

Modelo para la representación de los mapas estratégicos de ruido ambiental y tráfico rodado

Model for the representation of strategic environmental noise maps and road traffic

COLCIENCIAS TIPO 1. ARTÍCULO ORIGINAL

RECIBIDO: AGOSTO 17, 2013; ACEPTADO: SEPTIEMBRE 15, 2013

Steven Gómez Lenis

thrasher_Steven@hotmail.com

Andrés Chamorro Ortega

chamo_aco@hotmail.com

Dezly Orozco Aroca

tiny_0821@hotmail.com

Universidad Santiago de Cali

Resumen

El presente artículo presenta el desarrollo de un modelo para la representación de mapas estratégicos de ruido ambiental y tráfico rodado; esto se consigue con la aplicación de la teoría geoestadística, el sistema de información geográfica ArcGIS y un software de simulación acústica. La teoría geoestadística encuentra una función que caracteriza la estructura del ruido, permitiendo su predicción en cualquier punto del espacio geográfico de la zona de estudio; a su vez, el sistema de información geográfica ArcGIS facilita la creación de modelos acústicos por medio de labores de procesamiento en la geometría de los datos espaciales; y el software de simulación permite el cálculo de los niveles de ruido por fuente específica (e.g., tráfico rodado, industrias, etc.). Algunos resultados que se obtienen con el modelo son: cantidad de personas, cantidad de viviendas, áreas expuestas a los diferentes niveles de ruido y zonas que incumplen con los niveles de ruido establecidos por la normatividad vigente de la zona de estudio.

Palabras Clave

Mapa de ruido; geoestadística; software de simulación acústica; ArcGIS.

Abstract

This paper presents a model for representing noise and traffic strategic maps; it is achieved using geostatistical theory, ArcGIS geographic information system and acoustic simulation software. Geostatistical theory is a function that characterizes the structure of the noise, allowing prediction at any point of the geographic space of the area of study; ArcGIS geographic information system make possible to create acoustic models through processing tasks in the geometry of spatial data; simulation software allows measure noise levels for specific sources (e.g., road traffic, industrial noise, etc.). Some results obtained with this model are: number of people, number of houses, areas exposed to several noise levels and areas with noise levels out of the maximum range according current environmental regulations.

Keywords

Noise map; geostatistical; acoustic simulation software; ArcGIS.

Agradecemos al director del proyecto de grado, el ingeniero Edgar Valdez, quien nos apoyó en todo momento durante la investigación. Agradecemos a nuestros compañeros Joaquín Darío De La Torre y Jason Delgado por el acompañamiento durante la carrera y su iniciativa por la culminación de la investigación. A los profesores que durante toda la carrera nos dieron gran parte de sus conocimientos, gracias a su paciencia y enseñanza., de igual manera a los profesores Javier Rojas y Pedro Joaquín Díaz Plata por los consejos, el apoyo y el ánimo que nos brindaron, por sus comentarios en todo el proceso de elaboración del proyecto y sus correcciones.

I. INTRODUCCIÓN

Los mapas estratégicos de ruido son utilizados como una herramienta para representar la situación acústica de una zona de estudio. La elaboración de estos mapas es una prioridad en algunos países por las graves repercusiones que tiene el ruido sobre la fisiología de las personas; por este motivo, el proceso de elaboración de los mapas estratégicos de ruido ha sido estandarizado por entidades reguladoras de algunos países o regiones.

La Comisión Europea ha preparado documentos que buscan armonizar la elaboración de los mapas estratégicos de ruido en el ámbito europeo; a partir de ese propósito se creó la directiva 2002/49/EC, cuyo objetivo es asistir a las entidades en el manejo del ruido ambiental. A partir de este intento, grupos como la WG-AEN (2006) y la EPA (2009) han publicado buenas prácticas para la elaboración de estos mapas.

En Colombia, la normatividad que se encarga de los lineamientos para el ruido es la Resolución 0627 de 2006; bajo esta norma varias ciudades han desarrollado la línea base del ruido; ciudades como Medellín, Manizales y Cali han presentado avances en la gestión contra el ruido.

Reconociendo la complejidad –y la cantidad– de la información que interviene en el proceso de representar mapas estratégicos de ruido, se realiza esta investigación con el objetivo de desarrollar un modelo que permita elaborar, de forma sistemática, los mapas estratégicos de ruido ambiental y tráfico rodado, para ayudar a las entidades ambientales en la gestión del ruido.

El artículo se desarrolla así: en la sección II se realiza una descripción general del modelo desarrollado para la representación de los mapas estratégicos de ruido ambiental y tráfico rodado; En las secciones III, IV y V se muestran los resultados, la discusión y las conclusiones de la investigación en el desarrollo del modelo.

La sección II, a su vez, presenta las siguientes fases:

- *Recolección y captura de la información.* Describe el proceso de obtención de los niveles de ruido ambiental y las fuentes de información del tráfico rodado en la zona de estudio.
- *Desarrollo de una geodatabase en ArcGIS para los mapas estratégicos de ruido.* Desarrolla una base de datos geográfica que almacena las fuentes de información del ruido ambiental y tráfico rodado; de igual manera se desarrollan las entidades que intervienen

en el modelo acústico para predecir los niveles de ruido ambiental y calcular los niveles de ruido por tráfico rodado en el software de simulación acústica.

- *Predicción de los niveles de ruido ambiental.* Describe el uso de la metodología geoestadística para predecir y caracterizar los niveles de ruido en la zona de estudio.
- *Cálculo de los niveles de ruido por tráfico rodado.* Presenta un proceso para calcular niveles de ruido por tráfico rodado, teniendo en cuenta la importación del modelo acústico desarrollado en ArcGIS.
- *Elaboración de los mapas estratégicos de ruido ambiental y tráfico rodado.* Se compone de un análisis espacial y el diseño de mapas. En el análisis espacial se desarrollan modelos de geoprocamiento para obtener el número de personas, viviendas y áreas expuestas a los niveles de ruido de la zona de estudio; el diseño de mapas consiste en realizar el bosquejo del mapa de ruido de acuerdo con los aspectos definidos en la vista de usuario.

II. DESARROLLO DEL MODELO

La utilización de un sistema de información geográfica [SIG] permite hacer frente a la diversidad de fuentes de información y administrar las grandes cantidades de datos geográficos y alfanuméricos que intervienen en el modelo; los SIG facilitan también la creación de modelos acústicos por medio de labores de procesamiento en la geometría de los datos espaciales. El SIG empleado en este modelo es ArcGIS.

La base fundamental del modelo radica en el empleo de ArcGIS, metodología geoestadística y software de simulación acústica para calcular los niveles de ruido ambiental y por tráfico rodado.

La teoría geoestadística permite realizar predicciones de los niveles de ruido en la zona de estudio y los software de simulación acústica facilitan el cálculo de los niveles de ruido para fuentes específicas como industrias y tráfico rodado, entre otros. Es importante resaltar que los software de simulación acústica integran métodos de cálculo que cumplen con las condiciones dictadas en la directiva 2002/49/EC y la Resolución 0627 de 2006 (Echeverri, Murillo, & Valencia, 2011).

A. Recolección y captura de la información

1) Niveles de ruido en la zona de estudio

En la recolección de los niveles de ruido ($L_{eq}(A)$), es importante tener en cuenta los aspectos teóricos de la geoestadística para obtener predicciones más precisas de la zona de estudio. De acuerdo con Webster y Oliver (Citado por Henríquez y Vilorio, 1999), ciento cincuenta mediciones podrían ser satisfactorios para una variable isotrópicamente distribuida; aunque este sea el número de observaciones sugeridas para el modelo, en la Tabla 1 se muestran el número opcional de mediciones que se pueden tomar en la zona de estudio.

Tabla 1. Número de mediciones (Gómez, Chamorro & Orozco, 2012)

| Número de mediciones | Descripción |
|----------------------|--|
| 50 | Es la cantidad mínima de mediciones que se deben registrar para aplicar la metodología geoestadística. |
| 100 | Es una buena cantidad de mediciones para obtener buenas predicciones en la zona de estudio. |
| 225 | Mediante esta cantidad se obtendrían una mayor confiabilidad en la predicción del ruido. |

Una vez determinado el número de mediciones que se realizará en la zona de estudio, es importante decidir el tamaño de la cuadrícula y el método de muestreo espacial que se utilizará para registrar los niveles de ruido.

La determinación del tamaño de la cuadrícula se puede obtener por aplicación de la fórmula definida en la norma mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006 (Secretaría de Economía, 2006):

$$C = \sqrt{\frac{A}{n}}$$

Dónde:

C = longitud de los lados de cada cuadro

A = superficie del suelo a muestrear.

n = número de puntos de muestreo definidos de acuerdo al caso de estudio.

Para realizar el muestreo espacial es común utilizar cualquiera de las siguientes metodologías:

- *Metodología de viales o tráfico.* De acuerdo con Romeu, Jiménez, & Genesca (2006), consiste en realizar una categorización de las vías y muestrear diferentes puntos de las vías, asumiendo que las de la misma categoría presentarán niveles de ruido similares.

- *Muestreo en zonas específicas.* Se emplea frecuentemente cuando un muestreo de rejilla o de viales es insuficiente porque deja sin cubrir una zona concreta, en la que se encuentra un ruido nocturno, según lo establecido por Prieto (2009).
- *Muestreo en función de los usos del suelo.* Se realiza en función de las categorías de planificación de la aglomeración: uso comercial, uso residencial y *clusters*, entre otros. Los puntos serán representativos de cada uso de suelo, de acuerdo con Romeu et al (2006).
- *Metodología de zonas aleatorias.* Pavon y Recuero (2006) mencionan que su empleo es habitual cuando no se puede trazar una retícula o no procede la utilización del método de viales o porque no hay una zona específica en la que se concentre el ruido.

Una vez seleccionada la metodología de muestreo espacial, se establece la metodología y los horarios de medición, de acuerdo con las normatividades estipuladas para la zona de estudio, con el fin de obtener el nivel de ruido ($L_{eq}(A)$) en los puntos de medición seleccionados.

2) Fuentes de información del tráfico rodado

Según Prieto (2009), en la representación de un mapa estratégico de ruido por tráfico rodado, intervienen tres tipos de información: datos relacionados con la fuente sonora; datos relacionados con la propagación del ruido; y datos relacionados con la población afectada.

Las fuentes de información para cada categoría de datos, de acuerdo con la WG-AEN (2006) y la *Environmental Protection Agency* [EPA] (2011), son las siguientes:

- *Datos relacionados con la fuente sonora:* selección de las vías, flujo de vehículos, velocidad de los vehículos, tipo de flujo vehicular.
- *Datos relacionados con la propagación:* ancho de las vías, modelo digital del terreno [MDT], superficie de las vías, altura de los edificios, condiciones meteorológicas (temperatura, humedad y presión atmosférica).
- *Datos relacionados con la población afectada:* número de personas expuestas, número de viviendas y magnitud de las áreas afectadas.

En la Tabla 2 se establecen las recomendaciones sugeridas por algunas entidades en la obtención de las fuentes de información.

Tabla 2. Recomendaciones según categoría de los datos (Gómez et al., 2012)

| Datos relacionados con la fuente sonora | |
|--|---|
| Selección de las vías | Se representan las vías que tengan un flujo promedio de 3 millones de vehículos / año (WG-AEN, 2006; EPA, 2011). |
| Flujo de vehículos | Calcular el número de vehículos ligeros y pesados en un periodo de quince minutos, a través de registros de video (Gómez et al., 2012). |
| Velocidad de los vehículos | Seleccionar el límite de velocidad permitido en cada una de las vías seleccionadas (WG-AEN, 2006). |
| Tipo de flujo vehicular | Se debe determinar si el flujo es irregular, continuo, acelerado o decelerado. |
| Datos relacionados con la propagación del sonido | |
| Ancho de las vías | |
| Modelo digital del terreno [MDT] | Investigar modelos del terreno que hayan realizado las entidades de la zona de estudio. En caso de no encontrar una metodología se puede emplear el proceso desarrollado en Gómez et al (2012). |
| Condiciones meteorológicas | El valor de la temperatura se calcula promediando las temperaturas promedio anuales de 10 años consecutivos (WG-AEN, 2006). La humedad y la presión atmosférica se establecen de acuerdo con el valor calculado por con las entidades encargadas de su medición. |
| Altura de los edificios | Establecer una altura promedio para los edificios con base en su uso; posteriormente, se registra el número de pisos para cada tipo de edificio mediante una muestra representativa para cada tipo de edificio (Gómez et al., 2012). |
| Datos relacionados con la población afectada | |
| Personas expuestas (#) | Encontrar la densidad de la población (habitantes / área) de la zona de estudio. |
| Número de viviendas | Encontrar la densidad de viviendas (viviendas / área) de la zona de estudio. |
| Magnitud de las áreas afectadas | Encontrar el área de la zona de estudio. |

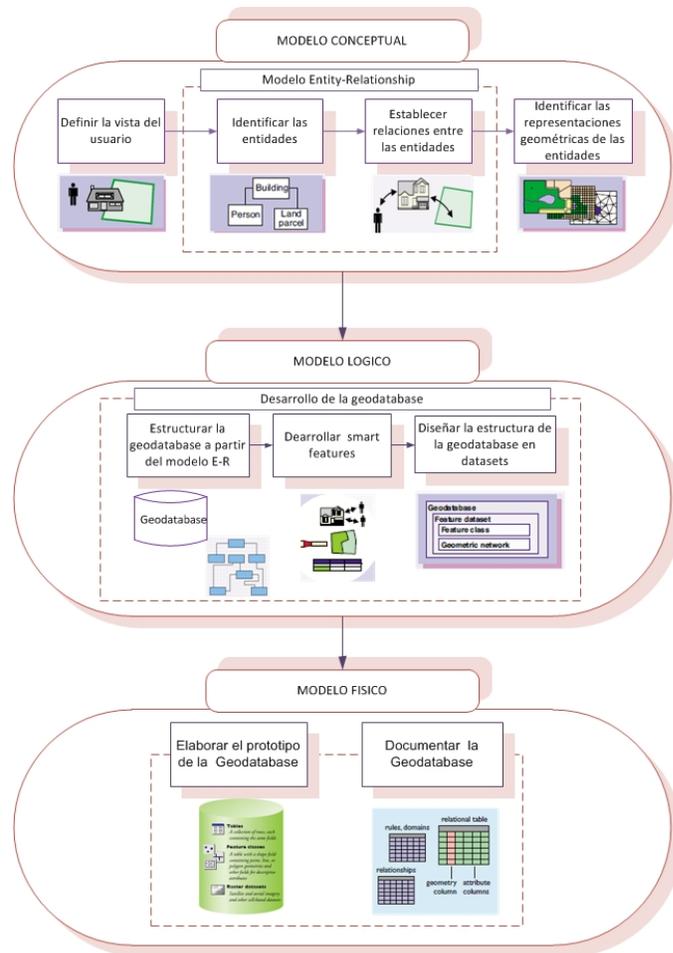
B. Desarrollo de una geodatabase en ArcGIS para los mapas estratégicos de ruido

Una *geodatabase* es una base de datos relacional que permite el almacenamiento de información geográfica, con el propósito de almacenar los *datasets* que intervienen en la elaboración de los mapas estratégicos de ruido ambiental y tráfico rodado.

El desarrollo de la *geodatabase* se realiza mediante la aplicación de la metodología para crear bases de datos convencionales y *geodatabases* de la Figura 1.

Este proceso puede ser utilizado para proyectos o investigaciones cuyo objeto de estudio sea la representación de mapas estratégicos de ruido ambiental y tráfico rodado.

Figura 1. Proceso de desarrollo de la geodatabase (Gómez et al, 2012)



1) Modelo conceptual

Definición de la vista del usuario. Esta etapa se caracteriza por establecer los requisitos que debe cumplir la *geodatabase* y las funcionalidades que un usuario puede realizar en ella. Por tanto, tiene en cuenta los requisitos mínimos que debe presentar un mapa de ruido, de acuerdo con la Resolución 0627 del 2006 y algunas consideraciones definidas en la Directiva 2002/49/EC (ver Tabla 3).

Tabla 3. Requisitos mínimos para un mapa estratégico de ruido

| Resolución 0627 de 2006 | Comisión Europea |
|--|---|
| - Valor de los niveles de ruido ambiental existentes en cada una de las áreas evaluadas. | - Número de personas expuestas a los niveles de ruido en la población. |
| - Fecha de elaboración del mapa de ruido. | - El área total y número de viviendas expuestas a los niveles de ruido producidos por las principales fuentes de ruido. |
| - Especificación de la altura a la cual se hace la representación gráfica. | |

Modelo Entity-Relationship [E-R]. Este punto consiste en identificar las entidades que intervienen en el modelo

acústico, para cumplir con las funcionalidades identificadas en la vista de usuario, la relación entre ellas y su representación geográfica.

La Tabla 4 presenta la definición de las entidades y los atributos para el modelo acústico; la Tabla 5, la relación entre ellas; y la Tabla 6, la representación geométrica de las entidades (*features*). La Figura 3 presenta el modelo de relación entre las entidades.

Tabla 4. Entidades: definición y atributos para el modelo acústico (Gómez et al., 2012)

| Entidades | Atributos / OBJECTID |
|----------------------|---|
| Edificios | Pisos Altura Id Uso2 Área personas Viviendas |
| Vías | Id VehLig_dia VehPes_dia Sentido |
| Zonas Verdes | |
| Mediciones | Coordenada Coordenada_1 Ruido |
| MDT | Coordenada x Coordenada y Elevación |
| Barrios ¹ | Codigo_B Sector |
| Kriging | En esta entidad se encuentra la predicción de los niveles de ruido de la comuna 19 |
| Traffic Noise | Esta entidad representará los niveles de ruido por tráfico rodado calculados por el software de modelación <i>soundplan essential</i> . |
| Elevación | Esta entidad representará las elevaciones del terreno, las cuales intervienen en la propagación del sonido en la comuna. |
| Sectores | Nombre Ruido |
| Barrios_obj | Código Nombre Clasificación Sector |
| Mediciones_ruido | Coordenada_X Coordenada_Y Nivel de ruido |
| Traffic_noiseobj | X Y Ruido |

¹ Superficie de la zona de estudio con sus respectivas localidades

Tabla 5. Entidades: relaciones (Gómez et al., 2012)

| Entidad de origen | Clave primaria | Entidad de destino | Clave foránea | Cardinalidad |
|-------------------|----------------|--------------------|---------------|--------------|
| Barrios_obj | OBJECTID | Barrios | Código_B | 1:1 |
| Edificios_obj | OBJECTID | Edificios | Uso2 | 1:N |
| Vías_obj | OBJECTID | Edificios | Id | 1:N |
| Vías_obj | OBJECTID | Vías | Id | 1:N |
| Sectores | OBJECTID | Edificios_obj | Sector | 1:N |
| Sectores | OBJECTID | Barrios | Sector | 1:N |

Tabla 6. Entidades: representación geométrica (Gómez et al., 2012)

| Entidades | Modelo de datos geométrico | Representación |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Edificios | Vectorial | Polígonos |
| Calles | Vectorial | Líneas |
| Zonas verdes | Vectorial | Polígonos |
| Mediciones | Vectorial | Puntos |
| MDT | Vectorial | Puntos |
| Elevaciones | Redes de triángulos irregulares | Redes de triángulos irregulares |
| Kriging | Raster | Raster |
| Traffic_noise | Raster | Raster |

2) Modelo lógico

El modelo lógico parte del resultado obtenido en el modelo conceptual; en esta etapa se desarrolla la *geodatabase* a partir del modelo E-R, con el propósito de comprender las relaciones entre las entidades modeladas y establecer el rol de cada *feature* en la *geodatabase*.

Desarrollo de smart features. Los *smart features* tienen funcionalidades que permiten representar la realidad con un mayor grado de precisión, facilitando el establecimiento de relaciones geométricas, subtipos, dominios y relaciones. El flujo que sigue su desarrollo se presenta en la Figura 3.

Figura 2. Proceso para el desarrollo de smart features (Gómez, Chamorro & Orozco, 2012)

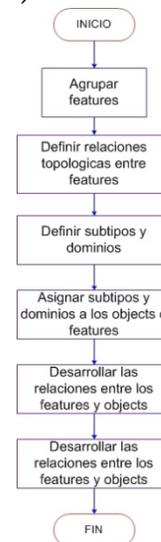
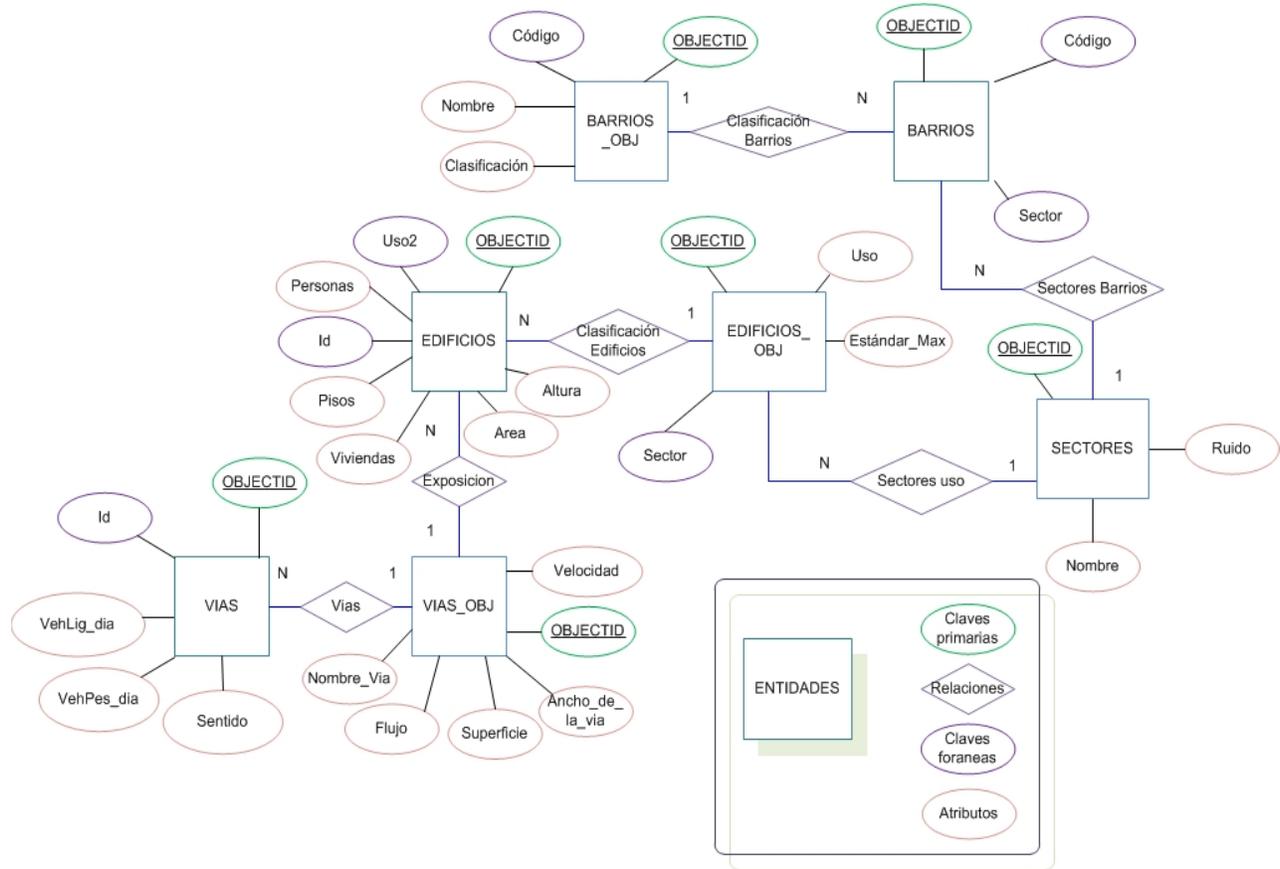


Figura 3. Modelo *Entity-Relationship* [E-R] (Gómez et al., 2012)



Agrupación de features. Se agrupan los *features* que tienen la misma representación geométrica y los *objects* para crear *datasets*, teniendo en cuenta que los *features* con asociaciones topológicas deben estar en el mismo *feature dataset* de la *geodatabase*, como muestran las Figuras 4 y 5.

Relaciones topológicas entre los features. De acuerdo con la regla topológica:

- Barrios *Contains points*: Mediciones;
- Barrios *Must be covered by*: Edificios; y
- Zonas Verdes *Must not overlap*: Edificios.

Es importante realizar excepciones cuando se valida la topología en ArcGIS, puesto que las condiciones topológicas no se cumplen en su totalidad, dependiendo de la zona de estudio.

Figura 4. Agrupación de *features*, raster y TINs (Gómez et al, 2012)

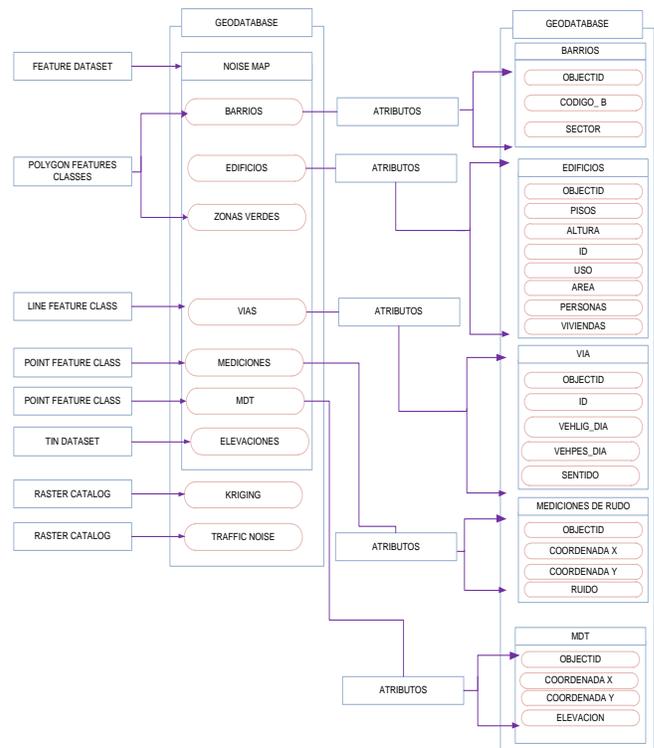
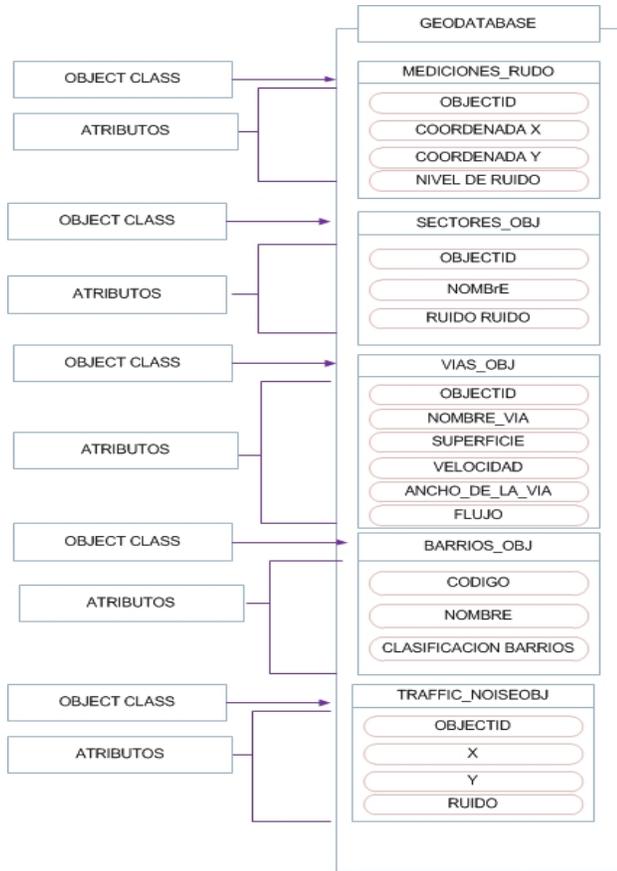


Figura 5. Agrupación de *object classes* (Gómez et al., 2012)



Definición de subtipos y dominios. Para mejorar la representación de los *features*, se definen atributos especiales –denominados subtipos– que agrupan las representaciones geográficas de forma más adecuada. Los subtipos definidos se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Subtipos (Gómez et al., 2012)

| Features | Atributo | Subtipos |
|-----------|----------|--|
| Barrios | Sector | Este subtipo consiste en clasificar los barrios de acuerdo con los niveles de ruido permitidos en la zona de estudio, la asignación del mismo depende la normatividad radicada en el área de estudio |
| Edificios | Uso2 | En el <i>features</i> edificios se crea un subtipo que contenga los usos de los edificio que intervienen en el mapa estratégica de ruido como tabernas, universidades, entre otros |
| Vías | Id | Este subtipo representa las vías que se encuentran en la zona de estudio. |

Los dominios se utilizan para restringir o asignar ciertos valores a los atributos de los *feature classes*; como resultado de algunas relaciones es necesario crear dominios para asignar una denominación a los atributos que participan en las relaciones. La Tabla 8 muestra los dominios creados en la *geodatabase*.

Tabla 8. Dominios (Gómez et al., 2012)

| Dominio | Descripción | Asignación de dominio |
|---------------------|--|---|
| Vías | Contiene el nombre de las vías de la zona de estudio. | <i>Feature class</i> : Vías Atributo: Id <i>Feature class</i> : Edificios Atributo: Id |
| Barrios | Contiene el nombre de los barrios de la zona de estudio. | <i>Feature Class</i> : Barrios Atributo: Código_B |
| Sentido del tráfico | En las vías, se establece si el tráfico tiene flujo: 1: Norte /Sur 2: Sur/Norte 3:Oriente/Occidente 4: Occidente/Oriente | <i>Feature</i> : Vías Atributo: Sentido |

Relaciones de los features y objects. Las relaciones de la *geodatabase* se realizan con base en las relaciones identificadas en el modelo E-R; estas relaciones serán representadas como *relationship classes* (ver Figura 6).

Figura 6. Relaciones (Gómez et al., 2012)

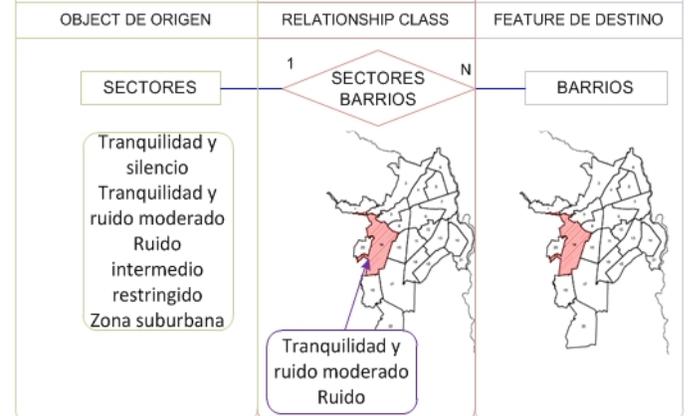
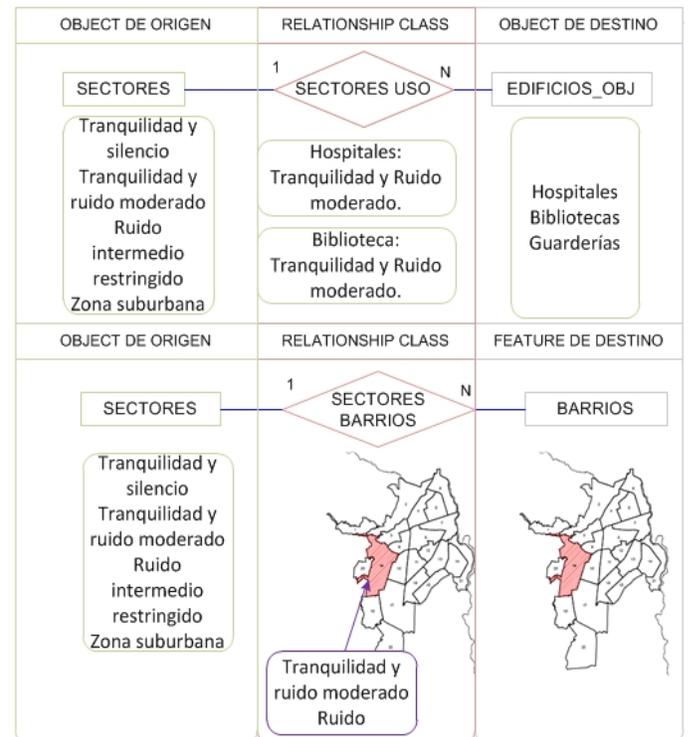
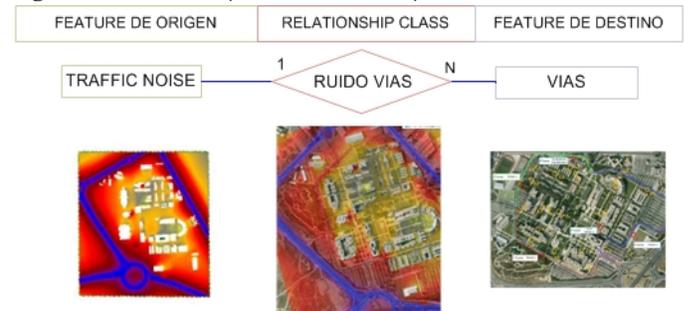


Figura 6. Relaciones - continuación (Gómez et al., 2012)

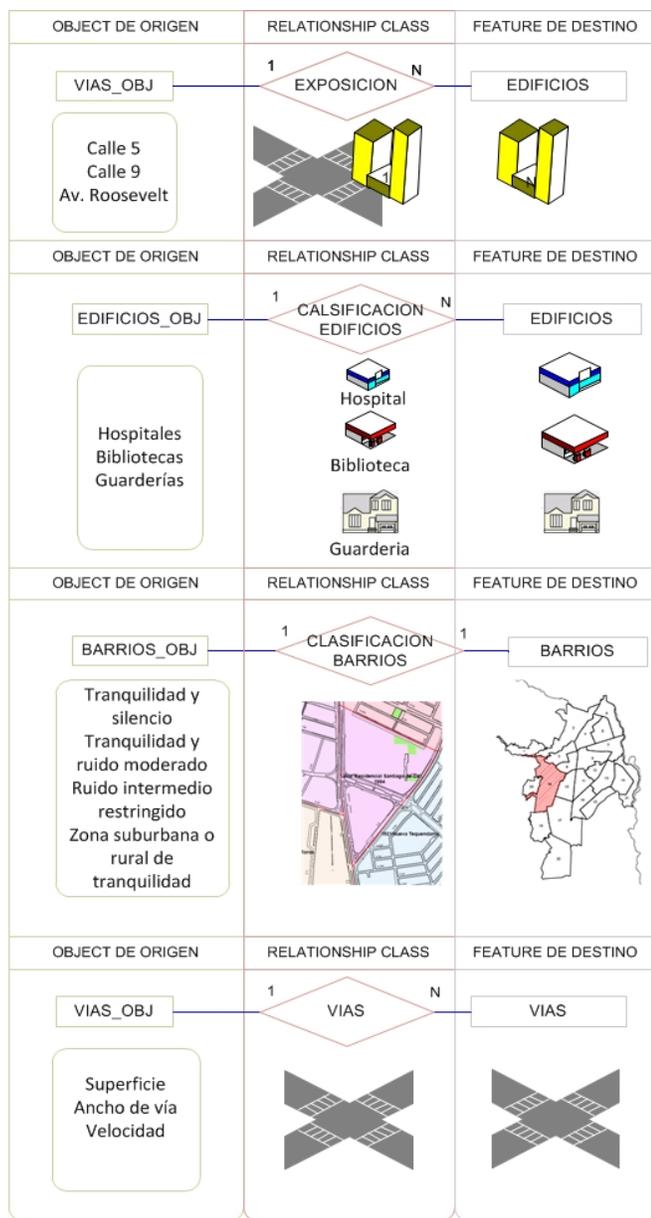
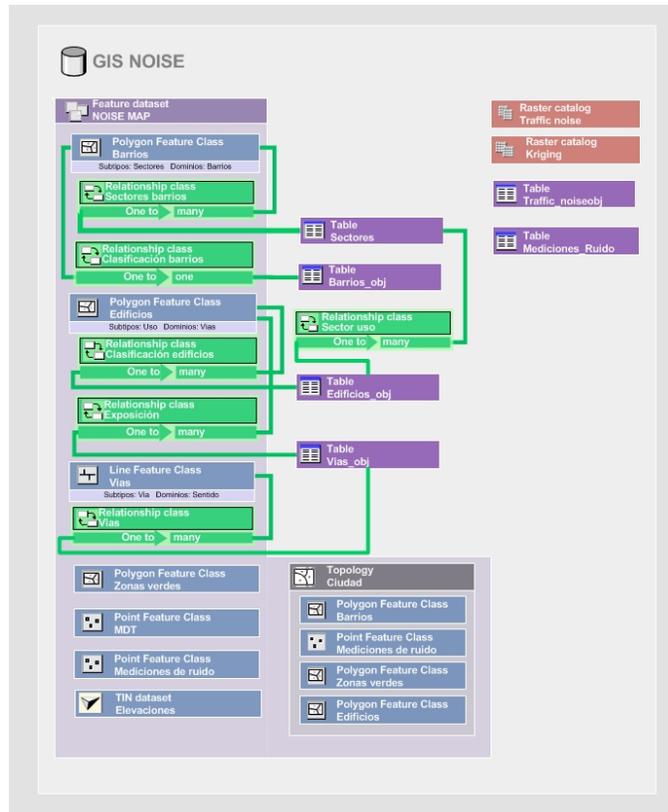


Figura 7. Estructura de la geodatabase en datasets (Gómez et al., 2012)



C. Predicción de los niveles de ruido ambiental

Una vez Elaborada la geodatabase, es posible elaborar el mapa de ruido ambiental de la zona de estudio. Un mapa de ruido no se puede realizar solo con las mediciones registradas en la zona de estudio, puesto que no otorga información suficiente sobre los niveles de ruido del área representada; por ello, es frecuente emplear metodologías que permitan predecir los niveles de ruido, con el fin de obtener un diagnóstico de la contaminación acústica en la zona de estudio.

Para realizar la predicción de los niveles de ruido, se utiliza la teoría geoestadística, la cual es definida como una rama de la estadística que trata fenómenos espaciales (Journel & Huijbregts, 1978), cuyo interés primordial es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos (Warrick & Myers, 1987).

La geoestadística es la rama de la estadística, que estudia la correlación y continuidad de fenómenos espaciales, con el fin de predecir, simular y estructurar el comportamiento de dichos fenómenos en un conjunto del espacio geográfico (Giraldo, 2006).

Estructura de la geodatabase en datasets. En este punto se definen los *features datasets* que contendrán las *features clases* y las *objects clases*; de igual manera, se establecerán los formatos de entrada de cada *feature* y la estructura de la geodatabase, como se muestran en la Figura 7.

3) Modelo físico²

Para finalizar el desarrollo de la geodatabase es necesario convertir el modelo lógico en el modelo manejado por el software ArcGIS; su estructura se presenta en la Figura 7.

² El prototipo y la documentación de la geodatabase es generada por ArcGIS cuando la geodatabase se exporta en formato xml para representarla en ArcGIS Diagrammer, por este motivo no se incluye en el presente artículo.

1) Metodología geoestadística

Análisis exploratorio. Consiste en emplear herramientas de la estadística clásica para encontrar valores atípicos (*outliers*) y tendencias en los datos del fenómeno de estudio. Las herramientas exploratorias que se emplean en el modelo son:

- *Histograma de frecuencias.* Facilita la determinación de la distribución de los datos y permite establecer si es necesario efectuar transformaciones para lograr la normalidad de los datos.
- *Box-plot.* Diagrama que grafica los cuartiles de los datos recolectados; los datos que estén por encima del tercer cuartil y debajo del primer cuartil, se consideran valores atípicos.
- *Diagrama variable vs ubicación.* Consiste en graficar las coordenadas espaciales y el valor de los niveles de ruido, para detectar tendencias en la dirección norte o este, este diagrama se realiza en el análisis de tendencias de la extensión *geostatistical analyst* de ArcGIS.
- *Medias y medianas (por filas y columnas).* Consiste en dividir el área de estudio en filas y columnas, para calcular la media y mediana en cada una de ellas para encontrar valores atípicos en cada fila y columna.
- *Estadístico u.* Cuantifica la diferencia entre los valores de las filas y columnas, para determinar la diferencia entre la media y la mediana. Cressie (1991, citado por Funes, 2004) propone la siguiente diferencia estandarizada u^3 :

$$u \equiv n^{1/2} \frac{\bar{Y} - \tilde{Y}}{0,7555\hat{\sigma}}$$

$$\bar{Y} - \tilde{Y} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n \left(\varepsilon_i - \frac{\text{signo}(\varepsilon_i)}{2f(\mu)}\right) \quad \varepsilon_i = Y_i - \mu$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\text{Rango Intercuantil de la muestra } Y}{2 * 0,6745}$$

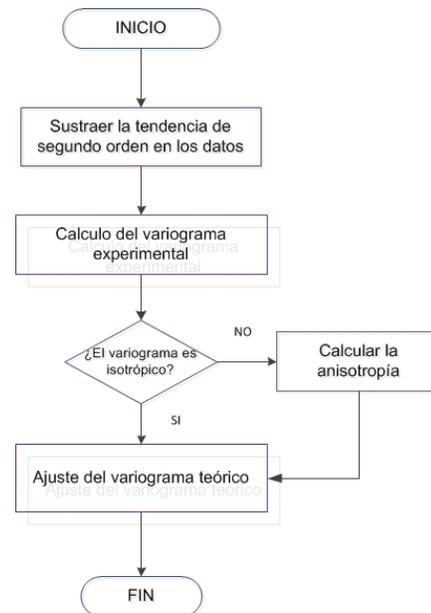
$$\text{signo}(\varepsilon_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } \varepsilon_i > 0 \\ 0 & \text{si } \varepsilon_i = 0 \\ -1 & \text{si } \varepsilon_i < 0 \end{cases}$$

- \bar{Y} : Es la media de la muestra
- \tilde{Y} : Es la mediana de la muestra
- $\hat{\sigma}$: Es un estimador de la desviación estándar
- f : Función de densidad simétrica
- μ : Media

Según Cressie (1991, citado por Funes, 2004) los valores absolutos de u que sean mayores o iguales a 3, son los valores atípicos en la fila o columna. Una vez identificados los valores atípicos, es importante identificar su causa para determinar la eliminación o conservación del valor atípico.

Análisis estructural. El análisis estructural encuentra el variograma experimental para ajustarlo a un variograma teórico que cumple con las condiciones de la geoestadística, el proceso para realizar el análisis estructural se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Análisis estructural en ArcGIS (Gómez et al., 2012)



El proceso ilustrado en la Figura 8 se realiza en el asistente de la extensión *geostatistical analyst* de ArcGIS. Durante el cálculo del variograma experimental hay que tener en cuenta: calcular el variograma para varios vectores de distancia (lags) para observar el comportamiento de la variable de estudio; encontrar el variograma en varias direcciones para detectar anisotropía en los datos; el número mínimo de pares para representar un punto en el semivariograma debe ser superior a 30 (Journel & Huijbregts, 1978).

El ajuste del variograma teórico es el aspecto más importante del análisis estructural. La forma más común de realizarlo es mediante la prueba de varios modelos, de donde se selecciona aquel con menor error cuadrático medio, para lograr más precisión en la predicción del ruido. Los modelos más utilizados en la práctica se muestran en la Tabla 9.

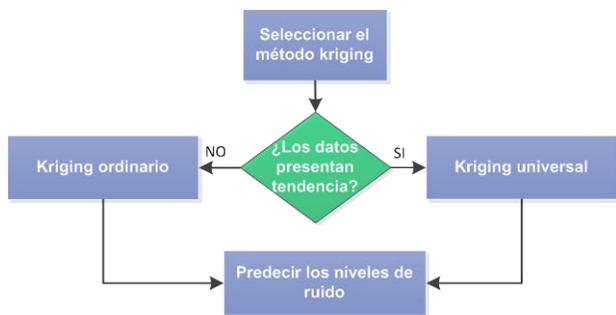
³ Rango intercuantil: diferencia entre el tercer y primer cuartil de la muestra.

Tabla 9. Modelos teóricos para ajustar el variograma experimental (Giraldo, 2006)

| Modelos | Formula |
|-------------|--|
| Exponencial | $\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{-\frac{3h}{a}}\right)$ |
| Esférico | $\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left(\frac{3}{2}\left(\frac{h}{a}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3\right) & h \leq a \\ C_0 + C_1 & h > a \end{cases}$ |
| Gaussiano | $\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}\right)$ |

Predicción de los niveles de ruido. El último paso de la metodología geoestadística es la aplicación del método Kriging para predecir los valores de la variable en la zona de estudio, la aplicación de este método depende de los resultados obtenidos en las etapas anteriores, como lo indica la Figura 9.

Figura 9. Selección del método de predicción Kriging (Gómez et al., 2012)



Una aplicación del método de predicción Kriging es el cálculo de mapas de probabilidad para los valores de la variable; en el caso del ruido es conveniente realizar un mapa de probabilidad para los niveles que son perjudiciales para la salud de las personas, los niveles de ruido para los mapas de ruido se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Niveles de ruido para el mapa de probabilidad (Berglund, Lindvall & Schwela, 1999)

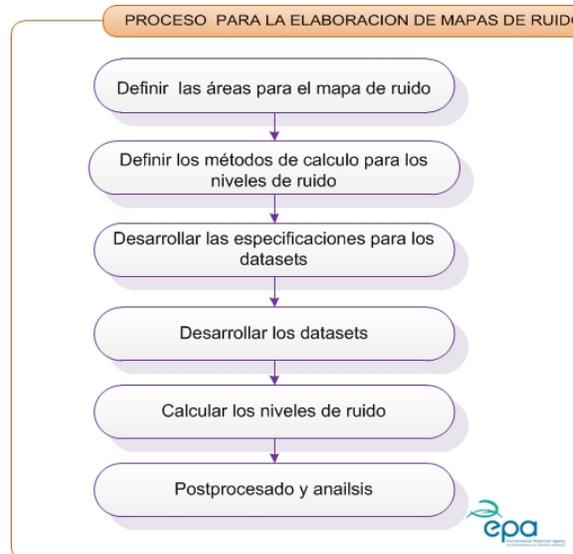
| Niveles de ruido (dB(A)) | Descripción |
|--------------------------|--------------------------------------|
| 55 | Malestar diurno fuerte |
| 65 | Dificultad en la comunicación verbal |
| 70 | Perdida del oído a largo plazo |

D. Cálculo de los niveles de ruido por tráfico rodado

Para el cálculo de los niveles de ruido por tráfico rodado se desarrolla el proceso planteado por la *Environmental Protection Agency* [EPA] (2011) para la elaboración de mapas de ruido (Figura 10); de igual manera

es importante tener en cuenta que el software de simulación acústica⁴ seleccionado, tenga la capacidad de exportar sus resultados al SIG ArcGIS y que contenga métodos de cálculo para el tráfico rodado.

Figura 10. Proceso para la elaboración de mapas de ruido (EPA, 2011, p. 26)



1) Proceso para la elaboración de mapas de ruido por tráfico rodado

Definición de las áreas para el mapa de ruido. De acuerdo con la directiva europea (Parlamento Europeo / Consejo de la Unión Europea, 2002) se deben representar las vías con un tráfico anual promedio de 3.000.000 de vehículos, incluyendo vehículos pesados y ligeros, con el fin de limitar el alcance y facilitar la elaboración del mapa de ruido en la zona de estudio.

Definición de los métodos de cálculo. En la mayoría de los casos se encuentra que el país o ciudad donde se realiza el mapa de ruido no tiene establecido métodos estándar para calcular los niveles de ruido por tráfico rodado, por esta razón se recomienda utilizar el método francés *NPMB Routes 96* (WG-AEN, 2006).

Desarrollar las especificaciones para los datasets. Esta actividad consiste en introducir las fuentes de información del tráfico rodado en los atributos de las entidades de la *geodatabase*, para facilitar las configuraciones de cálculo en el software.

Desarrollo de los datasets. Consiste en introducir las especificaciones de las fuentes de información del tráfico

⁴ En el mercado existen varios software de simulación acústica como *SoundPlan*, *CadnaA*, entre otros.

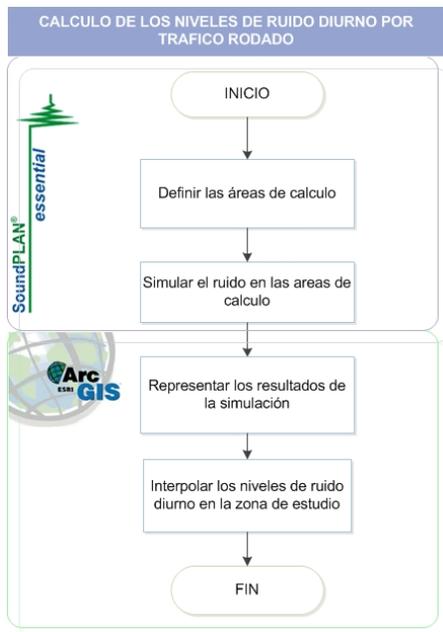
rodado en el software de cálculo; las especificaciones se realizan con base en los requisitos del método *NMPB Routes 96*. Los requerimientos del método de cálculo se encuentran en las entidades de la *geodatabase* mostradas en la Tabla 11.

Tabla 11. Información geográfica para el tráfico rodado (Gómez et al., 2012)

| Entidades de la <i>geodatabase</i> | Requerimientos para el método <i>NMPB Routes 96</i> |
|------------------------------------|--|
| MDT | Elevaciones |
| Vías | Número de vehículos ligeros y pesados por hora Superficie de la vía Tipo de flujo Velocidad de los vehículos Ancho de la vía |
| Edificios | Altura del edificio |

Calculo de los niveles de ruido. La última etapa para el desarrollo del mapa de ruido por tráfico rodado es el cálculo de los niveles de ruido en el software de simulación acústica. Un aspecto importante de esta etapa es el tiempo empleado en el cálculo; para obtener los resultados de forma más oportuna se emplea el proceso mostrado en la Figura 11.

Figura 11. Proceso de cálculo para los niveles de ruido (Gómez et al., 2012)



Definición de las áreas de cálculo. Un aspecto que influye en el tiempo de cálculo del ruido, es el área para la cual se efectúa el proceso de cálculo; por ello, para minimizar el tiempo de cálculo, es recomendable seleccionar las vías con sus alrededores.

Simulación del ruido en las áreas de cálculo. En este punto es importante verificar que los parámetros de cálculo estén configurados de forma adecuada, para evitar errores en el proceso.

Representar los resultados de la simulación en ArcGIS. Cuando haya finalizado el cálculo de los niveles de ruido, el resultado se exporta al *object traffic_noise* y se representa en ArcGIS para predecir los niveles de ruido en la zona de estudio mediante el método de Kriging.

Predicción de los niveles de ruido. En la predicción de los niveles de ruido se utiliza la metodología geoestadística, aplicada sobre los resultados obtenidos en el software de simulación acústica, para conocer los niveles de ruido por tráfico rodado en la zona de estudio; para esto hay que tener la metodología geoestadística desarrollada anteriormente.

E. Elaboración de los mapas estratégicos de ruido ambiental y tráfico rodado

1) Análisis espacial

Los mapas estratégicos de ruido se caracterizan porque presentan en sus resultados a las personas, las viviendas y las áreas expuestas a los niveles de ruido de la zona de estudio; estos resultados se obtienen mediante las herramientas de geoprociamiento de ArcGIS.

Modelos para encontrar personas, viviendas y áreas expuestas a los niveles de ruido de la zona de estudio. Una vez se haya obtenido los *shapefiles* de los modelos mostrados en las Figuras 12 a 15, es importante calcular el área de cada *shapefile* para encontrar el atributo de personas y viviendas mediante la fórmula:

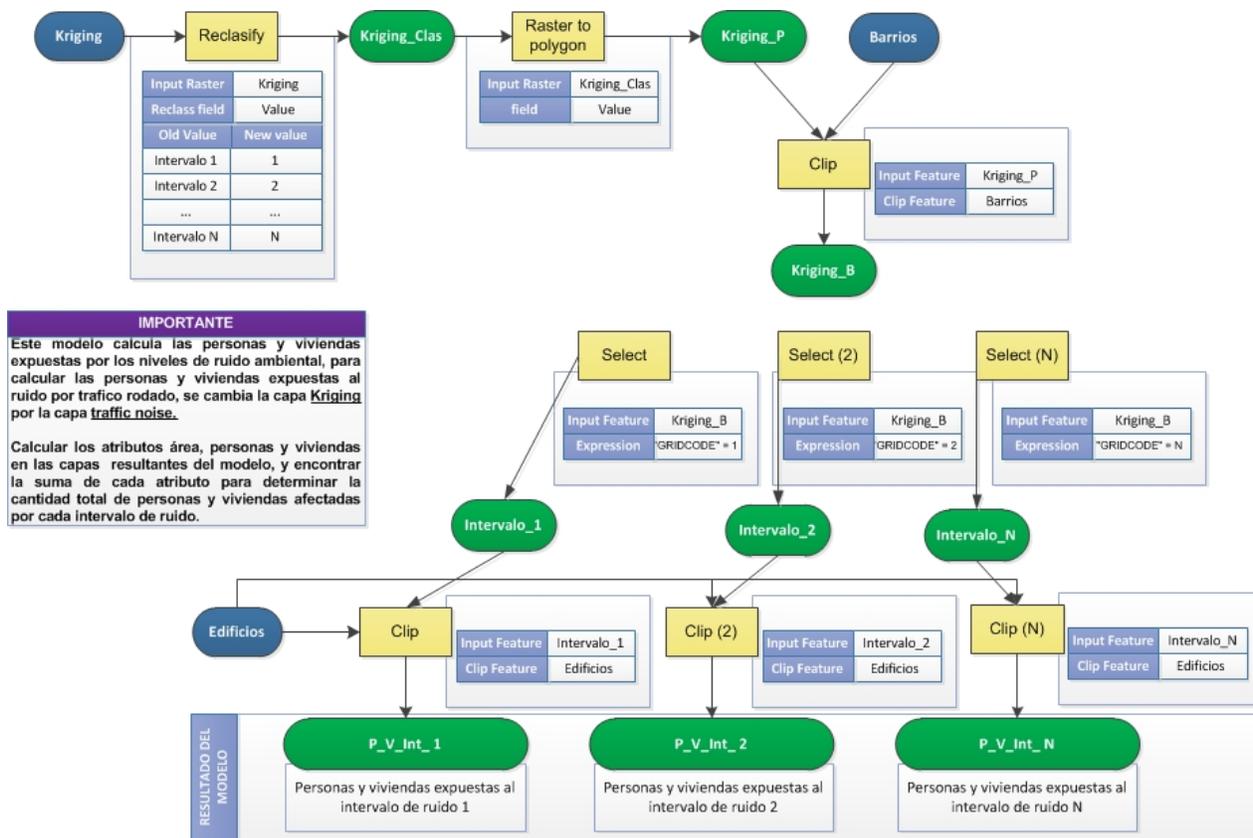
$$\text{Personas} = \text{Area} * \text{Densidad de la población}$$

$$\text{Viviendas} = \text{Area} * \text{Densidad de las viviendas}$$

Una vez encontrado el atributo de personas y viviendas en los *shapefiles* resultantes del modelo, se encuentran las personas, viviendas y áreas por cada *shapefile* resultante (intervalo de ruido), mediante la suma de los atributos: personas, viviendas y áreas, respectivamente.

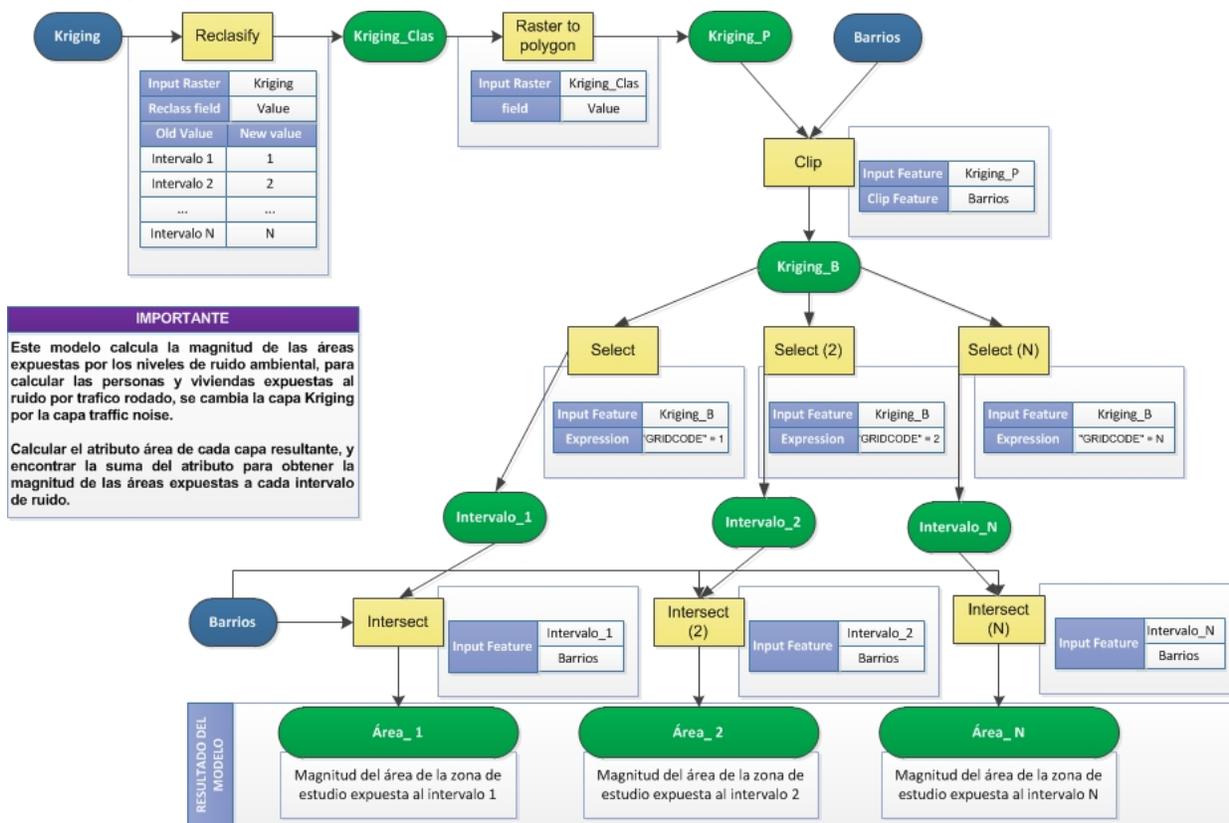
Debido a las limitaciones cartográficas, se calculan los porcentajes de las personas y viviendas para hacer una correspondencia con la cantidad real de habitantes y viviendas que se encuentran en la zona de estudio con el propósito de adoptar resultados aproximados a la realidad (Figura 16).

Figura 12. Modelo para encontrar las personas y viviendas expuestas a los niveles de ruido ambiental (Gomez et al., 2012)



IMPORTANTE
 Este modelo calcula las personas y viviendas expuestas por los niveles de ruido ambiental, para calcular las personas y viviendas expuestas al ruido por tráfico rodado, se cambia la capa **Kriging** por la capa **traffic noise**.
 Calcular los atributos área, personas y viviendas en las capas resultantes del modelo, y encontrar la suma de cada atributo para determinar la cantidad total de personas y viviendas afectadas por cada intervalo de ruido.

Figura 13. Modelo para encontrar las áreas expuestas a los niveles de ruido ambiental (Gomez et al., 2012)



IMPORTANTE
 Este modelo calcula la magnitud de las áreas expuestas por los niveles de ruido ambiental, para calcular las personas y viviendas expuestas al ruido por tráfico rodado, se cambia la capa **Kriging** por la capa **traffic noise**.
 Calcular el atributo área de cada capa resultante, y encontrar la suma del atributo para obtener la magnitud de las áreas expuestas a cada intervalo de ruido.

Figura 14. Modelo para encontrar las personas y viviendas expuestas a los niveles de ruido por tráfico rodado (Gomez et al., 2012)

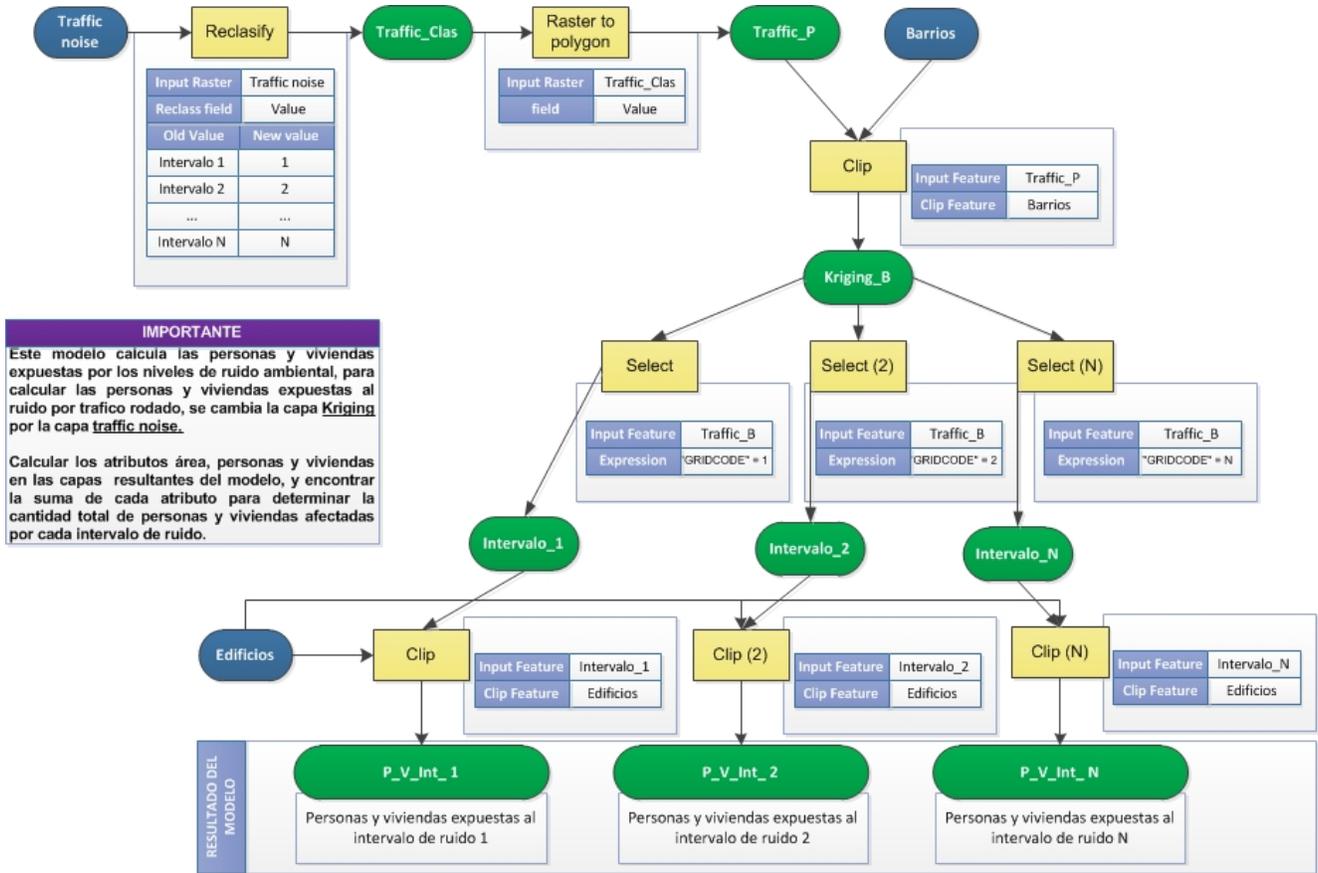


Figura 15. Modelo para encontrar las áreas expuestas a los niveles de ruido por tráfico rodado (Gomez et al., 2012)

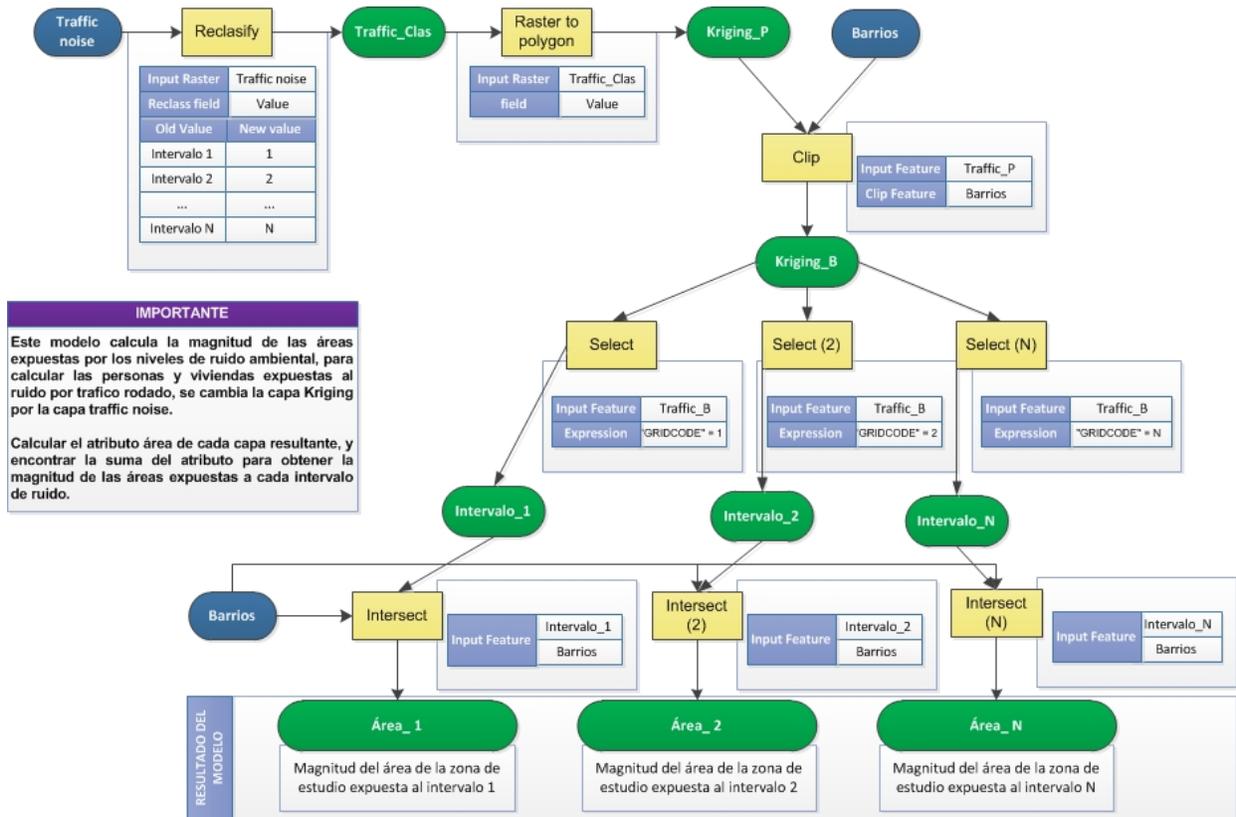


Figura 16. Correspondencia de los resultados de los modelos (Gomez et al., 2012)

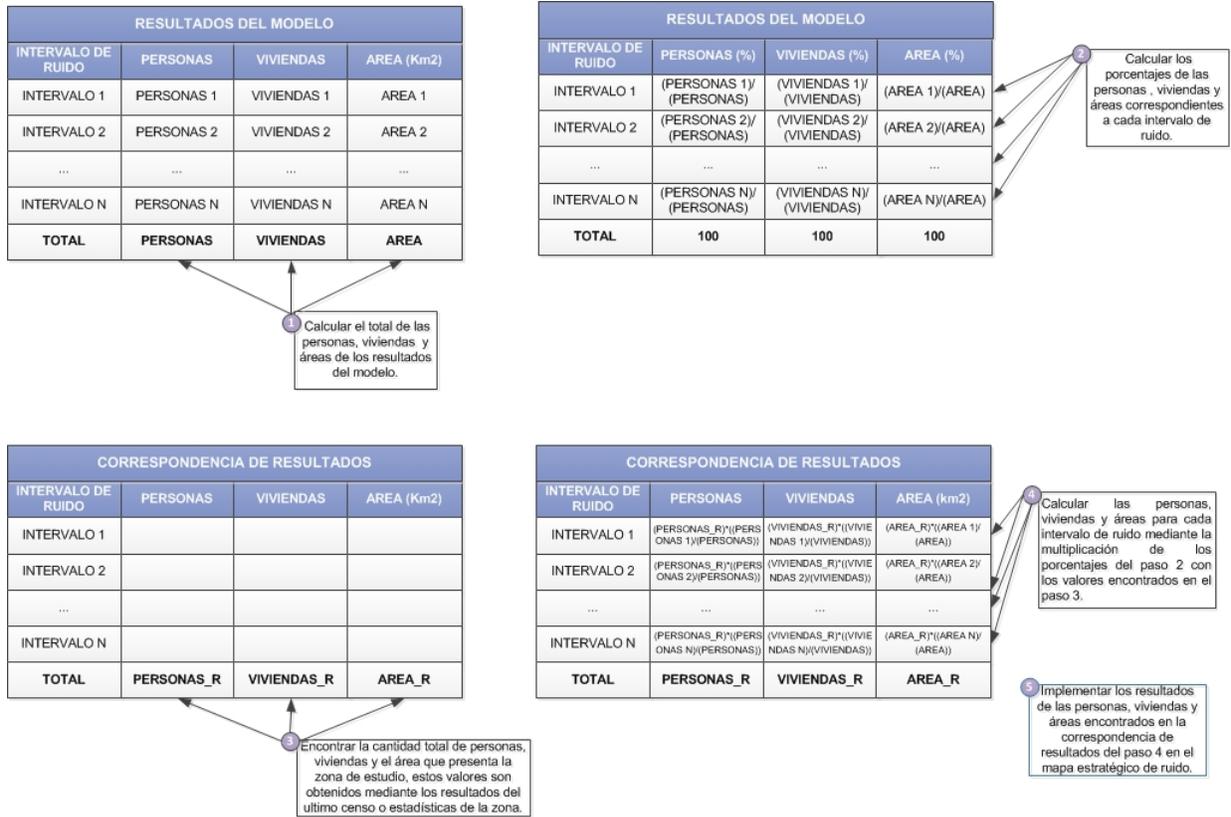
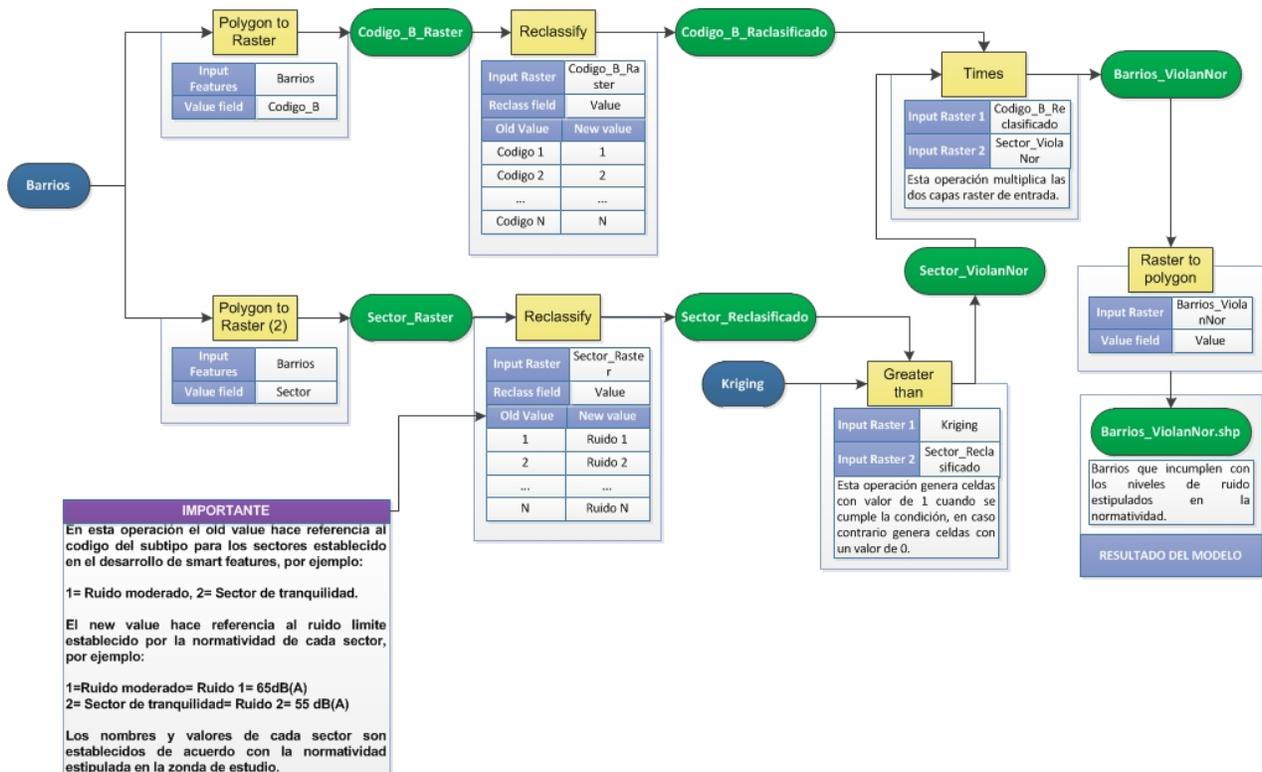


Figura 17. Modelo para encontrar los barrios que incumplen con los niveles de ruido de la normatividad (Gomez et al., 2012)



Modelo para encontrar los barrios que incumplen con los niveles de ruido estándar. Este modelo (Figura 17) permite establecer los barrios o zonas que necesitan la implementación de planes de acción para cumplir con los niveles de ruido establecidos en la normatividad.

2) Diseño de mapas

En el diseño de mapas se tienen en cuenta los aspectos incluidos en la definición de la vista de usuario (Tabla 4); el diseño del mapa de ruido debe ser adecuado para comunicar los resultados de forma efectiva a la ciudadanía.

III. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Del desarrollo del modelo se obtienen los siguientes resultados:

- Una metodología para la recolección y captura de los niveles de ruido y las fuentes de información para simular los niveles de ruido por tráfico rodado.
- La Caracterización del ruido ambiental mediante un modelo geoestadístico que permite conocer los niveles de ruido en cualquier punto del espacio geográfico de la zona de estudio.
- El empleo del método de cálculo *NMPB Routes 96* con un modelo geoestadístico para describir la estructura del ruido por tráfico rodado en la zona de estudio, para reducir el tiempo de elaboración de un mapa de ruido por tráfico rodado.
- El empleo de modelos de geoprocésamiento en ArcGIS, para calcular la cantidad de personas,

viviendas y áreas expuestas a los niveles de ruido ambiental y tráfico rodado en la zona de estudio, con el fin de reducir el tiempo de recolección de la información.

El modelo desarrollado presenta aportes importantes en el ámbito nacional e internacional, como son:

- La aplicación de la geoestadística para encontrar una función que permita calcular los niveles de ruido por ruido ambiental y tráfico rodado en la zona de estudio.
- La integración de los software de simulación acústica con el ArcGIS y el método de predicción Kriging, para reducir el tiempo de cálculo de los mapas estratégicos de ruido por tráfico rodado.
- El desarrollo de modelos de geoprocésamiento para reducir el tiempo de recolección de información sobre el número de personas, viviendas y áreas que se encuentran en la zona de estudio, y un modelo para encontrar las zonas que incumplen con la normatividad de la zona de estudio.
- El uso de las prácticas sugeridas por WG-AEN y EPA para recolectar la información de entrada, el sistema de información geográfica ArcGIS para el desarrollo del modelo y la metodología geoestadística para predecir los niveles de ruido en la zona de estudio, que permiten obtener un modelo de rigor científico en la elaboración de mapas estratégicos de ruido ambiental y tráfico rodado (ver Tabla 12).

Tabla 12. Caracterización del modelo

| Factores | Modelo | Ámbito regional Métodos empleados por el Dagma | Ámbito nacional Métodos empleados en Medellín | Métodos empleados en Manizales |
|--|--|--|--|--|
| - Fuentes representadas | - Ruido ambiental - Tráfico rodado | - Ruido ambiental | - Ruido ambiental | - Ruido ambiental |
| - Métodos de calculo | - Kriging universal - Kriging indicador - NPMB routes 96 | - Método inverso de la distancia | - Kriging ordinario - Kriging indicador - Kriging poligonal - Bandas rodantes | - Kriging ordinario - Kriging indicador - Kriging poligonal - Bandas rodantes |
| - Métodos de simulación | - Modelos de geoprocésamiento | | | |
| - Estimaciones sobre la población, viviendas y áreas afectadas | | | | |
| - Software | - Arcgis 9.2 | - Arcgis | - Geomedia Profesional 6.0 | - Geomedia Profesional 6.0 |
| - Normas de apoyo | - Software de simulación acústica - Directiva 2002/49 EC | - Resolución 0627 de 2006 | - Resolución 0627 de 2006 | - Resolución 0627 de 2006 |
| - Buenas practicas | - WG-AEN <i>final draft</i> - EPA Guía para la elaboración de mapas estratégicos de ruido | | | |

Es importante aclarar que para obtener mejores resultados hay que utilizar mapas actualizados de la zona de estudio, para que los cálculos de número de personas y viviendas, y áreas, sean lo más precisos posibles y lograr así una fiel representación de la situación acústica de la zona de estudio.

El trabajo de investigación desarrollado permite la obtención de dos modelos geoestadísticos para describir la estructura del ruido ambiental y tráfico rodado con el fin de encontrar los niveles de ruido de estas fuentes en la zona de estudio. Los resultados de los modelos de geoprocésamiento facilitan el diagnóstico de los efectos fisiológicos que deterioran la salud de las personas.

IV. REFERENCIAS

- Berglund, B., Lindvall, T., & Schwela, D. [Eds.]. (1999). Guidelines for community noise. Ginebra, Suiza: OMS
- Cressie, N. (1984). Towards resistant geostatistics. En G. Verly et al [Eds.], *Geostatistics for natural resources characterization* (pp. 21-44), Dordrecht, Países Bajos: Reidel
- Echeverri, C., Murillo, D., & Valencia, G. (2011). Simulación de ruido de tránsito automotor como herramienta para el rediseño de rutas de transporte público colectivo en el municipio de Medellín. *Revista de ingenierías de Medellín*, 10(18) [en línea]. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-33242011000100003&script=sci_arttext
- Environmental Protection Agency [EPA]. (2011). Guidance note for strategic noise mapping. Environmental Noise Regulations [Version 2]. Wexford, Ireland: EPA
- European Commission - Working Group Assessment of Exposure to Noise [WG-AEN]. (2006, enero 13). *Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure* [final draft]. Recuperado de http://ec.europa.eu/environment/noise/pdf/wg_aen.pdf
- Funes, N. (2004). *Métodos estadísticos en problemas espaciales* [Tesis]. Universidad Nacional de Tucumán: Argentina.
- Giraldo, R. (2006). *Introducción a la Geoestadística*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional
- Gómez, S., Chamorro, A., & Orozco, D. (2012). *Modelo para la representación de los mapas estratégicos de ruido ambiental y tráfico rodado* [Trabajo de grado]. Universidad Santiago de Cali: Colombia
- Henríquez, M. & Viloria, J. (1999). Número de observaciones para obtener semivariogramas de algunas propiedades de suelo y distancias de muestreos. *Agronomía Tropical*, 49(1), 5-17
- Journel, A.G. & Huijbregts, J. (1978). *Mining geostatistics*. New York, NY: Academic Press
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2006, abril 12). Resolución 0627 [Norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental]. *Diario Oficial no. 46239*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional
- Parlamento Europeo - Consejo de la Unión Europea (2002, julio 18). Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas* (pp.L189.12-189.25). Disponible en <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2002:189:0012:0025:ES:PDF>
- Pavon, I. & Recuero, M. (2006). *Noise maps: A tool for the demarcation of risk areas of noise exposure in the surface mining industry*, [ponencia en ICSV 13 Thirteenth International Congress on Sound and Vibration]. Recuperado de http://www.iav.org/archives_icsv/2006_icsv13/index9682.html-D659.html
- Prieto, M.(2009). *Estudio de la validación, errores e incertidumbre en la elaboración de mapas de ruido* [tesis]. Universidad Politécnica de Madrid: España
- Romeu, J., Jiménez, S., Genesca, M. & Capdevilla, R. (2006). Spatial sampling for night levels estimation in urban environments. *Journal of the Acoustical Society of America*, (120), 791-800
- Secretaría de Economía [Estados Unidos Mexicanos]. (2006). *NMX-AA-132-SCFI-2006. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra*. México D.F., México. Disponible en <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD02/NMX132AA2006.pdf>.
- Warrick, M.A. & Myers, D.E. (1987). Optimization of sampling locations for variogram calculations. *Water Resources Research*, 23(3), 496-500

CURRÍCULOS

Steven Gómez. Obtuvo el grado de Ingeniero Industrial en la Universidad Santiago de Cali en 2013. Al momento de escribir este artículo, forma parte de los Grupos de Investigación SIECO e INNOVA de la Facultad de Ingeniería de dicha Universidad.

Andrés Alfredo Chamorro. Obtuvo el grado de Ingeniero Industrial en la Universidad Santiago de Cali en 2012. Al momento de escribir este artículo, forma parte de los Grupos de Investigación SIECO e INNOVA de la Facultad de Ingeniería de dicha Universidad.

Dezly Orozco Aroca. Obtuvo el grado de Ingeniero Industrial en la Universidad Santiago de Cali en 2012. Al momento de escribir este artículo, forma parte de los Grupos de Investigación SIECO e INNOVA de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Santiago de Cali.