y por consiguiente, una mayor posibilidad de afectación a la población expuesta. Es allí entonces, donde se propone hacer mediciones adicionales en las cuales se puedan obtener más datos como niveles de ruido en bandas de 1/3 de octava y niveles de sonoridad, que reflejen en mayor medida el grado de molestia del ruido.

4.5 Mediciones de ruido en una zona vulnerable

Con la identificación de las zonas más vulnerables a los efectos del ruido, se procedió a identificar una de las zonas y realizar mediciones por 1/3 de octava, con el fin de obtener una información más detallada acerca del comportamiento del ruido. En la figura 6 se muestra la zona escogida.

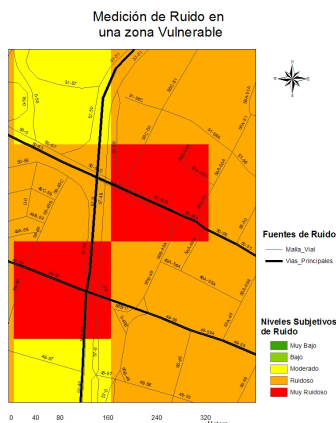


Figura 6. Zona Vulnerable escogida para las mediciones.

Las mediciones se realizaron para el periodo diurno durante una semana y a diferentes horas del día. Los intervalos unitarios de medición se ejecutaron de acuerdo a la norma 0627 de 2006.

Tabla 4. Resultados de medición en zona vulnerable.

F(Hz)	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
dB	75.4	74.6	74.2	73.0	71.8	70.6	69.2	68.6	66.1	65.2	64.7	69.8	70.6	70.2

F(Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000
dB	69.7	66.0	65.8	64.0	63.6	62.6	62.2	59.4	58.6	58.4	57.3	57.0	55.2	54.6

Leq = 84dB
LeqA = 77dBA

4.6 Corrección Tonal del LAeq Según la Norma 0627 de 2006

Las variables físicas del ruido como el contenido espectral, la dinámica temporal, la duración y la amplitud influyen en el nivel subjetivo de molestia en las personas expuestas. Por esta razón, es importante para los proyectos o investigaciones sobre control de ruido, evaluar estas variables y su incidencia en el grado de molestia de la gente. En la presente investigación se tuvo en cuenta el contenido espectral o corrección tonal por tratarse de una variable muy importante al momento de evaluar y clasificar los efectos del ruido. El ajuste por corrección tonal consiste en adicionar decibeles al nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, cuando se demuestra que existe un contenido importante de energía en una determinada frecuencia.

Según la norma 0627 de 2006, el procedimiento para realizar estos ajustes consiste en hacer mediciones por 1/3 de octava y encontrar diferencias entre una banda de frecuencia y las bandas inmediatamente superior e inferior. Las diferencias en dBA varían dependiendo las frecuencias analizadas, por ejemplo, de 20 a 125Hz, deben existir al menos 8dBA para que aplique la corrección tonal. Según el procedimiento planteado en la norma, para los valores obtenidos en la medición no aplicaría una corrección por componente tonal.

4.7 Aplicación Modelo Stevens para hallar los Niveles de Sonoridad

Para tener en cuenta los efectos del ruido de baja frecuencia, se propone utilizar un indicador adicional llamado nivel de sonoridad. La sonoridad es la percepción que se tiene de la intensidad sonora (comúnmente llamada "volumen"). Cuanto mayor es el nivel de presión sonora de un sonido, mayor sonoridad se percibe del mismo. Sin embargo, la sonoridad no depende exclusivamente del nivel de presión sonora, sino también de variables subjetivas. Además del nivel de presión sonora, la sonoridad depende, entre otros factores, de la frecuencia y de la duración del sonido.

La sonoridad puede medirse en sonos (a diferencia del nivel de sonoridad medido en fonos). La relación entre sonos y fonos es:

- 1 sono = 40 fonos
- 2 sonos = 50 fonos
- 4 sonos = 60 fonos, etc.

Como se puede ver, por cada 10 fonos que se incrementa el nivel de sonoridad aumenta al doble la sonoridad. En la ecuación (1) se muestra la relación entre fonos y sonos.

$$Sonos = 2^{\frac{fonos - 40}{10}} \tag{1}$$

Para calcular el nivel de sonoridad se aplica el modelo de Stevens [9] y se toma como valores de entrada, los niveles de presión sonora por bandas de octava. El nivel compuesto de sonoridad se halla con la siguiente ecuación:

$$L = 0,7 S_{max} + 0,3 \sum S_i \tag{2}$$

S_{max} = índice de sonoridad de la banda de octava mas sonora

S_i = índice de sonoridad de la octava i

Centro de octava →	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Nivel de octava – dB lineal	75	73	69	65	71	66	64	59	57
Índice de sonoridad de octava S_i	3	4	4,7	4,6	7,8	7	7,4	6,6	7
Categoría	9	8	6	7	1	3	2	5	3

$$S_{total} = \sum S_i = 52,1, \tag{3}$$

$$S_{max} = 7,8$$

$$L = 0,7 \times 7,8 + 0,3 \times 52,1 = 21,09 \text{ sonos}, \tag{4}$$

Nivel de sonoridad = 84 fones

El nivel de sonoridad de 84 fones es un valor que otorga información importante para el costo efectivo de los tratamientos de control de ruido, independiente del nivel de presión sonora continuo equivalente en ponderación A. Esta medida en fones se compara con las curvas de igual sonoridad de Fletcher y Munson. Ver figura 7.

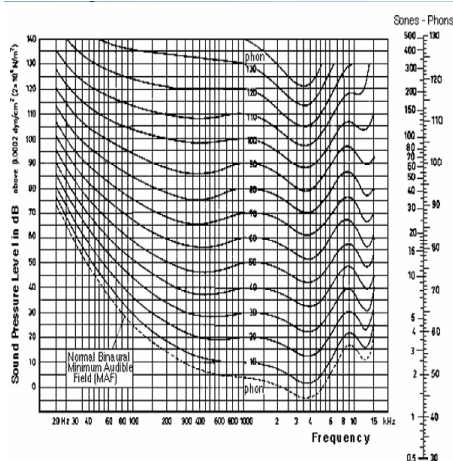


Figura 7. Contornos de igual sonoridad de Fletcher y Munson.

Este valor está muy cercano la curva de igual sonoridad de 80 fones, muy lejano a la curva de igual sonoridad de los 40 fones, de la cual proviene la ponderación A, que se

correlaciona muy bien con las frecuencias que causan daños auditivos, pero no con las bajas frecuencias, que causan daños no auditivos.

Por lo cual, lo más indicado para este caso, sería utilizar la curva de ponderación B, que le quita tanto menos peso a las bajas frecuencias y es más adecuada para medir niveles de presión sonora más altos que la ponderación A. Se puede concluir que dependiendo de los niveles de presión sonora obtenidos en cada banda de frecuencia, debe tomarse la decisión de aplicar una curva de ponderación adecuada que considere todo el espectro sonoro.

5 Conclusiones y recomendaciones

Una base de datos espacial es una herramienta que facilita el almacenamiento, organización y manejo de los datos geográficos y tabulares requeridos por la norma 0627 de 2006 para el control de ruido ambiental.

Se propone que la norma 0627 de 2006 para el control de ruido ambiental en Colombia, considere otras metodologías adicionales para la medición y evaluación del ruido ambiental que permita considerar la exposición a todo el espectro sonoro y por lo tanto, tenga en cuenta los efectos tanto auditivos como no auditivos.

Se propone un análisis más profundo de las fuentes de ruido y un mejor estudio de las variables físicas del ruido, de tal forma que se logre una mayor precisión en los datos obtenidos y por consiguiente decisiones más acertadas en la toma de decisión sobre las medidas de control.

Referencias

- Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002.
- Kogan P., “Análisis de la Eficiencia de la Ponderación “A” para Evaluar Efectos del Ruido en el Ser Humano”, Tesis, Universidad Austral de Chile, 2004.
- Berglund B., Lindvall T., “Community Noise”, Document Prepared for the World Health Organization (WHO), Center for Sensory Research, Stockholm, 1995.
- Resolución 0627 del 7 de abril de 2006, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Tafur L., “Protocolo de Medición de Ruido de Baja Frecuencia Basado en los Efectos del Mismo en el Ser Humano”, Tesis, Universidad de San Buenaventura Bogotá, 2005”.
- “World Health Organization Regional Office for Europe European Centre for Environment and Health Bonn Office”, Technical meeting on exposure-response relationships of noise on health 19-21 September 2002 Bonn Germany Meeting report.
- ESRI-España Geosistemas, S.A., “Geodatabase”, Versión Departamento de Marketing, Documento Técnico.
- Thomas L. Saaty, Luis G.Vargas. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. Ed. Kluwer’s International Series. Capítulo I “How to Make a Decition. P-P 1-25. 2001
- Barredo Cano, J.I. (1996): Evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica en la Ordenación del Territorio. Madrid, Editorial RA-MA, 264 p.
- Stevens A. P, G. Peterson and E. E. Gross, Handbook of Noise Measurements, 7th Edition, 1968.