ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS

CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MÉTODO GEO-ESTADÍSTICO PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN ÁREAS URBANAS Y SU APLICACIÓN A UN SECTOR DE QUITO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MATEMÁTICO

WILMER RENÉ VILLARREAL OLMEDO
rreennee@outlook.com

DIRECTOR: DR. LUIS ALCIDES HORNA HUARACA
luis.horna@epn.edu.ec

2013

DECLARACIÓN

Yo, Wilmer René Villarreal Olmedo, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Wilmer René Villarreal Olmedo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Wilmer René Villarreal Olmedo, bajo mi supervisión.

Dr. Luis Alcides Horna Huaraca

DIRECTOR DE PROYECTO

Contenido

Lista de figuras i
Lista de tablas ii
Lista de anexos iii
Resumen iv
Abstract v
1. Introducción 1
2. Marco teórico 6
2.1. Modelización geo-estadística 6
2.1.1. Espacio probabilístico 6
2.1.2. Variable aleatoria 6
2.1.3. Proceso estocástico 7
2.1.4. Variograma 8
2.1.5. Método Kriging 10
2.1.6. Kriging ordinario 11
2.2. Medición del ruido 13
2.3. Métodos de construcción de mapas de ruido 18
2.3.1. Método RSL-90 20
3. Modelización 25
3.1. Muestra 25
3.2. Medida de distancia 28
3.3. Variograma 33
3.4. Modelo matemático 35
4. Resultados 38
4.1. Mapa de ruido 44
4.2. Indicadores 45
4.3. Validación 54
4.3.1. Comparación de sonómetros 54
4.3.2. Comparación de mapas 55
5. Conclusiones y recomendaciones 60
Referencias bibliográficas 64
Anexos 68

Lista de figuras

Figura 2.1.3.1: Variable regionalizada 7
Figura 2.1.4.1: Características de un variograma 10
Figura 2.2.1: Nivel sonoro continuo equivalente 16
Figura 2.2.2: Curvas isofónicas (Fuente [17]) 17
Figura 2.2.3: Curvas de ponderación acústica (Fuente [17]) 18
Figura 3.1.1: Delimitación del área de estudio 25
Figura 3.1.2: Puntos de muestra 27
Figura 3.1.3: Calibración del sonómetro 28
Figura 3.2.1: Vecindad de elementos en mapa raster 31
Figura 3.2.2: Valor de fricción o costo vs. Distancia 32
Figura 3.2.3: Distancia euclídea versus distancia con costo 32
Figura 3.3.1: Comparación de métricas 33
Figura 3.3.2: Variograma ajustado con modelo gaussiano 34
Figura 3.4.1: Interpolación de ejemplo 37
Figura 4.1.1: Algoritmo del modelo 38
Figura 4.1.2: optimización de procesamiento 39
Figura 4.1.1: Datos de la muestra (Elaboración: autor) 44
Figura 4.1.2: Mapa de contaminación acústica (método geo-estadístico) 45
Figura 4.2.1: Sectores censales área de estudio (Fuente: INEC) 46
Figura 4.2.2: Densidad poblacional por sectores censales (Fuente: INEC) 48
Figura 4.2.3: Combinación densidad y ruido mayor de 65 dB. (Elaboración: autor). 49
Figura 4.2.4: Mapa de afectación de la contaminación acústica (Elaboración: autor) 50
Figura 4.2.4: Número de pisos de cada edificación (Elaboración: autor) 51
Figura 4.2.5: Densidad poblacional (Elaboración autor) 52
Figura 4.2.6: Combinación densidad y ruido mayor a 65 dB. (Elaboración Autor) 53
Figura 4.2.7: Mapa de afectación de la contaminación acústica (Elaboración Autor) 54
Figura 4.3.2.1: Mapa de contaminación acústica con método RSL-90 (Fuente: Secretaría de Ambiente IMDMQ) 56
Figura 4.3.2.2: Diferencia entre mapas (Elaboración: autor) 57
Figura 4.3.2.3: Histograma para la variable diferencia entre mapas (Elaboración: autor) 58
Figura 5.1: Coincidencia entre rutas de buses en el área de estudio y niveles altos de ruido 61
Figura 5.2: Paleta de colores para mapas de ruido 62

Lista de tablas

TABLA 2.2.1: PRESIÓN SONORA Y NIVEL DE PRESIÓN (FUENTE [17]) 15
TABLA 2.2.1.1: CORRECCIONES POR TIPO DE SUPERFICIE 22
TABLA 2.2.1.2: CORRECCIONES POR DISTANCIA A LOS CRUCES 24
TABLA 3.2.1: DETERMINACIÓN DEL VALOR DE COSTO O FRICCIÓN EN LAS DISTANCIAS 30
TABLA 3.3.1: ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DEL VARIOGRAMA 34
TABLA 3.4.1: PUNTOS PARA EJEMPLO 36
TABLA 4.2.1: HOGARES Y PERSONAS POR ZONAS Y SECTORES CENSALES DEL ÁREA DE ESTUDIO 47
TABLA 4.2.2: DENSIDAD POBLACIONAL POR ZONAS Y SECTORES CENSALES DEL ÁREA DE ESTUDIO 47
TABLA 4.3.1.1: COMPARACIÓN DE SONÓMETROS 55
TABLA 4.3.2.1: COMPARACIÓN DE MAPAS (ELABORACIÓN: AUTOR) 59
TABLA 5.1: COLORES PARA PRESENTACIÓN DE RESULTADOS (INTERVALOS DE 5 DB) 62
TABLA 5.1: COLORES PARA PRESENTACIÓN DE RESULTADOS INTERVALOS DE 10 DB) 63

Lista de anexos

ANEXO 1 ALGORITMO A* (VARIANTE DEL ALGOTITMO DE DIJKSTRA) 69
ANEXO 2 VARIOGRAMA EXPERIMENTAL Y AJUSTE DE VARIOGRAMA TEÓRICO (LENGUAJE R) 75
ANEXO 3 RETIRAR PUNTOS FUERA DEL PERÍMETRO (LENGUAJE R) 81
ANEXO 4 TRANSFORMACIÓN DE MAPA RASTER A MATRIZ DE FRICCIÓN (LENGUAJE R) 82
ANEXO 5 INTERPOLACIÓN KRIGING ORDINARIO CON MÉTRICA DE COSTO (LENGUAJE R) 85
ANEXO 6 PROGRAMA PAR PRUEBA DE HIPÓTESIS SOBRE LA DIFERENCIA ENTRE MAPAS (LENGUAJE R) 90
ANEXO 7 TABLA DE MEDICIONES 92
ANEXO 8 PALETA DE COLORES PARA PRESENTACIÓN DE MAPAS DE CONTAMINACIÓN ACÚSTICA 94
ANEXO 9 DVD ADJUNTO 95

Resumen

Se propone un método basado en la interpolación geo-estadística Kriging y la métrica de costo para construir mapas de contaminación sonora en áreas urbanas. Se hizo la modelización y se construyeron los mapas de contaminación acústica e indicadores de afectación asociados a estos mapas para un sector del Centro Histórico de Quito a partir de datos recolectados para esta investigación, y posteriormente se realizó una validación con los métodos ya establecidos basados en la acústica.

Palabras clave: Mapas de ruido, Contaminación acústica, Geo-estadística, Método Kriging, Distancia de costo.

Abstract

A method for mapping noise pollution in urban areas based on Kriging geostastical interpolation and cost metric is proposed. The modelling and noise pollution maps were made and applied to a part of the “Centro Histórico de Quito”, with the construction of affectation indicators associated to these map from data collected for this investigation, subsequently a validation was made with established methods based on acoustic.

Key words: Noise pollution maps, Acoustic pollution, Geo-statistics, Kriging interpolation, Cost distance, Cost metric.

1. Introducción

El ruido es sonido no deseado y por ser sonido es una variación de presión que se propaga en un medio elástico y tiene propiedades como frecuencia, intensidad, duración, intermitencia y potencia; propiedades que hacen difícil su estudio por la subjetividad que generan.

Una de las primeras acciones tomadas para controlar el ruido fue el establecimiento del Acta de Control de Ruido de 1972, la cual se convirtió en ley (PL 92574) el mismo año. En esta acta la Agencia para la Polución Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) estaba obligada a establecer criterios de protección a la población frente al ruido. El informe de la Agencia fue publicado en 1974 y fue la base de los programas federales de largo plazo para controlar la contaminación por ruido en Estados Unidos de América [32, pág.: 443].

Más tarde el esfuerzo dejó de ser aislado en países o ciudades específicas y pasó al plano internacional con iniciativas como la normalización o la creación de directivas comunitarias.

En cuanto a la normalización se crean primero las directivas ISO/IEC en base a las cuales se aprueba la norma ISO-1996 Acústica: Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental, en sus partes 1: Magnitudes básicas y métodos de evaluación, y 2: Determinación de niveles de precisión acústica. El objetivo de esta norma es el de contribuir a la armonización internacional de métodos de descripción, medición y evaluación del ruido ambiental de cualquier fuente. La primera edición de esta norma se da en 1982 para luego ser modificada en 1987, 1998, 2003 y 2007, las normas vigentes en su últimas versión son ISO-1996 parte 1 del 2003 e ISO-1996 parte 2 del 2007 [21]. Basándose en esta serie de normas y los principios en ellas establecidos se pueden desarrollar normas y regulaciones nacionales y locales así como establecer reglamentos y límites aceptables de ruido ambiental.

Cabe aclarar que la Organización Internacional de Normalización (ISO International Organization for Standardization) es una federación a nivel mundial de organismos nacionales de normalización (162 países miembros de 205 países en el mundo [21])

y que la preparación de las normas ISO la realizan comités técnicos que trabajan en estrecha colaboración con la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC International Electrotechnical Commission) en todas las materias de normalización electrónica. También la publicación de un proyecto de norma internacional requiere de la aprobación de al menos el 75% de los organismos miembros que tengan derecho a voto.

En la Unión Europea se estableció la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. Esta directiva pretende "establecer un enfoque común destinado a evitar, prevenir o reducir con carácter prioritario los efectos nocivos, incluyendo las molestias de la exposición al ruido ambiental. Con este fin, se aplicarán progresivamente las medidas siguientes:

a) la determinación de la exposición al ruido ambiental, mediante la elaboración de mapas de ruidos según métodos de evaluación comunes a los Estados miembros;

b) poner a disposición de la población la información sobre el ruido ambiental y sus efectos;

c) la adopción de planes de acción por los Estados miembros, tomando como base los resultados de los mapas de ruidos, con vistas a prevenir y reducir el ruido ambiental siempre que sea necesario y, en particular, cuando los niveles de exposición puedan tener efectos nocivos en la salud humana y a mantener la calidad del entorno acústico cuando ésta sea satisfactoria." [30, pág.: 13].

A partir de esta directiva, los países de la Comunidad Europea han avanzado mucho en el estudio, monitoreo y regulación de este fenómeno hasta convertirse en un referente para otros países.

Actualmente, el control de este tipo de contaminación se enfoca en sus fuentes básicas (1) ruido de transporte de superficie (2) ruido de aeronaves (3) ruido industrial y de construcción (4) ruido residencial [32, pág.: 445].

Por su potencial nocivo en la psicología y fisiología humana, el ruido o contaminación sonora se ha convertido en un problema de salud pública para las

sociedades [33, 2013]. Por ejemplo, se sabe que altos niveles de ruido pueden provocar desde malos estados de ánimo, pasando por problemas auditivos o deterioro de la audición[1], la inteligibilidad de las palabras [29, pg.: 25], hipertensión arterial, disturbios del sueño, bajo rendimiento escolar [25], hasta enfermedades isquémicas del corazón; sin contar con el estrés generado, el cual a su vez puede desencadenar en incrementos de la accidentalidad laboral o estimular conductas agresivas o incluso anti-sociales [33].

Otra consecuencia, quizás anecdótica, de la contaminación sonora es la revalorización o depreciación de las viviendas en áreas residenciales de las ciudades; como lo muestra un estudio en la ciudad de Hamburgo Alemania: el precio de las propiedades disminuyó en 0,23% ante un incremento de 1 dB (A) en el ruido por tráfico vehicular. [3].

La ciudad de Quito no es la excepción ya que sus habitantes están regularmente expuestos a niveles de ruido de entre 60 y 65 decibelios, pudiendo sobrepasar en determinados lugares los 70 decibelios propuestos por la OMS como límite superior deseable para la exposición al ruido para una persona [4].

El Municipio de Quito ha orientado sus esfuerzos y recursos al entendimiento y control de este fenómeno; es así que desde el año 2003 se han venido realizando estudios al respecto y actualmente tiene un sistema de monitoreo de la contaminación acústica en la ciudad. Dicho sistema de monitoreo consiste en tres estaciones fijas; una ubicada al norte de la ciudad en el barrio Jipijapa, otra ubicada en el centro histórico, Plaza San Francisco, y la tercera en el sur, Turubamba [26].

También se ha avanzado en el ámbito legal, es así que ahora el Distrito Metropolitano de Quito cuenta con el Capítulo II: De La Contaminación Acústica en la ordenanza 213 y con la norma técnica correspondiente [19] y [20], las cuales establecen límites para los niveles de ruido causado por fuentes fijas y móviles y sanciones para quienes incumplen con estos límites; además de que establecen los métodos y procedimientos para determinar los niveles de ruido.

[1] Es el aumento del umbral de la audición y ocurre predominantemente en las frecuencias de 3 KHz a 6 KHz, un verdadero problema si se considera que la mayoría de la comunicación hablada está entre los 100 Hz y 6 000 Hz.

En el ámbito Nacional, el Distrito Metropolitano de Quito está sujeto a las regulaciones y controles ambientales nacionales regidos por el Ministerio de Ambiente como Autoridad Ambiental Nacional (AAN), el cual, a través de leyes recopiladas en el Texto Unificado de legislación Secundaria (TULAS) en su libro VI: DE LA CALIDAD AMBIENTAL, Título IV: Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, establece responsabilidades respecto al control, regulación y monitoreo de la contaminación ambiental en general, sin llegar al nivel específico que la contaminación acústica requiere.

En este contexto, este estudio pretende avanzar en el entendimiento del fenómeno y aportar con la aplicación de la geo-estadística en la creación de modelos matemáticos que permitan la construcción de mapas de contaminación acústica; herramienta básica para la planificación de políticas orientadas al control y regulación del fenómeno. Además, se pretende aplicar dicho modelo en un sector del Centro Histórico de Quito donde se realizarán mediciones propias para este estudio debido a que las mediciones de las estaciones de monitoreo están demasiado separadas y no son suficientes para la construcción de mapas de contaminación acústica.

El enfoque estadístico suele ser más práctico en algunos casos que el enfoque determinístico para resolver o entender problemas tanto teóricos como técnicos, principalmente cuando hay muchos parámetros o individuos involucrados. En particular, El aprovechamiento de la estadística en fenómenos acústicos no es nuevo y se ha venido utilizando por la industria en aplicaciones en las que las vibraciones o los ruidos constituyen una parte importante del diseño. Así por ejemplo, se ha utilizado en predicción de la transmisión de ruidos al interior de las cabinas de autos, aeronaves, trenes, etc.; en la propagación de ruidos hacia el interior y hacia el exterior de naves marinas o aéreas (incluyendo naves militares); diseño de sistemas de sonido para autos, aviones, trenes; en la predicción de la transmisión de ruidos y vibraciones en los edificios y hasta en el diseño de electrodomésticos como lavaplatos, refrigeradoras, lavadoras, etc.

El fundamento para el uso de la estadística en estas aplicaciones acústicas es que bajo ciertas condiciones (como altas frecuencias), el flujo de energía entre dos

osciladores enlazados es proporcional a la diferencia en la energía de los osciladores; o, bajo ciertas condiciones, la energía en forma de vibración se comporta como la energía en forma de calor y fluye desde los “puntos calientes” hacia los “puntos fríos” a un ritmo proporcional a la diferencia de “temperatura”. Este enfoque estadístico es conocido como Análisis estadístico energético (Statistical Energy Analisys SEA) [10], [14].

Tampoco el fenómeno de la propagación del sonido (ruido) se escapa a diferentes enfoques a más del determinístico; se han planteado otros enfoques como la descomposición rectangular adaptativa que presenta ventajas en el diseño de estructuras cerradas con superficies complejas [27].

Se han aplicado modelos estadísticos a la predicción de la absorción de barreras en áreas urbanas obteniendo valores reducidos de ruido en posiciones protegidas por algún tipo de barrera acústica y evitando complicados métodos numéricos para resolver ecuaciones de ondas acústicas [31].

Por último, se ha intentado reemplazar el modelo acústico de propagación de onda por un modelo óptico en el que se reemplaza al sonido por luz y se emplean principios ópticos de propagación de la luz para predecir el nivel de ruido asociado a un punto receptor [13].

2. Marco teórico

2.1. Modelización geo-estadística

Teóricamente, el enfoque para la construcción de mapas de contaminación acústica para el presente trabajo es el de un proceso estocástico aplicado a variables espaciales.

2.1.1. Espacio probabilístico

Un espacio probabilístico $(\Omega, \mathrm{B}, \mathrm{P})$ está formado por tres elementos: Ω el conjunto de todos los sucesos elementales posibles, B la sigma-álgebra de subconjuntos de Ω, es decir los eventos, y P la función de probabilidad que cumple los enunciados de Kolmogórov [15].

2.1.2. Variable aleatoria

Una variable aleatoria Z es una función medible definida sobre un espacio probabilístico $(\Omega, \mathrm{B}, \mathrm{P})$

$$Z(): \Omega \longrightarrow \mathbb{R} \qquad [2.1.2.1]$$

que asigna valores en los números reales $\mathbb{R}$ a los elementos de Ω.

La condición de medibilidad establece que:

$$\forall\, A \in B(\mathbb{R}) \qquad [Z^{-1}(A)] \in B \qquad [2.1.2.2]$$

y además, la probabilidad de que ocurra el evento $Z^{-1}(A)$ es igual a la probabilidad de que ocurra el evento A.

Donde $B(\mathbb{R})$ es la sigma-álgebra de Borel[2] de los números reales.

[2] Una sigma-álgebra sobre el conjunto de los reales $\mathbb{R}$ es una familia $B(\mathbb{R})$ no vacía de subconjuntos de $\mathbb{R}$ tal que: $\emptyset \in B(\mathbb{R})$, si $A \in B(\mathbb{R})$ entonces $(\mathbb{R} - A) = A^c \in B(\mathbb{R})$ y, si $A_1, A_2 \ldots . A_n \in \mathbb{R}$ entonces también $A_1 \cup A_2 \cup \ldots . \cup A_n \in \mathbb{R}$. Para que $B(\mathbb{R})$ sea una sigma-álgebra de Borel o boreliana, los elementos $A \in B(\mathbb{R})$ tiene que ser conjuntos abiertos.

En otras palabras, para cada $z \in \mathbb{R}$, el conjunto de resultados elementales para los cuales la variable aleatoria Z toma valores iguales o menores que z es un suceso de B sobre el cual podemos definir sin ambigüedad una probabilidad acorde con P.

Cuando A es un intervalo de la forma $(-\infty, z]$ se define la función de distribución de la variable aleatoria Z mediante:

$$P[Z \leq z] = F_Z(z) \qquad [2.1.2.3]$$

2.1.3. Proceso estocástico

Un proceso estocástico es una colección o conjunto de variables que toman valores en un espacio probabilístico $(\Omega, \mathrm{B}, \mathrm{P})$ y que están indexadas por un conjunto T; es decir, es una colección indexada de variables aleatorias.

Aquí notemos que podemos remplazar el conjunto T (que normalmente es el tiempo) por un dominio D (que puede ser $\mathbb{R}^2$)[3] y tendremos un proceso estocástico al que llamaremos ***función aleatoria*** y a cuyas realizaciones las llamaremos ***variables regionalizadas*** [2, pág.: 13]. En otras palabras, las variables regionalizadas son variables aleatorias Z_u asociadas a los puntos u del dominio D como se muestra en la figura 2.1.3.1 donde el dominio es $\mathbb{R}^2$ y los puntos A, B y C tienen sus variables regionalizadas Z_A, Z_B y Z_C respectivamente, las cuales a su vez tienen sus funciones de distribución asociadas.

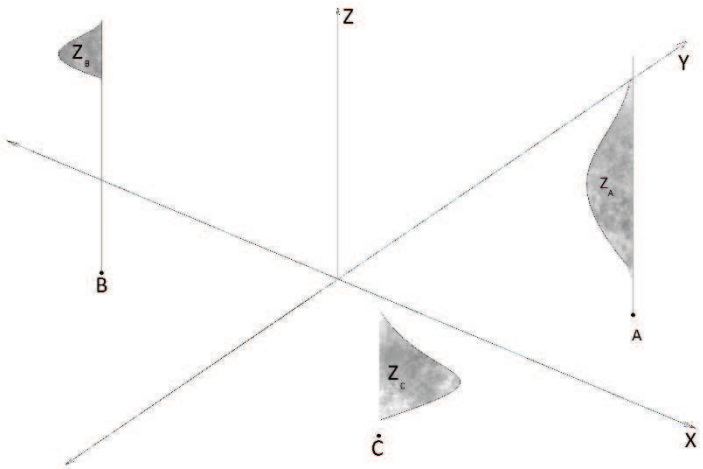

Figura 2.1.3.1: Variable regionalizada

[3] Al hacer esto se extendió la aplicación de los procesos estocásticos del análisis de series de tiempo a la geo-estadística.

De acuerdo con el teorema de Daniell-Kolmogorov un proceso estocástico queda definido al especificar la función de distribución conjunta de cualquier subconjunto finito de variables $\{Z_1, \dots \dots, Z_n\}$. A dicha distribución conjunta se la conoce como la distribución del proceso estocástico [24, pág.: 9] y se la representa por:

$$\mathrm{F}\left(Z_{u_1}, \dots, Z_{u_n};\, u_1, \dots, u_n\right) = \mathrm{P}\left(Z_{u_1} \leq z_1\,;\, \dots.,\, Z_{u_n} \leq z_n\right) \qquad [2.1.3.1]$$

donde los $u_1, \dots, u_n$ son puntos en el plano de la forma $u_i = (x_i, y_i)$

Un proceso estocástico es llamado ***estacionario ante traslaciones*** u ***homogéneo*** cuando su función de distribución no cambia frente a traslaciones del origen del dominio D.

$$\mathrm{F}\left(Z_{u_1}, \dots, Z_{u_n};\, u_1, \dots, u_n\right) = \mathrm{F}\left(Z_{u_1+\mathbf{v}}, \dots, Z_{u_n+\mathbf{v}};\, u_1+\mathbf{v}, \dots, u_n+\mathbf{v}\right), \qquad [2.1.3.2]$$

donde $\mathbf{v}$ es un vector de $\mathbb{R}^2$ y corresponde a la traslación del origen.

Un proceso estocástico se considera ***isotrópico*** o ***estacionario ante rotaciones*** si su función de distribución no cambia frente a rotaciones dadas en los ejes el dominio D [24, pág.: 10].

$$\mathrm{F}\left(Z_{u_1}, \dots, Z_{u_n};\, u_1, \dots, u_n\right) = \mathrm{F}\left(Z_{\mathcal{R}_\theta u_1}, \dots, Z_{\mathcal{R}_\theta u_n};\, \mathcal{R}_\theta u_1, \dots, \mathcal{R}_\theta u_n\right), \qquad [2.1.3.3]$$

donde $\mathcal{R}_\theta$ es el operador de rotación que en $\mathbb{R}^2$ es:

$$\mathcal{R}_\theta = \begin{bmatrix} cos\ \theta & -sen\ \theta \\ sen\ \theta & \cos\theta \end{bmatrix} \qquad [2.1.3.4]$$

Es de notar que un proceso estocástico homogéneo implica un mismo valor esperado para todos los puntos del dominio, mientras que un proceso isotrópico implica que el fenómeno no presenta tendencias direccionales. Estas dos restricciones sirven para poder construir estimadores y extrapolaciones.

2.1.4. Variograma

Un variograma es una función $2\gamma(\cdot,\cdot)$ que se define sobre un proceso estocástico espacial, es una medida del grado de dependencia espacial de la variable aleatoria asociada a dicho proceso estocástico y se define como en la fórmula 2.1.4.1.

$$2\gamma(Z_u\,,\,Z_v) = E[|[Z_u - E(Z_u)] - [Z_v - E(Z_v)]|^2] \qquad [2.1.4.1]$$

Visto de otra manera, es la varianza de la diferencia entre dos realizaciones espaciales u y $v \in D$ [28].

$$2\gamma(Z_u\,,\,Z_v) = VAR[Z_u - Z_v] = E[(Z_u - Z_v)^2] \qquad [2.1.4.2]$$

El estimador no sesgado de la varianza de [2.1.4.2] viene dado por [28]:

$$2\gamma^*(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{|u_i - u_j| = |h|} \left(Z_{u_i} - Z_{u_j}\right)^2 \qquad [2.1.4.3]$$

donde $N(h)$ es el número de pares $u_i,\ u_j \in D$ tales que $|u_i - u_j| = |h|$

El estimador de la ecuación 2.1.4.3 es no sesgado porque su esperanza es igual al valor estimado:

$$E[\gamma^*(h)] = \frac{1}{2 \times N(h)} \sum_{|u_i - u_j| = |h|} E\left[\left(Z_{u_i} - Z_{u_j}\right)^2\right] =$$

$$= \frac{1}{2 \times N(h)} \sum_{|u_i - u_j| = |h|} 2\gamma(u_i - u_j) = \frac{2 \times N(h)}{2 \times N(h)} \times \gamma(h) = \gamma(h) \qquad [2.1.4.4]$$

como se demuestra en [6].

Para un proceso estocástico estacionario la función variograma está relacionada con la función covarianza de la siguiente manera [6]:

$$2\gamma(Z_u\,,\,Z_v) = Cov(Z_u\,,\,Z_u) + Cov(Z_v\,,\,Z_v) - 2Cov(Z_u\,,\,Z_v) \qquad [2.1.4.5]$$

A la función $\gamma(\cdot\,,\,\cdot)$ se la conoce como semi-variograma y presenta características:

El rango en un variograma es la distancia a partir de la cual la variabilidad se estabiliza; el efecto nugget (o efecto pepita) es una variabilidad que se manifiesta a distancias mínimas y es intrínseca al fenómeno en estudio y, el valor sill o (montura) es el valor máximo de variabilidad (ver figura 2.1.4.1).

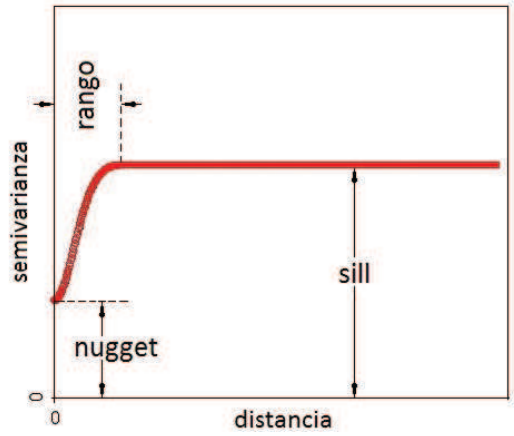

Figura 2.1.4.1: Características de un variograma

2.1.5. Método Kriging

El método Kriging es un grupo de técnicas geo-estadísticas de interpolación que parte de un estimador lineal que combina factores o pesos $w_i(x_0)$, $i \in \{1,2,\ldots.,n\}$ con valores conocidos Z_{x_i} , $i \in \{1,2,\ldots.,n\}$ para hacer inferencias de manera óptima sobre valores no observados Z_{x_0} del proceso estocástico [11, pág.: 51] de la siguiente manera:

$$\hat{Z}_{x_0} = \sum_{i=1}^{n} w_i(x_0) * Z_{x_i} \qquad [2.1.5.1]$$

o, en su forma matricial:

$$\hat{Z}_{x_0} = \boldsymbol{W}(x_0) * \boldsymbol{Z} = \begin{bmatrix} w_1(x_0) \\ : \\ w_n(x_0) \end{bmatrix}^T * \begin{bmatrix} Z_{x_1} \\ : \\ Z_{x_n} \end{bmatrix}, \qquad [2.1.5.2]$$

para obtener una estimación $\hat{Z}_{x_0}$ de Z_{x_0} en cada punto $x_0 \in D$ no evaluado.

Como las mediciones Z_{x_i} , $i \in \{1,2,\ldots.,n\}$ están dadas[4], el método entonces consiste en encontrar los pesos $w_i(x_0)$ para cada $x_0 \in D$ a interpolar pero que minimicen la varianza del estimador, dada por:

[4] Obtenidas en mediciones por muestreo

$$VAR\left[\hat{Z}_{x_0} - Z_{x_0}\right] = \sigma^2(x_0) \qquad [2.1.5.3]$$

y bajo la condición de no sesgo para la esperanza del estimador:

$$E\left[\hat{Z}_{x_0} - Z_{x_0}\right] = 0 \qquad [2.1.5.4]$$

A la variable Z_{x_0} la podemos descomponer en una parte residual R_{x_0} mas una parte de tendencia M_{x_0} ($Z_{x_0} = M_{x_0} + R_{x_0}$) pero con la condición de que la parte residual sea una variable aleatoria regionalizada de media cero y varianza estacionaria, es decir, que no dependa de la posición x_0 sino de la distancia **h** desde o hasta x_0

Los tres tipos más comunes de kriging difieren únicamente en el tratamiento que le dan a la parte de tendencia M_{x_0} del estimador.

2.1.6. Kriging ordinario

En este método asumimos que Z_{x_0} tiene una media distinta de cero (que no conocemos). Usando la propiedad de estacionariedad tenemos que:

$$E[Z_x] = m \quad para\ todo\ x \in D \qquad [2.1.6.1]$$

Entonces

$$E\left[\hat{Z}_{x_0}\right] = E\left[Z_{x_0}\right] = \sum_{i=1}^{n} w_i(x_0) * Z_{x_i} = m \qquad [2.1.6.2]$$

Así que los pesos deben cumplir con:

$$\sum_{i=1}^{n} w_i(x_0) = 1 \qquad para\ todo\ x_0 \in D \qquad [2.1.6.3]$$

a la que se le llama la condición de no-sesgo [11, pág.: 55].

Remplazando la ecuación 2.1.5.1 en la ecuación de la varianza de la estimación[5] (ecuación 2.1.5.3) tenemos que la varianza del estimador $\hat{Z}_{x_0}$ en el punto x_0 es:

$$\sigma^2(x_0) = VAR\left[\hat{Z}_{x_0} - Z_{x_0}\right] = \mathrm{E}\left[\left(Z_{x_0} - \hat{Z}_{x_0}\right)^2\right] = \mathrm{E}\left[\left(Z_{x_0} - \sum_{i=1}^{n} w_i(x_0) * Z_{x_i}\right)^2\right] \quad [2.1.6.4]$$

Por la condición 2.1.6.3:

$$\left(Z_{x_0} - \sum_{i=1}^{n} w_i(x_0) * Z_{x_i}\right)^2 = -\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_i(x_0) * w_j(x_0) * \left(Z_{x_i} - Z_{x_j}\right)^2 + \sum_{i=1}^{n} w_i\,(x_0) * (Z_{x_0} - Z_{x_i})^2 \quad [2.1.6.5]$$

Entonces,

$$\mathrm{E}\left[\left(Z_{x_0} - \sum_{i=1}^{n} w_i(x_0) * Z_{x_i}\right)^2\right] = -\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_i(x_0) * w_j(x_0) * E\left(Z_{x_i} - Z_{x_j}\right)^2 + \sum_{i=1}^{n} w_i\,(x_0) * E(Z_{x_0} - Z_{x_i})^2 \quad [2.1.6.6]$$

Pero por 2.1.4.2 los valores esperados de [2.1.6.6] son los variogramas, entonces:

$$\sigma^2(x_0) = -\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_i(x_0) * w_j(x_0) * \gamma\left(Z_{x_i}, Z_{x_j}\right) + \sum_{i=1}^{n} w_i\,(x_0) * \gamma\left(Z_{x_0}, Z_{x_i}\right) \quad [2.1.6.7]$$

El estimador BLUE (Best Linear Unbiesed Estimator) es el que minimiza la varianza de la estimación con respecto a la condición de no-sesgo. Esta restricción puede ser tratada con la ayuda de un multiplicador de Lagrange λ haciendo que la función a ser optimizada sea:

$$\mathrm{F}(w_i) = \sigma^2(x_0) - 2\,\lambda\,\left[\sum_{i=1}^{n} w_i(x_0) - 1\ \right] \quad [2.1.6.8]$$

El mínimo de esta función se obtiene cuando las derivadas parciales con respecto a los parámetros desconocidos w_i son nulas:

$$\frac{\partial\,\mathrm{F}(w_i)}{\partial\,w_i} = 0 \qquad \forall\ \mathrm{i}\ \in \{1,2,\ldots\ldots,\mathrm{n}\} \quad [2.1.6.9]$$

Lo que implica que tenemos que resolver el sistema de $(\mathrm{n}+1)$ ecuaciones lineales:

[5] Que es la que debemos minimizar para tener un estimador optimo

$$\sum_{j=1}^{n} w_i(x_0) * \gamma(x_j, x_i) - \gamma(x_i, x_o) + \lambda = 0 \quad \forall\, i \in \{1,2,\ldots,n\} \qquad [2.1.6.10]$$

$$\sum_{i=1}^{n} w_i(x_0) = 1 \qquad [2.1.6.11]$$

o, en su forma matricial:

$$\begin{bmatrix} w_1(x_0) \\ \vdots \\ w_n(x_0) \\ \lambda \end{bmatrix}^t * \begin{bmatrix} \gamma(x_1,x_1) & \vdots & \gamma(x_1,x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n,x_1) & \vdots & \gamma(x_n,x_n) & 1 \\ 1 & \vdots & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_1,x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n,x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \qquad [2.1.6.12]$$

tomado de [2, págs.: 40,41 y 42]

Resolviendo tenemos:

$$\begin{bmatrix} w_1(x_0) \\ \vdots \\ w_n(x_0) \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_1,x_1) & \vdots & \gamma(x_1,x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n,x_1) & \vdots & \gamma(x_n,x_n) & 1 \\ 1 & \vdots & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \gamma(x_1,x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n,x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \qquad [2.1.6.13]$$

2.2. Medición del ruido

El ruido es sonido y como tal es una vibración del aire que se propaga en forma de onda de presión. Cuando no hay sonido la presión es constante e igual a la presión atmosférica ($P_o = 10^5$ Pa) pero cuando aparece una perturbación como por ejemplo la vibración de un objeto, se produce una variación de presión p respecto de la presión de equilibrio (P_o o presión atmosférica) [17] de tal forma que:

$$p = \mathrm{P} - P_0 \qquad [2.2.1]$$

Podemos decir entonces que el ruido (sonido) es consecuencia de la aparición de un diferencial en la presión del aire respecto de la presión de equilibrio o presión atmosférica.

Dado que el aire es un sistema mecánico y la variación de presión es energía; este diferencial de presión debe propagarse obedeciendo el principio de conservación

de la energía, es así que la energía sonora involucrada en la perturbación se propaga junto con la perturbación (o deferencial de presión) en forma de onda tridimensional. Es por esta razón que el deferencial de presión p (medido en $\text{Pascales} = \text{Pa} = \text{N/m}^2$) transmitido por una onda sonora se mide perpendicular o normal a la dirección de propagación de la onda.

En la naturaleza las diferentes especies animales han adaptado distintos sentidos a sus necesidades de supervivencia y dentro de cada sentido las distintas especies pueden captar distintos rangos o niveles de estímulo. Es así que los humanos podemos captar sonidos cuyo diferencial de presión va desde los 0,000020 N/m^2 (con una frecuencia de 1KHz) hasta los 20 N/m^2 (umbral del dolor) como se ve en la tabla 2.2.1.

Notemos que el rango de diferencial de presión que podemos captar es extremadamente amplio. Por esta razón y porque inicialmente se pensó que "la respuesta del oído a la intensidad sonora era logarítmica" se decidió establecer el nivel de presión sonora L_p[6] como un nivel relativo al umbral de audición humana en una escala logarítmica:

$$L_p = 20 \times log_{10}\left(\frac{p}{p_{ref}}\right) \qquad [2.2.2]$$

Donde p_{ref} es la presión de referencia igual a $p_{ref} = 20 \times 10^{-6}\ Pa$.

Al ser este un número sin unidades el nivel de presión sonora se expresa (por definición) en decibeles (dB). Resulta que Un incremento de 1 dB no representa un incremento fijo de la presión sino un aumento relativo de un 12,2% respecto del nivel de presión anterior. El valor de p_{ref} se eligió para que coincida con el umbral de audición normal para 1 kHz, lo que implica que un sonido se puede percibir cuando $L_p > 0$ dB [17].

[6] Adoptamos las siglas en inglés por su universalidad L_p viene de Level of pressure

Tabla 2.2.1: Presión sonora y nivel de presión (Fuente [17])

FUENTE	$\boldsymbol{p}\ (\mathbf{Pa} = \mathbf{Pascales} = \mathbf{N/m^2})$	$\boldsymbol{L_p}\ (\boldsymbol{dB})$
Umbral de dolor	20	120
Discoteca a todo volumen	6,3	110
Martillo neumático a 2 m	3,6	105
Ambiente industrial ruidoso	0,63	90
Piano a 1 m con fuerza media	0,20	80
Automóvil silencioso a 2 m	0,063	70
Conversación normal	0,020	60
Ruido urbano de noche	0,0063	50
Habitación interior (día)	0,0020	40
Habitación interior (noche)	0,00063	30
Estudio de grabación	0,00020	20
Cámara sonoamortiguada	0,000063	10
Umbral de audición a 1 kHz	0,000020	0

A inicios de la década de los 70s se estableció el concepto de nivel sonoro continuo equivalente porque no es lo mismo estar expuesto a un nivel de presión de 100 dB por 10 minutos que a 90 dB por una hora. Para hacer comparables las deferentes exposiciones al ruido se definió el nivel sonoro continuo equivalente Leq [7] durante un tiempo T como:

$$Leq = 10\ \times log_{10}\left\{\left[\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} p^2(t)dt\right]\Big/ p_{ref}^2\right\} \qquad [2.2.3]$$

Donde $T = t_2 - t_1$ es el intervalo o tiempo de medición, p^2 es el cuadrado de la presión instantánea, p_{ref}^2 es el cuadrado de la presión referencial.

La integral en la ecuación 2.2.3 corresponde al principio de equivalencia de energía: la suma de toda la energía en el tiempo T equivale al promedio de la energía sonora durante el mismo período [29, págs.: 35, 36], como se muestra en la figura 2.2.1.

[7] También por sus siglas en inglés level of equivalente pressure.

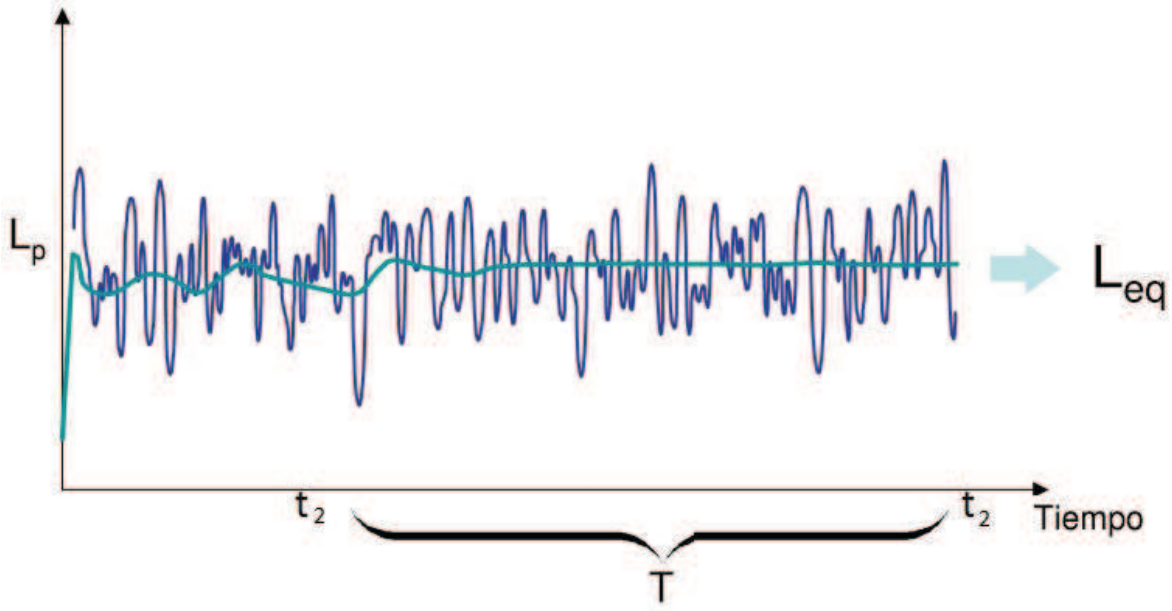

Figura 2.2.1: Nivel sonoro continuo equivalente

El oído humano tampoco diferencia las frecuencias de los sonidos en una manera lineal; es así que, para un nivel de presión sonora de 80 dB, las personas perciben como más intenso un sonido de 3.000 Hz que uno de 30 Hz; esto se comprobó en el trabajo de Fletcher y Munson quienes establecieron que la percepción de la sonoridad era un fenómeno muy complejo y que la sensibilidad del oído depende fuertemente de la frecuencia [17].

Como se ve en la figura 2.2.2 para tener una misma percepción de intensidad las frecuencias bajas (menores de 3.000 Hz) tienen que registrar más decibelios, así como las superiores a 6.000Hz lo que indica una mayor sensibilidad del oído humano a las frecuencias entre 3.000 Hz y 6.000 Hz[8].

[8] Cada línea roja de la figura 2.2.2 (llamada isófona) representa un mismo nivel de percepción de intensidad sonora a través de las distintas frecuencias. Cada individuo tendría un grupo de líneas isófonas asociadas a su capacidad auditiva y la figura 2.2.2 muestra promedios hechos por de Fletcher y Munson en su estudio.

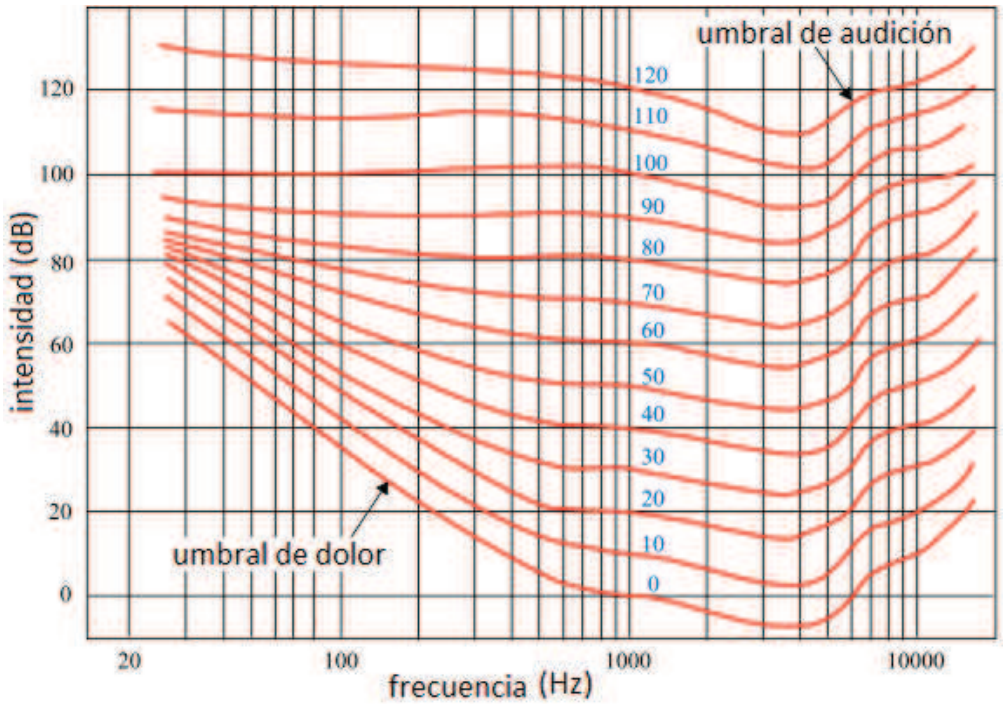

Figura 2.2.2: Curvas isofónicas (Fuente [17])

Para compensar las diferencias establecidas en las curvas isofónicas de Fletcher y Munson y reflejar con una única cifra la sensación de sonoridad producida por un sonido cualquiera (independiente de la frecuencia) se propuso aplicar un filtro de ponderación de frecuencias con una curva de respuesta a la frecuencia que sea inversa a las curvas de Fletcher y Munson; esta ponderación debía, entonces, imitar la respuesta del oído humano, acentuando las frecuencias en las que el oído es más sensible y atenuando aquéllas en que es menos sensible. Lo cual se logró con las curvas de ponderación A, B, C y D como se ve en la figura 2.2.3, siendo la curva de ponderación A la más utilizada en los análisis de contaminación acústica.

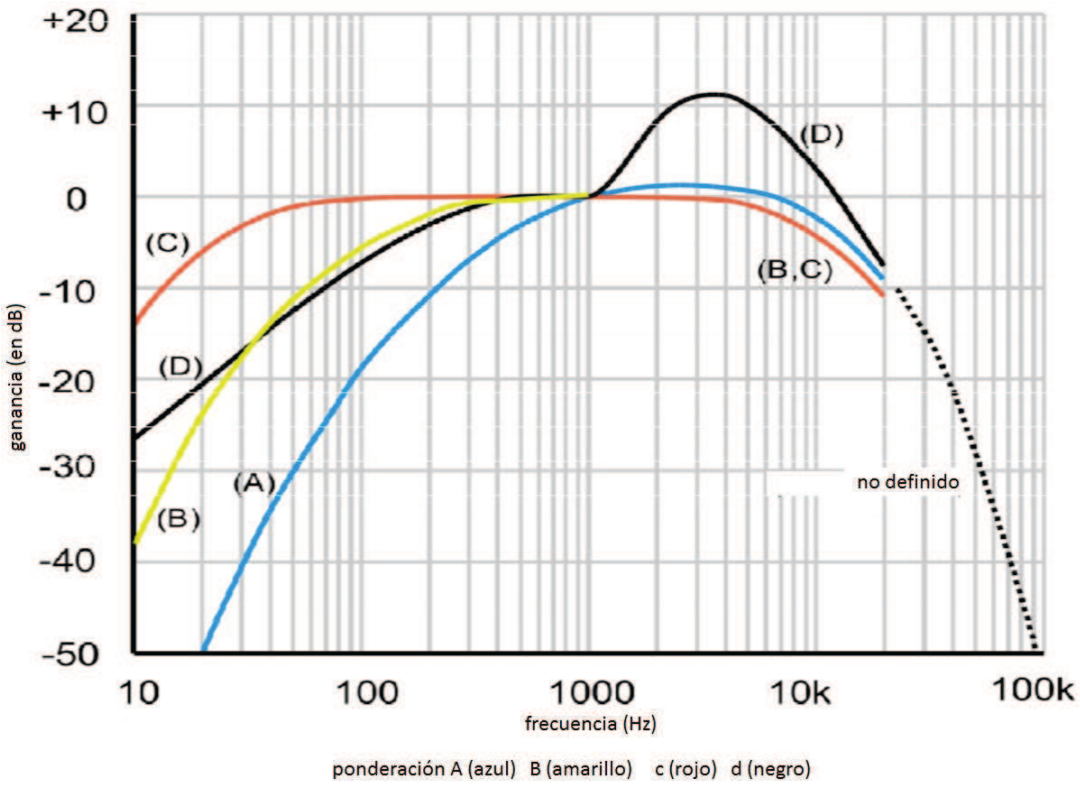

Figura 2.2.3: Curvas de ponderación acústica (Fuente [17])

Al introducir esta ponderación la ecuación 2.2.3 queda:

$$Leq_A = 10 \times log_{10} \left\{ \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p_A^2(t) dt \right] \Big/ p_{A\,ref}^2 \right\} \qquad [2.2.4]$$

Que es el nivel de presión sonora equivalente ponderado por la curva de ponderación A, siendo la medida de contaminación sonora más ampliamente utilizada en los estudios de contaminación ambiental y la que utilizamos en este trabajo.

2.3. Métodos de construcción de mapas de ruido

Actualmente, los métodos existentes para elaborar mapas de contaminación acústica están basados en las definiciones y principios expuestos en las normas ISO 1996-2: 1987 e ISO 1996-1: 1982. [32, pág.: 21].

En general los métodos de construcción de mapas de ruido categorizan las fuentes de ruido en: fuentes puntuales, fuentes lineales, fuentes de área, tanto horizontales

como verticales. Así por ejemplo: una calle es una fuente de ruido lineal mientras que un parqueadero es considerado como una fuente de área y la chimenea de una fábrica sería considerada como una fuente puntual.

Una vez identificadas y categorizadas las fuentes de ruido, los métodos actuales de construcción de mapas de ruido aplican acústica para establecer su influencia en la zona de estudio, considerando para ello, la propagación, reflexión y atenuación; propiedades a su vez influenciadas por diversos factores como la temperatura y humedad del aire, material y pendiente del suelo, materiales y geometría de las edificaciones circundantes, etc.

En su forma general, este método, llamado “método predictivo” establece los siguientes pasos para “predecir” el nivel de ruido que llega a un receptor:

1. Dividir el camino o calle en segmentos (de igual longitud o a un mismo ángulo respecto del receptor) de tal manera que la variación del nivel de ruido dentro de los segmentos no sea mayor a 1 o 2 dB.
2. Calcular el nivel de ruido básico que llega al receptor desde los emisores lineales (segmentos) en base a la velocidad de los vehículos, tamaño de éstos y su frecuencia de paso.
3. Aplicar correcciones por atenuación, reflexión, pantallas, condiciones topográficas y climáticas.
4. Combinar las contribuciones de todos los segmentos emisores para tener el valor estimado del nivel de ruido que afecta al receptor.

De esta descripción genérica, además, se derivan diferentes métodos que son adaptaciones que cada región o país hacen a sus condiciones y necesidades particulares; así tenemos:

- RSL-90
- Nordic Prediction Method 1996
- NMPB 1996 (Nouvelle Méthode de Previsión du bruit) and 2008 versions
- CRTN Calculation of Road Traffic Noise
- FHA TN the Federal Highway Administration Traffic Noise Model (método patentado por dicha Agencia)

- Czech Method
- Swiss Road Model SonRoad
- RVS 4.02 de Austria
- StL-86 Switzerland
- DIN 18055 1987 Alemania
- MLus-92 de Alemania que es un RLS-90 modificado [7, sec. 2.4.2 a 2.4.12].

Para fines ilustrativos y debido a que es el método más utilizado vamos a describir la norma RLS-90.

2.3.1. Método RSL-90

Esta sección es un resumen de la Norma Alemana de Ruido en Carreteras RSL-90 y se tomó íntegramente de [22].

El cálculo de los niveles de ruido se hace a través de un modelo matemático, el cual a su vez se basa en el hecho de que la emisión de ruido de una carretera (o uno de sus carriles) se puede estimar a partir de los siguientes datos:

- Intensidad de tráfico
- Velocidad de los vehículos
- Proporción de vehículos pesados
- Tipo de superficie de la carretera
- Pendiente del terreno

El ruido que registra un punto de inmisión dependerá a su vez de otros factores tales como la distancia al lugar de emisión y la diferencia media de altura entre emisor y receptor. Pudiendo estar incrementado por la existencia de reflexiones en edificios cercanos o por el contrario atenuado por algún tipo de apantallamiento. Así mismo se toma en cuenta la presencia de vientos mayores a 3 m/s y las condiciones térmicas que mejoran o deterioran la propagación del sonido.

Como resultado final después de todos los cálculos se obtiene un valor llamado nivel resultante L_r que es la suma algebraica de varios términos, a saber:

$$L_r = \underset{1\uparrow}{L_m(25)} + \underset{2\uparrow}{D_v} + \underset{3\uparrow}{D_{StrO}} + \underset{4\uparrow}{D_{Stg}} + \underset{5\uparrow}{D_S} + \underset{6\uparrow}{D_{BM}} + \underset{7\uparrow}{D_B} + \underset{8\uparrow}{K} \quad [2.2.1.1]$$

Términos que se explican a continuación:

1. $L_m(25)$ se obtiene de una fórmula experimental con las siguientes condiciones de borde:
    - Distancia Horizontal: 25m
    - Superficie de la calzada sin ranuras gruesas
    - Velocidad máxima permitida de 100 km/h
    - Pendiente igual o menor a 5%
    - Libre difusión del sonido con hm = 2,25 m

Entonces,

$$L_m(25) = 37{,}3 + 10 * \log[M(1 + 0{,}82p)] \quad [2.2.1.2]$$

Siendo M la intensidad media horaria de vehículos y p el porcentaje de vehículos pesados.

El valor de M y p son propios paras las carreteras de Alemania.

2. D_v es la corrección por velocidad mediante con la que se introducen los casos en los cuales la velocidad sea diferente de 100 Km/h a través de la siguiente fórmula:

$$D_v = L_{PKW} - 37{,}3 + 10\,Log\left[\frac{100+(10^{0,1D}-1)p}{100+8{,}23p}\right] \quad [2.2.1.3]$$

Siendo:

$$L_{PKw} = 27{,}7 + 10 * Log[1 + (0{,}2 * v_{LKw})D] \quad [2.2.1.4]$$

$$L_{LKw} = 23{,}1 + 12{,}5 * Log(v_{LKw}) \quad [2.2.1.5]$$

$$D = L_{LKw} - L_{PKw} \quad [2.2.1.6]$$

3. D_{StrO} es la corrección por tipo de superficie a través de la cual se tiene en cuenta el diferente nivel de ruido que se produce según sea el tipo de superficie que presenta la calzada de las carreteras y su valor medio se extrae directamente de la tabla 2.2.1.1.

Tabla 2.2.1.1: Correcciones por tipo de superficie

TIPO DE SUPERFICIE DE LA CALZADA	D_{StrO}
Aglomerado asfáltico con poros abiertos con más de 15% de huecos	-5,0
Aglomerado asfáltico con poros abiertos con menos de 15% de huecos	-4,0
Aglomerado asfáltico menor de 0/11	-2,0
Asfalto fundido sin ranurado	0,0
Hormigón barrido con sepillo metálico	1,0
Hormigón o asfalto fundido con ranurados	2,0
Adoquinado con superficie nivelada	3,0
Adoquinado sin nivelar	6,0

Fuente: [22]

4. D_{Stg} es la corrección por pendiente y se toma en cuenta únicamente cuando la pendiente de la carretera supera el 5% mediante la siguiente fórmula:

$$D_{Stg} = 0{,}6 * |i| - 3 \qquad [2.2.1.7]$$

Siendo i el desnivel en porcentaje.

5. D_S es la corrección por distancia y se calcula por la fórmula:

$$D_S = 15{,}8 - 10 * \log(S) - 0{,}0142 * (S)^{0{,}9} \qquad [2.2.1.8]$$

Siendo S la distancia entre los puntos de emisión e inmisión.

6. D_{BM} es la corrección por el suelo y la atmósfera; en caso de transmisión libre del sonido, hay una atenuación debida a la influencia del suelo y las condiciones atmosféricas. Se calcula de la siguiente manera:

$$D_{BM} = -4{,}8 * exp\left[\frac{h_m}{S} * \left(8{,}5 + \frac{100}{S}\right)^{1{,}3}\right] \qquad [2.2.1.9]$$

Siendo h_m la altura media entre el suelo y la línea de conexión entre emisor y receptor. En caso de existir algún sistema de apantallamiento esta corrección no se tomará en cuenta.

7. D_B es la corrección por condiciones topográficas y constructivas que introduce las características geométricas de la zona y se divide en dos componentes:

$$D_B = D_{REFL} + D_Z \qquad [2.2.1.10]$$

Siendo D_{REFL} la corrección por reflexión múltiple: si una calle o carretera transcurre entre paredes, muros o fachadas sensiblemente paralelas, con discontinuidades que no superan el 30% de la longitud se produce un incremento en el nivel de ruido por las múltiples reflexiones que se dan entre las paredes y se evalúa mediante la siguiente fórmula

$$D_{REFL} = 4 * \frac{h_{Beb}}{w} \leq 3{,}2 \qquad [2.2.1.11]$$

Siendo h_{Beb} la altura media de los muros y paredes, y w la distancia entre las superficies que reflejan.

Estos muros o paredes pueden haber sido revestidos con materiales absorbentes en cuyo caso la fórmula a utilizar es:

$$D_{REFL} = 2 * \frac{h_{Beb}}{w} \leq 1{,}6 \qquad [2.2.1.12]$$

Si han sido revestidas con materiales clasificados como muy absorbentes, no habría que tener en cuenta este efecto.

D_Z, la corrección por apantallamiento introduce la disminución que se consigue mediante la instalación de sistemas de apantallamiento mediante:

$$D_Z = 7 * log\left[5 + \left(\frac{70+0{,}25*s}{1+0{,}2*z}\right) z * K_w^2\right] \qquad [2.2.1.13]$$

Siendo z el valor de la pantalla y se calcula como la diferencia entre el camino recorrido por la onda sónica y la distancia entre emisor y receptor mediante:

$$z = A + B + C - s \qquad [2.2.1.14]$$

Donde A es la distancia desde el punto de emisión al primer punto de inflexión del obstáculo. B la distancia de la última esquina del obstáculo al punto de inmisión. C la distancia entre los dos puntos de inflexión anteriores (ancho de la pantalla) y, s es la distancia emisor-inmisor.

El coeficiente K_w es un corrector para tener en cuenta el posible desvío de las ondas acústicas por inversión térmica o influjo del viento.

La corrección D_z es válida siempre que la pantalla tenga una longitud mínima de:

$$d_0 = \left(\frac{34+3*D_z}{(100+s)^{0,5}}\right) * B \qquad [2.2.1.15]$$

Si la longitud mínima de pantalla fuera superior a la longitud de la carretera en este tramo, se deberá emplear el método “por secciones”.

8. Por último K es un coeficiente corrector que a su vez es función de la proximidad de cruces regulados por semáforos o incorporaciones al punto de inmisión y, se obtiene de la tabla 2.2.1.2.

Tabla 2.2.1.2: Correcciones por distancia a los cruces

DISTANCIA DESDE PUNTO DE INMISIÓN AL CRUCE	K [dB(A)]
Menos de 40 metros	3
De 40 metros a 70 metros	2
De 70 metros a 100 metros	1
Más de 100 metros	0

Fuente: [22]

3. Modelización

3.1. Muestra

La región de estudio es un área de aproximadamente 300 metros alrededor de la estación centro de monitoreo perteneciente a la Secretaría de Medio Ambiente del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. Específicamente, es el área comprendida entre las calles Guayaquil por el sur-este, Chile por el nor-este, Imbabura por el nor-oeste y Morales por el sur-oriente (ver figura 3.1.1).

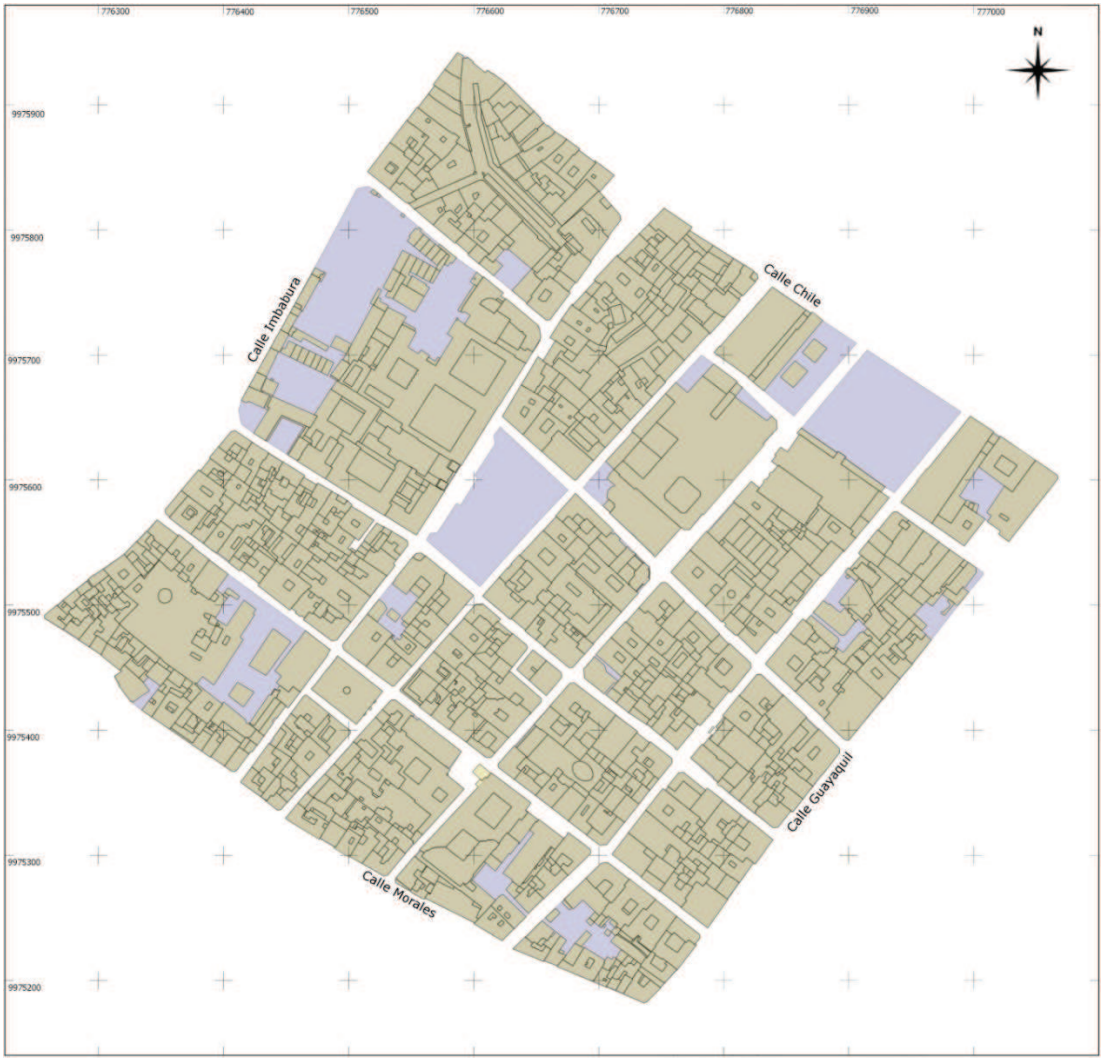

Figura 3.1.1: Delimitación del área de estudio

En esta área de estudio se establece una muestra de grilla uniforme bajo las siguientes condiciones:

1. Cada coordenada en el plano corresponde al centroide del área de muestra de forma que la medida real puede estar a 15 metros alrededor de dicho centroide –dependiendo de las condiciones reales del terreno.
2. Las mediciones se van a realizar de lunes a viernes desde las 7h00 hasta las 19h00. Esto debido a que los datos de las estaciones reflejan un comportamiento diurno durante esas horas, mientras que a partir de las 19h00 y antes de las 7h00 las mediciones de ruido más bien corresponden a niveles nocturnos [26].
3. Las mediciones se toman durante el mayor tiempo posible dentro de la media hora correspondiente a la muestra, a metro y medio del suelo y, haciendo coincidir su inicio con el inicio de la cada hora o cada media hora.
4. Se distribuyen las mediciones a lo largo del día; esto es, se procura que cada punto de la muestra tenga más de una medición en el día siendo lo óptimo que se tengan cuatro mediciones, una en cada cuarta parte del día: una entre las 7 horas y las 10 horas, otra entre las 10 horas y las 13 horas, otra entre las 13 horas y las 16 horas y otra entre las 16 horas y las 19 horas.
5. En caso de darse eventos fuera de la cotidianidad como conciertos, marchas o similares que puedan registrar niveles no habituales de ruido, las mediciones se suspenden, para lo cual se dejarán tiempos de recuperación en el cronograma.
6. El equipo que se va a utilizar es un sonómetro[9] Extech sound lever meter data logger modelo 407760 que cumple con especificaciones ANSI y IEC 61672 para sonómetros clase 2, con escudo de viento e instalado a metro y medio del suelo sobre un trípode como determina la norma ISO-1996 [12] (ver fotos en DVD adjunto).
7. Las coordenadas XY se cargarán en un gps garmin GPSMAP62 con su respectiva identificación de modo que sea fácil ubicar los puntos de muestra y

[9] Un sonómetro o decibelímetro es un equipo electrónico cuyo componente principal es un micrófono con respuesta en las frecuencias y umbrales auditivos humanos y que registra niveles de intensidad o presión sonora en la escala logarítmica de los decibelios.

tomar las mediciones lo más cerca posible de dichos puntos. Además se contará con un mapa impreso donde estarán ubicados e identificados los puntos de muestra y referencias, ver figura 3.1.2.

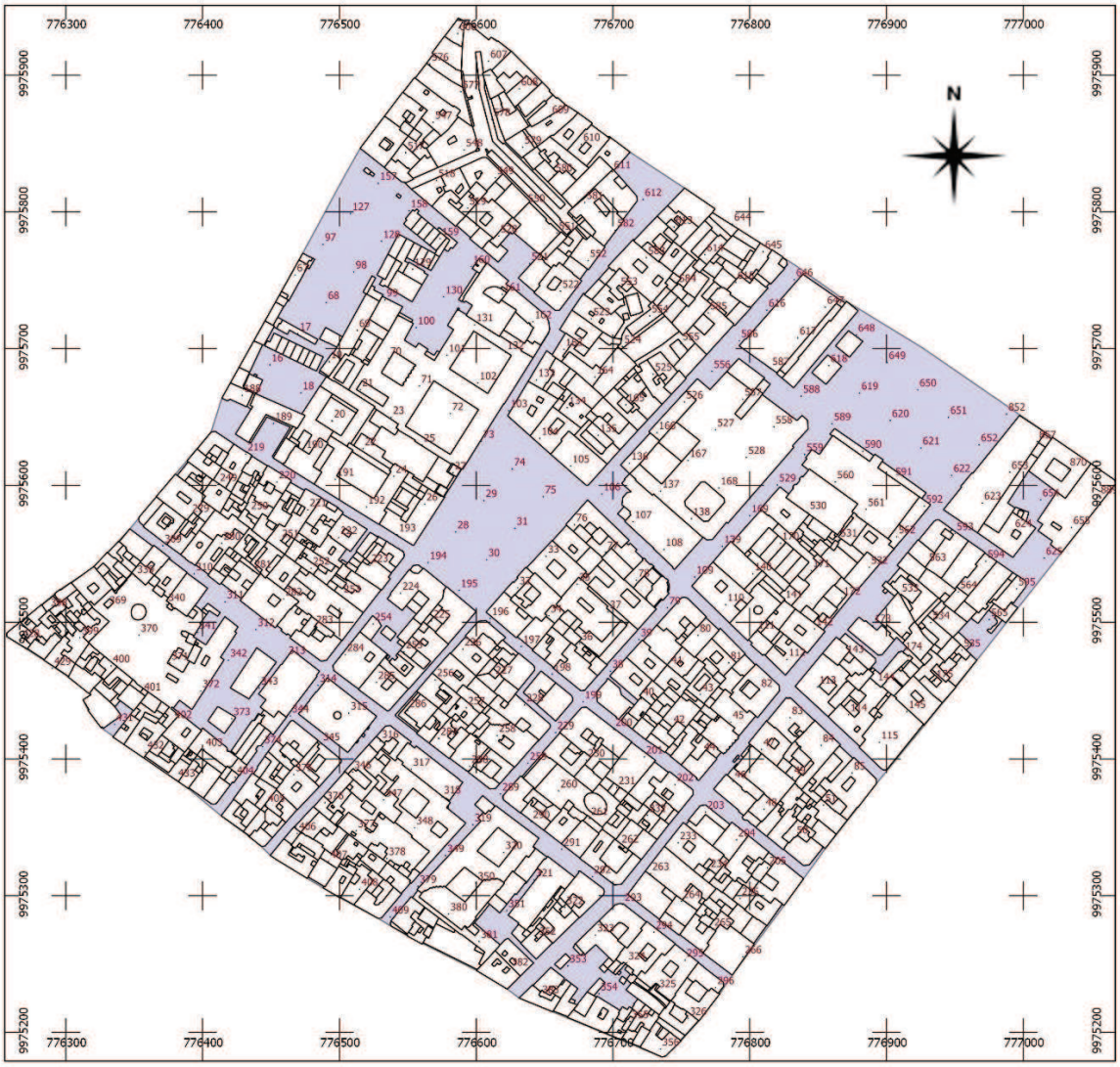

Figura 3.1.2: Puntos de muestra

8. La estación centro se ubica en las coordenadas: 776673,82 9975527,79 (WGS84 UTM zona 17 sur).
9. Los puntos de muestra establecidos son referenciales; es decir, algunos podrían no ser tomados en cuenta (por las condiciones urbanas, de seguridad o logísticas) sin que esto afecte el estudio.

10. Antes de iniciar con las mediciones se calibró el sonómetro con un calibrador acústico Svantek SV 30A Acoustic Calibrator PTB APPROVAL 21.5/ 08.05 tipo I de dos niveles (94 dB y 114 dB) de propiedad de La Secretaría de Ambiente del Municipio de Quito. La calibración consiste en la emisión directa de un nivel preciso y constante de presión sonora desde el calibrador hacia el sonómetro mientras éste registra, para luego ver el nivel que registró, hacer las correcciones necesarias en el sonómetro (fue necesario bajar 0,4 dB al sonómetro) y verificar con el mismo procedimiento anterior hasta obtener un registro preciso (ver figura 3.1.3 para los resultados de la calibración y fotos del procedimiento de calibración en el DVD adjunto).

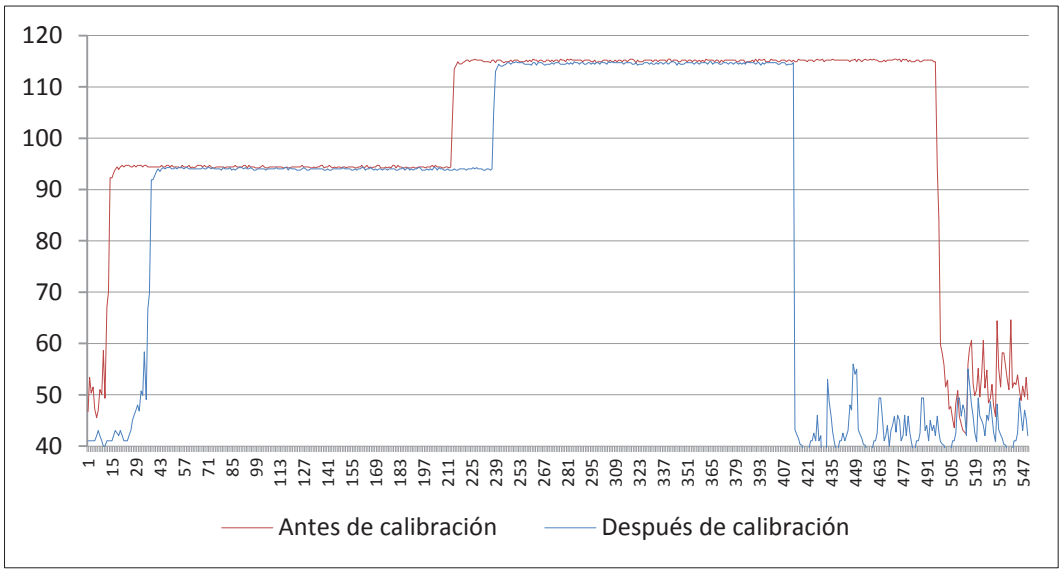

Figura 3.1.3: Calibración del sonómetro

3.2. Medida de distancia

Para todo el presente trabajo se utiliza la distancia de costo y el concepto de fricción en todas las medidas de distancia. Esto es, para dos puntos $u = (x_u, y_u) \in D$ y $v = (x_v, y_v) \in D$, la distancia entre los dos puntos está dada por:

$$d_C = \sum_{i \in \mathrm{P}} c_i d_i \qquad [3.2.1]$$

Donde c_i es la fricción en el elemento i y d_i el tamaño del elemento i en el camino más corto P entre u y v. Asumiendo que previamente se ha dividido al dominio de estudio en elementos raster que son cuadrados de 1 metro de lado [23].

Dentro del mapa en formato raster construido para el dominio de estudio, el camino más corto P entre dos puntos $u = (x_u, y_u)$ y $v = (x_v, y_v)$ es hallado utilizando la variación A* del algoritmo de Dijkstra (ver Anexo 1) y es un conjunto de puntos contiguos $P = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\} \subset D$ donde m depende de las posiciones de u y v.

El criterio para asignar valores de fricción al área de estudio es básicamente la presencia o no de edificaciones; esto es, si el ruido puede propagarse libremente sin edificaciones de por medio, asignamos la menor fricción (valor de 1) y obtenemos distancias iguales a las distancias euclídeas; pero, si el ruido debe atravesar edificaciones, asignamos una fricción mayor (valor de 1,13) y las distancias obtenids entonces son mayores a las distancias euclídeas, introduciendo de este modo el efecto de atenuación que dan las edificaciones a la propagación del ruido debido a que el valor esperado de la contaminación acústica es menor que el registrado fuera de las edificaciones y el modelo tiende a acercarse al valor esperado cuando encuentra más variabilidad.

El valor de 1,13 para la fricción dentro de las edificaciones proviene del promedio de las proporciones entre las distancias que se midió y la que en teoría se debió medir de no haber edificios de por medio. Estas últimas distancias se calculan aplicando la fórmula de propagación [3.2.2] a los puntos de la muestra con edificaciones pero tratándolos como si no tuvieran edificaciones de por medio reemplazando de esta manera la atenuación por las construcciones con atenuación por distancia (ver tabla 3.2.1 y la figura 3.2.1.).

$$L_r = L_f - 10 \log(4 \pi \mathrm{r}) \qquad [3.2.2]$$

L_r es el nivel sonoro en el receptor a distancia r de la fuente lineal que tiene L_f de nivel sonoro [18, pág.: 5].

Tabla 3.2.1: Determinación del valor de costo o fricción en las distancias

id punto interior	valor medido	distancia medida a la calle	valor en fuente lineal	distancia teórica a la calle	fricción
371	45.5903	61.708	79.335	188.490	3.055
373	43.4	33	68.835	27.818	0.843
375	50.08416	17.5	68.835	20.902	1.194
347	50.417328	42	73.585	40.128	0.955
351	50.652186	46	75.235	37.472	0.815
324	49.824467	43.2	76.435	36.465	0.844
249	49.357875	38	74.335	35.394	0.931
251	45.42132	40.1	73.835	55.232	1.377
252	49.112325	45.3	73.835	33.783	0.746
255	49.1586	31.4	75.835	37.022	1.179
257	50.572984	35.3	77.335	37.759	1.070
231	50.271529	41.7	76.335	32.149	0.771
234	50.715973	50.5	80.085	68.821	1.363
70	43.529297	85	68.335	125.895	1.481
35	56.2072107	42	76.335	8.196	0.195
43	49.192125	45	71.585	33.263	0.739
49	47.236752	45.8	78.585	108.554	2.370
134	45.13467	38.25	72.235	40.818	1.067
527	48.5703	46.5	75.835	42.393	0.912
531	53.14268	39	87.135	83.348	2.137
174	47.009304	43.85	87.135	141.582	3.229
518	53.5716667	33.2	68.885	2.705	0.081
579	51.0627778	64.5	69.885	6.068	0.094
550	48.5453416	54.25	69.885	10.834	0.200
551	53.8038889	34	74.835	10.091	0.297
584	44.446296	37.5	73.835	69.134	1.844
654	50.475828	45	76.585	32.489	0.722
Elaboración: autor					**1.130**

Para la programación de la variante A* del algoritmo de Dijkstra (ver Anexo 1) se utilizó el criterio de vecindad de tres niveles; esto es: si tenemos un elemento raster (o cuadrado), se consideran elementos vecinos de primer nivel a los 8 elementos directamente contiguos (tres de arriba, tres de abajo y dos laterales), los elementos contiguos de segundo nivel son los 16 siguientes cuadrados si nos alejamos radialmente de nuestro elemento inicial y la vecindad de tercer nivel son los siguientes 24 elementos como se ve en la figura 3.2.1.

Se utilizó tres niveles de vecindad y no uno o dos para mejorar la precisión en el cálculo de las distancias: cuando se utilizó el primero y segundo niveles de vecindad, el camino entre dos puntos no resulta una recta sino una línea en ángulo entre los dos puntos pero al usar tres niveles de vecindad, se consigue una línea recta entre los puntos.

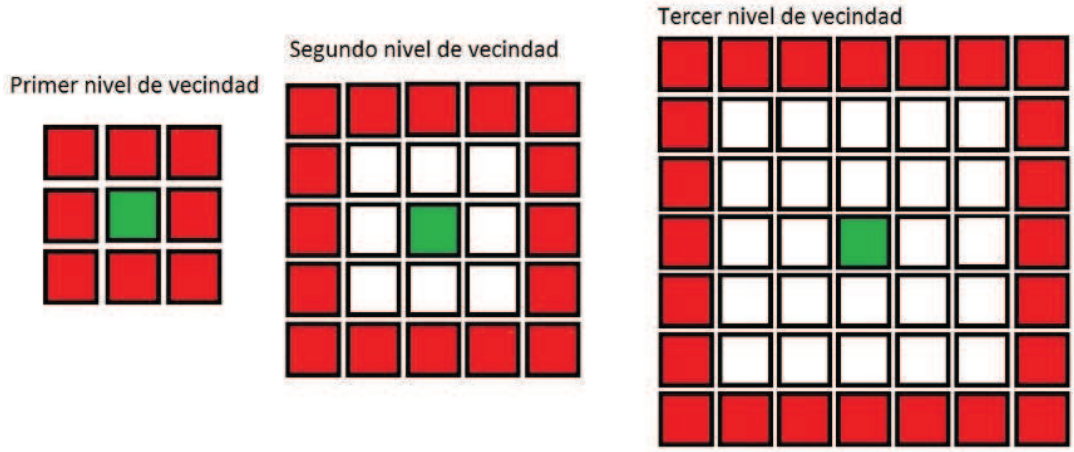

Figura 3.2.1: Vecindad de elementos en mapa raster

Para este estudio la distancia de costo resulta superior a la métrica de Manhattan[10] debido a la orientación nor-este sur-oeste (en aproximadamente 51°) que presenta la ciudad; por una parte y, a la irregular orientación de las calles, por otra. En la distancia de costo estos dos aspectos no representan complicaciones ya que las edificaciones y calles quedan representadas exactamente (dentro del margen de 1 m de lado que tiene cada elemento raster) al tener distintos niveles de conductividad o fricción y así son introducidas a los cálculos.

La métrica de Manhattan se consideró inicialmente para obtener el camino más corto entre dos puntos dentro del área de estudio pero esta distancia funciona bien cuando las calles están perfectamente orientadas en sentido norte sur y este oeste y además las cuadras son regulares como en una cuadricula. Cuando esto no pasa (como en nuestra área de estudio) las distancias pueden confundir nuestro modelo al dar la misma distancia a dos puntos ubicados en la calle cuya línea recta no atraviesa construcciones y a otros dos puntos cuya línea recta si atraviesan construcciones.

[10] Métrica de Manhattan: también conocida como la métrica de Minkowski (por su creador Hermann Minkowski) o distancia del taxista es la métrica en la cual la distancia entre dos puntos es la suma de las diferencias (absolutas) de sus coordenadas. En $\mathbb{R}^2$ la distancia entre dos puntos (x_1, x_2) y (y_1, y_2) es $d = |x_1 - y_1| + |x_2 - y_2|$

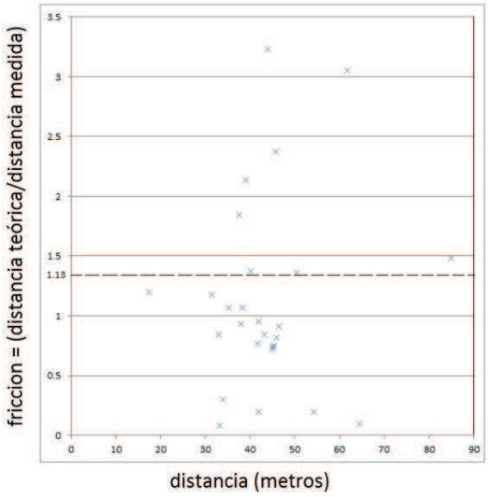

Figura 3.2.2: Valor de fricción o costo vs. Distancia

Por ejemplo, y como se ve en la figura 3.2.3, el camino con costo más corto entre los puntos P1 y P2 sigue siendo la línea recta (con una distancia de 111.0705654 metros) pero que se alarga al atravesar edificaciones (para dar una distancia de 124.2044 metros); esto, debido a que las calles y parques tienen el menor valor de resistencia o fricción frente al interior de las cuadras (ver algoritmo y programa en R en anexo 1). De esta forma, la atenuación por edificaciones en P2 de un ruido registrado en P1 ya se introduce en la distancia misma.

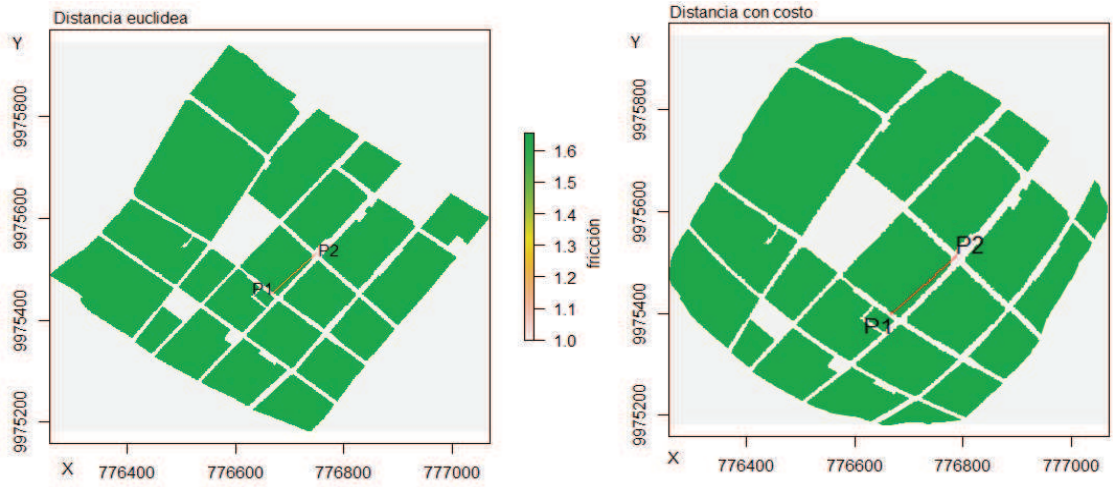

Figura 3.2.3: Distancia euclídea versus distancia con costo

3.3. Variograma

El cálculo del variograma experimental se lo programó en lenguaje R (ver anexo 2) a partir de la ecuación 2.1.4.3:

Primero, usando la métrica euclídea para poder comparar y luego aplicando la métrica descrita en 2.2. El resultado muestra que la distancia con costo tiene una mayor variabilidad a distancias superiores a los 50 metros y una menor variabilidad a distancias menores a 50 metros lo cual demuestra la ventaja de utilizar la distancia con costo en el modelo; además de mostrar un mejor ajuste a los variogramas teóricos (ver figura 3.3.1).

Ahora, considerando que al variograma muestral o experimental no se lo puede evaluar en distancias intermedias y que puede llevar a graves errores en las predicciones, tomamos el variograma obtenido a partir de la métrica con costo y le ajustamos un variograma teórico utilizando el método de mínimos cuadrados generalizado, aprovechando que este método no requiere hacer ningún supuesto acerca de cuál es la distribución de los datos.

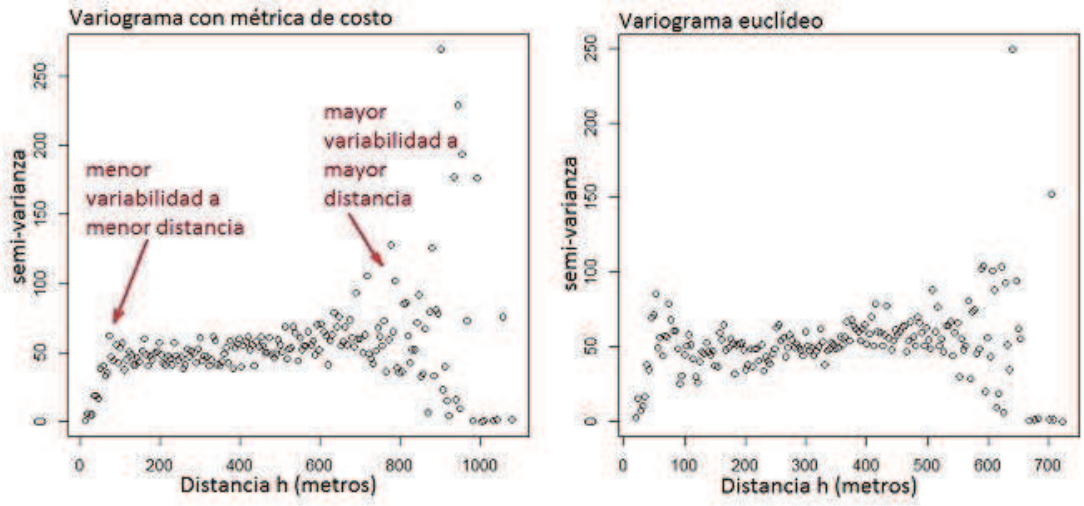

Figura 3.3.1: Comparación de métricas

El gráfico del variograma experimental muestra una tendencia que puede ajustarse con un modelo gaussiano de variograma. Para decidir qué parámetros utilizar se

elaboró un programa en R (ver anexo 2) que ajusta el modelo no lineal gaussiano al variograma experimental y a la vez obtiene los parámetros óptimos en términos de mínimos cuadrados generalizados no lineales, además de los valores del estadístico t y p para los parámetros (ver tabla 3.3.1 y gráfico 3.3.2).

Tabla 3.3.1: Estimación de coeficientes del variograma

coeficiente	Valor	Error estándar	Valor t	Valor p
sill	53,71075	2,185345	24,577695	0,00E+00
rango	40,66182	10,535631	3,859458	2,00E-04

En la tabla 3.3.1 el valor t corresponde a la prueba T respecto a la nulidad del coeficiente y el valor p es la probabilidad de que el coeficiente sea cero.

El variograma ajustado entonces queda en la forma:

$$\gamma(h) = \eta + s * \left[1 - e^{-\frac{h^2}{2r^2}}\right] \qquad [3.3.1]$$

Donde $\eta = 0$ (nugget), $s = 53{,}71075$ (sill) y $r = 40{,}66182$ (rango) quedando:

$$\gamma(h) = 53{,}71075 * \left[1 - e^{-\frac{h^2}{2*40{,}66182^2}}\right] \qquad [3.3.2]$$

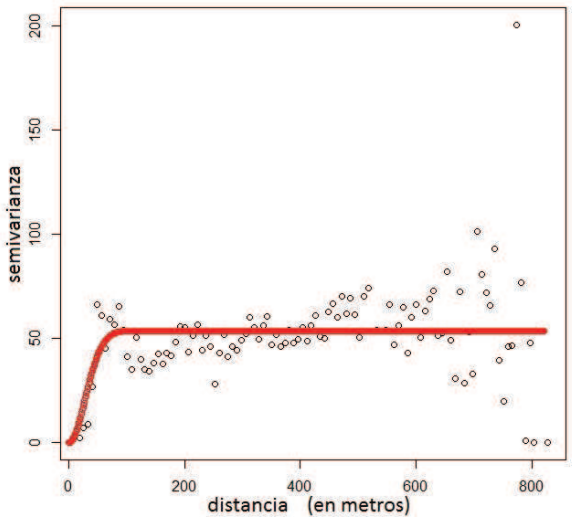

Figura 3.3.2: Variograma ajustado con modelo gaussiano

3.4. Modelo matemático

Al ajustar nuestro caso de estudio a la teoría tenemos que: la variable Z_u corresponde al valor Leq_A[11] día o nivel de ruido registrado durante el día (07H00 a 19H00) para todo $u \in D$ o dominio $\mathrm{D} \subset \mathbb{R}^2$, $\Omega \subset \mathbb{R}^+$ es el conjunto de los resultados posibles medidos en decibelios (dB); $\mathrm{B}(\mathbb{R}^+)$ es la sigma-álgebra boreliana de Ω y P es la función de probabilidad que vamos a modelar estimando su valor esperado de forma que $\hat{Z}_u = \hat{E}(Z_u)$ a partir de los Z_{u_i} $(i = 1,2,3, \ldots\ldots, n)$ medidos en la muestra.

Para hacer esa estimación tenemos una variedad de estimadores lineales y no lineales por ejemplo: tenemos el estimador del inverso de la distancia el cual atribuye a cada elemento de la muestra una ponderación proporcional al inverso de la distancia al sitio a interpolar; tenemos también la interpolación polinómica la cual ajusta una función polinomial al área de estudio de modo que para los puntos muestrales el polinomio iguale los valores medidos en dichos puntos. Pero como se mostró en la sección 2.1.6 el método Kriging es el estimador lineal insesgado óptimo.

Como se determinó en 3.3 en la ecuación [3.3.2], el variograma a aplicar en nuestro modelo es:

$$\gamma(h) = 53{,}71075 * \left[1 - e^{-\frac{h^2}{2 * 40{,}66182^2}}\right] \qquad [3.4.1]$$

El método de interpolación es el método Kriging ordinario como se describió en 1.1.6 teniéndose que interpolar para cada centroide x_0 de cada elemento raster (cuadrado de 1m de lado) del área de estudio el valor $\hat{Z}_{x_0}$ a partir de los pesos $w_1(x_0)$, …, $w_n(x_0)$ los cuales a su vez provienen de resolver el sistema de ecuaciones:

[11] como se definió en 2.2

$$\begin{bmatrix} w_1(x_0) \\ : \\ w_n(x_0) \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_1,x_1) & : & \gamma(x_1,x_n) & 1 \\ : & : & : & : \\ \gamma(x_n,x_1) & : & \gamma(x_n,x_n) & 1 \\ 1 & : & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \gamma(x_1,x_0) \\ : \\ \gamma(x_n,x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad [3.4.2]$$

Siendo para todas las fórmulas anteriores:

$$h_{x.y} = \sum_{k\in \mathrm{P}} c_k d_k \quad [3.4.3]$$

la distancia $h_{x.y}$ entre cualquier par de puntos x, y como se describió en 2.2 y n el tamaño de la muestra.

Veamos cómo se aplica este modelo en un ejemplo pequeño:

Tomemos los siguientes cinco puntos dispersos en la región de estudio (ver figura 5.4.1).

Tabla 3.4.1: Puntos para ejemplo

id	X	Y	Leq_día
P1 (103)	776623,3977	9975654,479	62,836888
P2 (104)	776643,8876	9975631,131	62,65094
P3 (133)	776639,7748	9975680,365	63,196808
P4 (134)	776669,6000	9975659,160	45,13467
P5	776642,0000	9975656,000	A determinar

Cuatro de los cuales tiene medición de nivel de ruido y el quinto es el punto sobre el que se va a interpolar el nivel de ruido utilizando nuestro modelo.

Para este ejemplo, el modelo queda:

$$\begin{bmatrix} w_1(P_5) \\ w_2(P_5) \\ w_3(P_5) \\ w_4(P_5) \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(P_1,P_1) & \gamma(P_1,P_2) & \gamma(P_1,P_3) & \gamma(P_1,P_4) & 1 \\ \gamma(P_2,P_1) & \gamma(P_2,P_2) & \gamma(P_2,P_3) & \gamma(P_2,P_4) & 1 \\ \gamma(P_3,P_1) & \gamma(P_3,P_2) & \gamma(P_3,P_3) & \gamma(P_3,P_4) & 1 \\ \gamma(P_4,P_1) & \gamma(P_4,P_2) & \gamma(P_4,P_3) & \gamma(P_4,P_4) & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \gamma(P_1,P_5) \\ \gamma(P_2,P_5) \\ \gamma(P_3,P_5) \\ \gamma(P_4,P_5) \\ 1 \end{bmatrix} \quad [3.4.4]$$

Para resolver este sistema, primero debemos obtener las matrices de distancias, en base a la sección 3.2 y a los programas del anexo 1. Estas matrices de distancias se muestran a continuación:

$$\begin{bmatrix} 0 & 34{,}76548 & 32{,}45584 & 52{,}21408 & 1 \\ 34{,}76548 & 0 & 55{,}5467 & 44{,}34175 & 1 \\ 32{,}45584 & 55{,}5467 & 0 & 43{,}97564 & 1 \\ 52{,}21408 & 44{,}3417 & 43{,}97564 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad y \quad \begin{bmatrix} 20{,}23602 \\ 27{,}15409 \\ 27{,}17204 \\ 30{,}97806 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad [3.4.5]$$

A estas matrices les aplicamos el variograma antes descrito en la ecuación 3.4.1 para obtener:

$$\begin{bmatrix} 0 & 27.85317 & 25.30742 & 43.38454 & 1 \\ 27.85317 & 0 & 45.40059 & 37.35759 & 1 \\ 25.30742 & 45.40059 & 0 & 37.03464 & 1 \\ 43.38454 & 37.35759 & 37.03464 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad y \quad \begin{bmatrix} 11{,}78327 \\ 19{,}32466 \\ 19{,}34493 \\ 23{,}65051 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad [3.4.6]$$

Invirtiendo la primera matriz de la ecuación 3.4.6 tenemos:

$$\begin{bmatrix} -0{,}033019 & 0{,}016318 & 0{,}018181 & -0{,}00148 & 0{,}149575 \\ 0{,}016318 & -0{,}023846 & -0{,}002808 & 0{,}010335 & 0{,}286857 \\ 0{,}018181 & -0{,}00280 & -0{,}025929 & 0{,}010556 & 0{,}276427 \\ -0{,}001480 & 0{,}010335 & 0{,}010556 & -0{,}01941 & 0{,}287139 \\ 0{,}149575 & 0{,}286857 & 0{,}276427 & 0{,}287139 & -27{,}442969 \end{bmatrix} \qquad [3.4.7]$$

Y ya podemos resolver el sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} w_1(P_5) \\ w_2(P_5) \\ w_3(P_5) \\ w_4(P_5) \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0{,}033019 & 0{,}016318 & 0{,}018181 & -0{,}00148 & 0{,}149575 \\ 0{,}016318 & -0{,}023846 & -0{,}002808 & 0{,}010335 & 0{,}286857 \\ 0{,}018181 & -0{,}00280 & -0{,}025929 & 0{,}010556 & 0{,}276427 \\ -0{,}001480 & 0{,}010335 & 0{,}010556 & -0{,}01941 & 0{,}287139 \\ 0{,}149575 & 0{,}286857 & 0{,}276427 & 0{,}287139 & -27{,}442969 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 11{,}78327 \\ 19{,}32466 \\ 19{,}34493 \\ 23{,}65051 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad [3.4.8]$$

Para aplicar la ecuación 2.1.5.1 y tener el valor interpolado de P5 igual a 51.06 dB.

Figura 3.4.1: Interpolación de ejemplo

El modelo propuesto implica un sistema de ecuaciones de este tipo para cada punto a ser interpolado (cada centroide de una grilla con elementos rectangulares de 1 metro de lado sobre toda la región) excepto que el número de variables no es 4 sino 166, correspondiente al número de mediciones tomadas en la muestra.

4. Resultados

El área de estudio está contenida es un rectángulo de 812 metros de largo por 763 metros de ancho, rectángulo formado por 619.556 elementos de metro cuadrado; al retirar los elementos que no caen dentro de las cuadras analizadas quedan $N = 317.978$ elementos de un metro cuadrado dentro del área de estudio; esta reducción de elementos se logró con un programa hecho en R (ver anexo 3) que pone en una lista las coordenadas (x,y) de los centroides de cada cuadrado pero solamente de los cuadrados que se encuentran dentro del perímetro del área de estudio.

Dentro del área de estudio también se ubican los $n = 166$ elementos de la muestra.

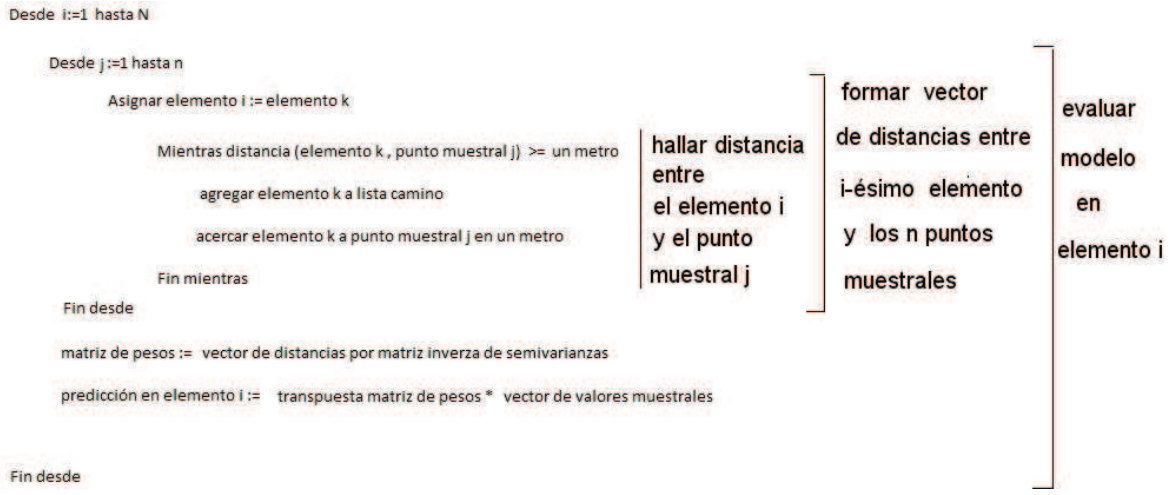

Figura 4.1.1: Algoritmo del modelo

El algoritmo utilizado es una anidación de tres lasos (ver figura 4.1.1): el primero con N repeticiones (una por cada metro cuadrado del área de estudio), el segundo con n repeticiones (una por cada elemento de la muestra) y el tercero con aproximadamente $\bar{m}$ repeticiones (en relación directa con el tamaño del área de estudio ya que $\bar{m}$ es el tamaño medio de los caminos más cortos P como se describió en 3.2) y por tanto sería de orden $N * n * \bar{m}$, además de las líneas de operaciones fuera de los lasos que agregarían una constante C al orden del algoritmo.

Por cada 2.000 elementos en el área de estudio hay un punto muestral (aproximadamente), es decir que $n \cong N/2.000$.

Si duplicamos las dimensiones del área de estudio, cuadruplicamos N y $\overline{m}$ se duplica, es decir $\overline{m} \cong c * \sqrt{N}$.

Entonces, el orden del algoritmo queda aproximadamente como: $c * N^{5/2} + C$ y lo podríamos acotar por un orden $O(N^3)$ por arriba y un orden $O(N^2)$ por abajo.

Estamos frente a un algoritmo complejo (acotado por un orden cúbico) que va a consumir muchos recursos computacionales por lo que se necesita optimizar su ejecución.

El primer paso en esta optimización es utilizar las funciones Apply() de R (anexo 5) para evaluar nuestro modelo sobre el vector (o lista) de coordenadas (x,y) dentro del área de estudio; esto debido a que en R estas funciones son más eficientes que los lasos (for, do o while) en tareas repetitivas. La razón de esta mejor eficiencia radica en que los lasos deben esperar que una iteración termine para empezar otra mientras que las funciones Apply() del lenguaje R pueden precisamente aplicar la evaluación sobre todo la lista o vector de coordenadas al mismo tiempo (si son operaciones homogéneas) o dividir la lista o vector en partes que pueden ser asignados a los distintos núcleos de una computadora o varias computadoras como se ve en la figura 4.1.2.

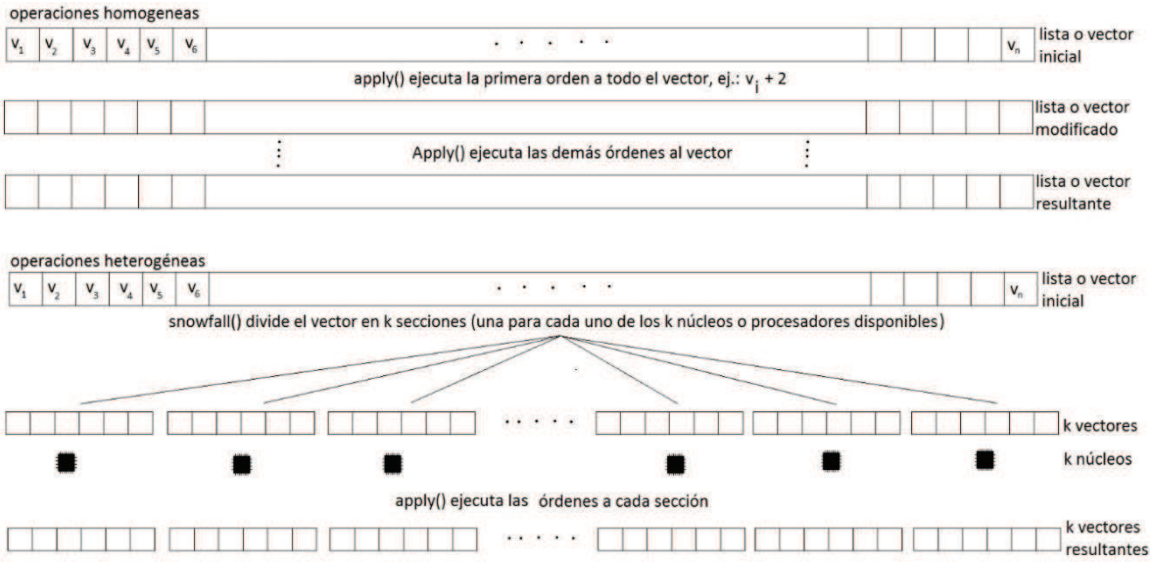

Figura 4.1.2: optimización de procesamiento

También para optimizar el proceso computacional de interpolación, se transformó el área de estudio (perímetro) en una matriz de fricción donde cada elemento (i,j) corresponde a un cuadrado de 1 metro del área de estudio y registra 1 como valor de fricción para las calles y plazas o, 1,13 para el interior de las cuadras (ver anexo 4 programa para transformar el mapa raster en matriz de fricción). La razón de esta transformación es el tiempo porque R es un lenguaje precisamente orientado a las matrices y maneja muchísimo más rápido los elementos de una matriz que los elementos gráficos como un mapa raster.

Una vez que fueron verificados los programas con el ejemplo de la sección 3.4 y comparados con programas y librerías de interpolación Kriging ordinario ya existentes [5] pasamos a correr el modelo con la métrica de costo sobre toda el área de estudio.

El tiempo que se demora una computadora personal en cada punto es de entre 3 minutos a 15 segundos[12] lo que produce un tiempo total de entre 662,5 días y 55,2 días para evaluar los 317 978 puntos de toda el área. Estos tiempos se explican porque el lenguaje R (y lógicamente los programas hechos en R) no fue diseñado para utilizar más de un núcleo de las computadoras.

Una de las ventajas del lenguaje R son los aportes que la comunidad hace a través de librerías o paquetes; así que existen paquetes (como Snow, Snowfall o multicore) que permiten forzar a R a utilizar todos los núcleos de una computadora [5]. Para nuestro caso se utilizó Snowfall para lograr reducir el tiempo a la cuarta parte (en computadoras de 4 núcleos) reduciendo así el tiempo total a un mínimo de aproximadamente 15 días.

Ese tiempo mínimo de 15 días para evaluar el modelo no es suficiente sobre todo porque se debió hacer varias corridas del modelo; entonces se probó los servicios de renta de procesadores tanto de Google (Google Compute Engine) como de

[12] La prueba para determinar esto consiste en correr el modelo sobre una lista de 10 puntos pero aplicando la función system.time() de R la cual da como resultado el tiempo exacto que se demoró el computador (con uno o varios núcleos) en evaluar los 10 puntos de la lista. Esta misma prueba se utilizó para comparar distintos computadores.

Amazon (Amazon Elastic Compute Cloud o Amazon EC2). Estos servicios ofrecen instancias (que se pueden tomar como computadores físicos) con diversas capacidades que van desde la t1 (la instancia gratuita de capacidad variable de Amazon EC2) que equivaldría a una netbook con un procesador atom de un solo núcleo[13] hasta la instancia cc2.8xlarge de Amazon EC2 que ofrece 88 núcleos virtuales (en 32 núcleos físicos) en un sistema operativo de 64 bits [1][14].

Como resultado de dichas pruebas se decidió utilizar la instancia cc2.8xlarge de Amazon EC2 con sistema operativo de Linux Ubuntu 13.4 a un costo de 2,4 USD por hora. Esta instancia fue capaz de evaluar cada punto en un tiempo de 0,8 segundos; esto da 5.000 puntos evaluados por hora y 67 horas para evaluar toda el área de estudio.

Para conseguir un menor tiempo en la interpolación de toda el área es necesario replicar la instancia inicial el número de veces que se desee; así, si se replica una instancia se tiene dos instancias trabajando y el tiempo total se reduce a 34 horas; si se replican tres instancias se tiene cuatro instancias trabajando y el tiempo total se reduce a 15 horas o una noche. Esto es lo que se hizo en el presente estudio para evaluar el modelo sobre toda la lista de coordenadas (x,y) del área total.

Una vez hecha la modelización, los resultados, gráficos, programas, tablas, fotos, videos, datos crudos, rutas del gps e insumos quedan incluidos en el DVD que se adjunta a este documento (Anexo 9).

Dentro del DVD tenemos la siguiente estructura:

- distancias_muestra_costo.txt

  Es el archivo las distancias con métrica de costo entre los puntos muestrales (elaboración: autor)

- grilla_reducida_para_interpolacion.txt

[13] Es de aclarar aquí que tanto Amazon como Google sobreestiman las capacidades de sus instancias al decir que "One EC2 Compute Unit provides the equivalent CPU capacity of a 1.0-1.2 GHz 2007 Opteron or 2007 Xeon processor. This is also the equivalent to an early-2006 1.7 GHz Xeon processor" [21, Amazon Web Services, 2013 versión en Ingés]. En nuestras pruebas una instancia de dos núcleos virtuales fue superada en casi el doble por un procesador AMD C-50 de 1.0 GHz que también es de dos núcleos.

[14] No se hace referencia a las instancias de Google (GCE) porque las pruebas mostraron que sus instancias están contenidas en las instancias de Amazon EC2 a un precio relativamente superior.

Es el archivo que lista los 317.987 puntos sobre los que se evalúa el modelo (elaboración: autor)

- matriz_friccion.txt

  Es la matriz que contiene los valores de fricción o costo para cada metro cuadrado del área de estudio (elaboración: autor)

- resultado_interpolacion_ordinaria_friccion_1m.txt

  Es el archivo resultante de la aplicación del modelo (elaboración: autor)

- vector_diferencia_prueba_hipotesis.txt

  Es el vector de diferencias en los niveles de ruido entre el mapa obtenido por nuestro método geo-estadístico y el mapa obtenido con método acústico. Es el vector al que se le aplica una prueba de hipóteis (elaboración: autor)

- Data
  - edificaciones centro

    Directorio que contiene los archivos .shp de las edificaciones del centro histórico de Quito (fuente: Secretaría de Ambiente del Ilustro Municipio del Distrito Metropolitano de Quito)

  - fotos

    Directorio que contiene fotos y videos que se tomaron como prueba durante el levantamiento de los datos de contaminación y la calibración del sonómetro (elaboración: autor)

  - GPS

    Directorio que contiene los archivos .gpx correspondiente a las rutas y puntos muestrales del GPS utilizado en las mediciones de contaminación acústica (elaboración: autor)

  - sonometro extech

    Directorio que contiene archivos .xls y .sound correspondientes a las descargas de las mediciones del sonómetro que se utilizó durante el levantamiento de los datos de contaminación (elaboración: autor)

  - sonometro svanteck 06.JULIO-OCTUBRE

    Directorio que contiene archivos .svn correspondientes a la descarga de las mediciones entre julio y octubre del 2012 del sonómetro perteneciente a la Secretaría de Ambiente estación centro. (Fuente: Secretaría de Ambiente del Ilustro Municipio del Distrito Metropolitano de Quito)

  - datos_total_ultimo.txt

Es el archivo resultante de las mediciones de contaminación acústica y tiene las coordenadas donde se midió y el nivel Leq registrado en cada coordenada. (elaboración: autor)

- Maps

  Contiene los archivos geo-referenciados que se utilizó en el presente trabajo. El archivo principal es centro_utm.qgs el cual carga en Quantum Gis (versión 1.9.0 alpha) los demás archivos en formato .shp o .tif como: perímetro, zonas_sectores, pisos, centro_cuadras, casas, calles, buses. También tiene el archivos paleta_colores_qgis.txt con el que se estandariza la presentación de resultados (elaboración: autor)

- doc

  Contiene el archivo tesis.pdf que corresponde a este documento además de los gráficos que en él se presentan pero en formato .jpg (elaboración: autor)

- Progs
  - 1_extraer_matriz_friccion.txt

    Programa que convierte el área de estudio en matriz (elaboración: autor)

  - 2_retitrar_no_perimetro.txt

    Programa para retirar del análisis los puntos fuera del área de estudio (elaboración: autor)

  - 4_distancia_estrella_recto_matriz.txt

    Programa que contiene la función para calcular la distancia con métrica de costo entre dos puntos dados (elaboración: autor)

  - 4_variograma_a_estrella_recto_matriz.txt

    Programa para calcular el variograma que se utiliza en el estudio (elaboración: autor)

  - interpolacion_costo_snowfall.txt

    Programa que realiza la interpolación Kriging ordinario con métrica de costo para el presente trabajo (elaboración: autor)

4.1. Mapa de ruido

Aplicando lo expuesto en la sección 3.3 obtenemos una tabla de mediciones (ver Anexo 7 y figura 4.1.1) a la cual se le aplica la modelización de la sección 3.4 a través de programas hechos en lenguaje R (ver Anexo 5) para obtener un mapa de contaminación acústica para el sector de estudio (ver figura 4.1.2). Este mapa presenta una media de 60,63 dB con máximo de 77,68 dB y un mínimo de 36,35 dB.

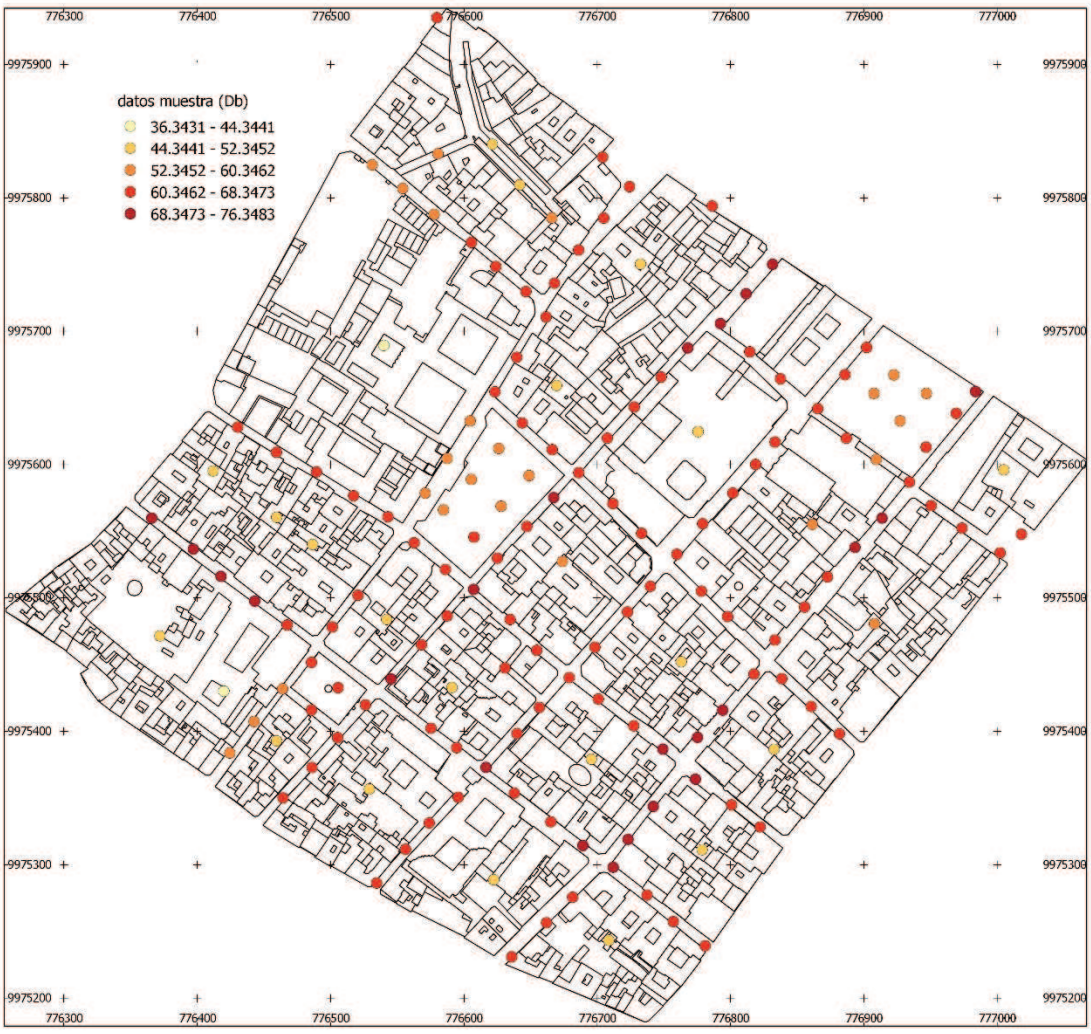

Figura 4.1.1: Datos de la muestra (Elaboración: autor)

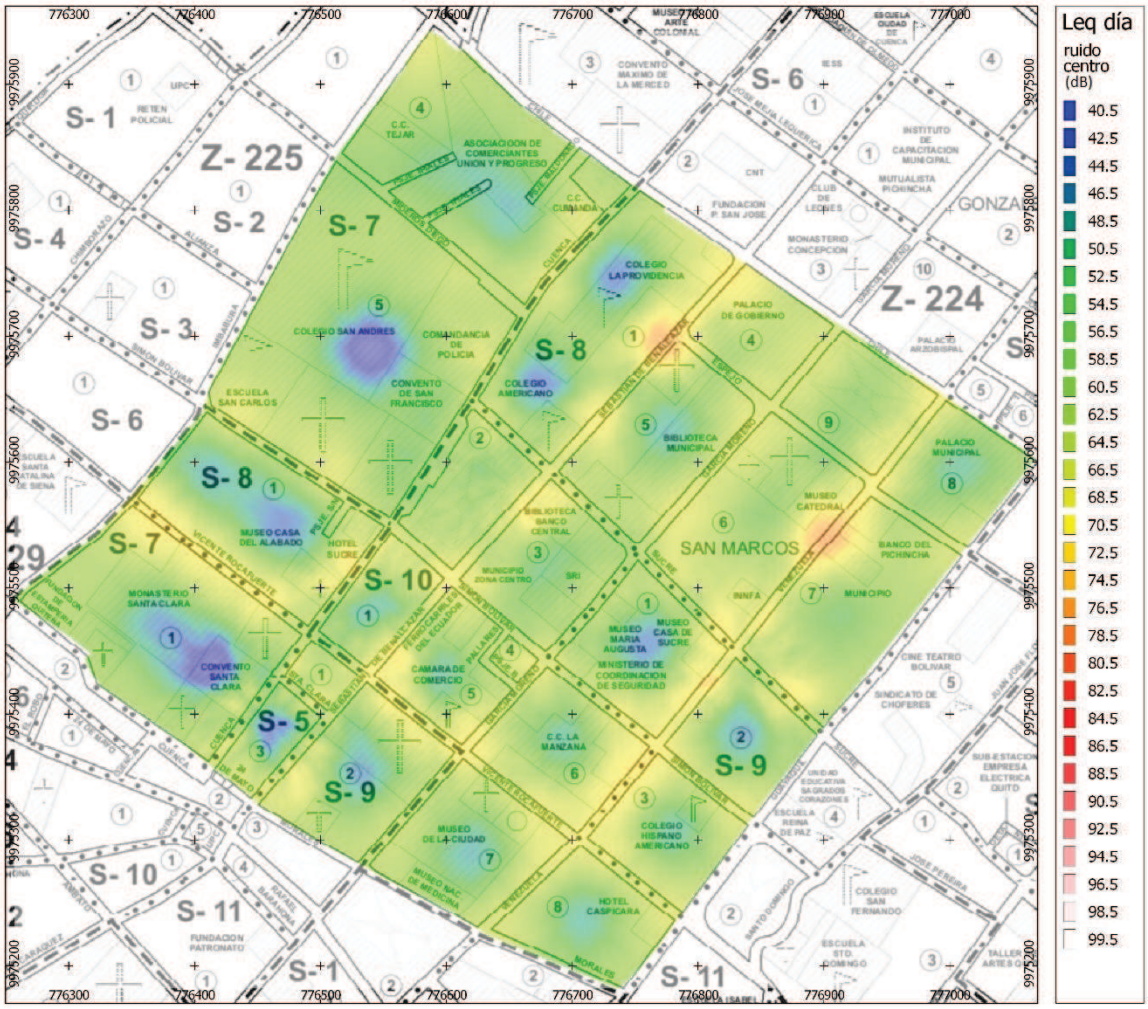

Figura 4.1.2: Mapa de contaminación acústica (método geo-estadístico)

4.2. Indicadores

Para producir indicadores de exposición de la población al ruido y sobre todo a niveles nocivos de ruido como:

- Población expuesta a niveles nocivos de ruido
- Porcentaje de la población expuesta a niveles nocivos de ruido
- Mapa que identifica las áreas con mayor gente expuesta a los niveles más altos o nocivos de ruido.

Combinamos el mapa antes obtenido (figura 4.1.2) con un mapa de densidad - habitantes por metro cuadrado.

En una primera aproximación utilizamos los datos del Censo de Población del 2010. Las zona y sectores censales involucrados son (ver figura 4.2.1.):

- zona 224: Sectores 8, 9 y 10
- zona 225: sector 7
- zona 226: sectores 5, 7, 8 y 9

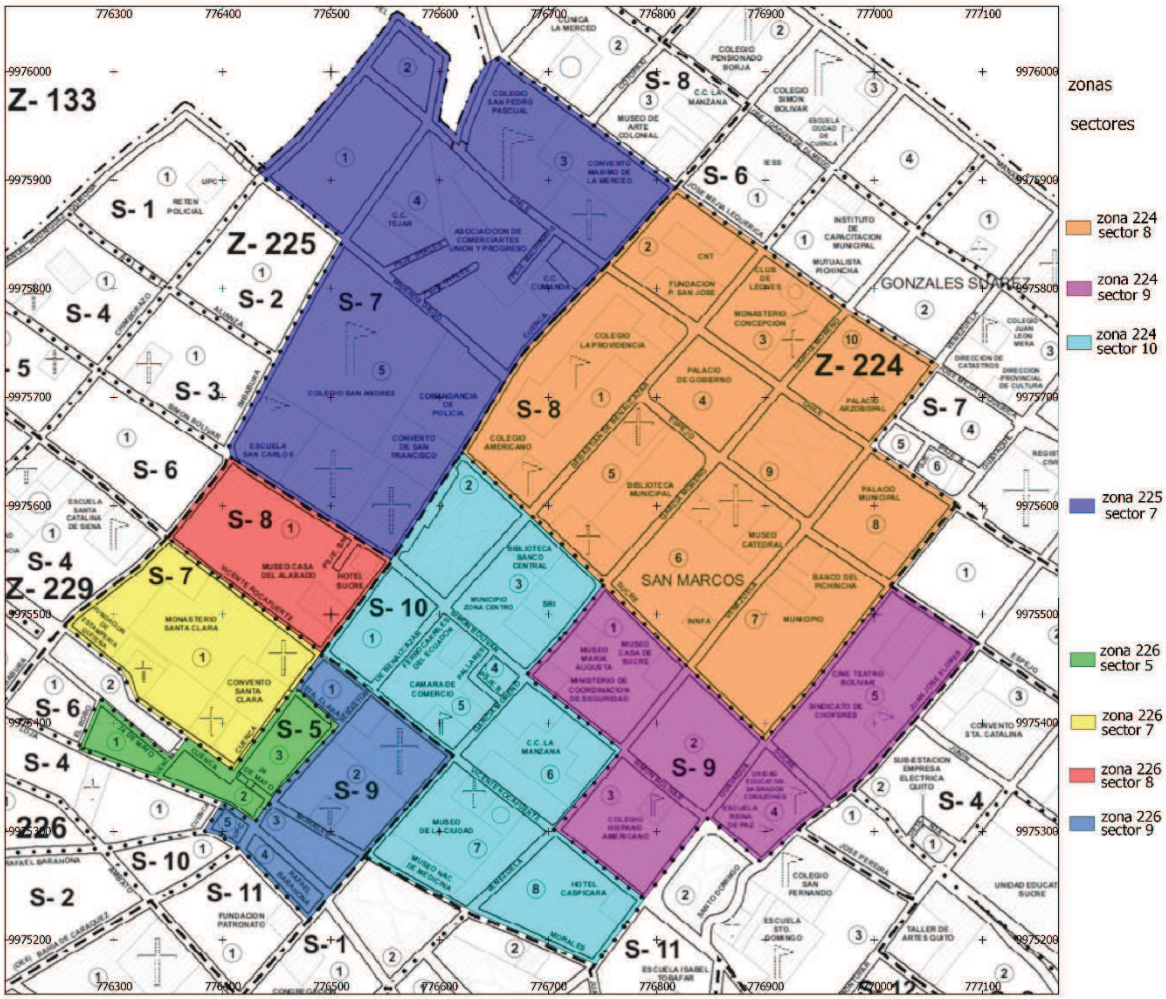

Figura 4.2.1: Sectores censales área de estudio (Fuente: INEC)

El número de habitantes y hogares de estos sectores se muestran en la tabla 4.2.1.

Tabla 4.2.1: Hogares y personas por zonas y sectores censales del área de estudio

Zona	Sector	Hogares	Hombres	Mujeres	Total personas
224	8	73	110	138	248
	9	106	159	153	312
	10	112	153	191	344
	Total	291	422	485	904
225	7	138	217	202	419
	Total	138	217	202	419
226	5	73	135	127	262
	7	99	163	176	339
	8	129	210	197	407
	9	63	103	117	220
	Total	364	611	617	1228
Total		793	1250	1304	2551

Fuente: Censo de Población y Vivienda (CPV 2010). Instituto Nacional de Estadística y Censos.

Del gráfico 4.2.1 medimos el área en metros cuadrados para los sectores listados. Combinando esta superficie con los datos de la tabla 4.2.1 tenemos una densidad poblacional de los sectores considerados y una estimación de la densidad poblacional en el área de estudio medida en habitantes por kilómetro cuadrado, ver tabla 4.2.2.

Tabla 4.2.2: Densidad poblacional por zonas y sectores censales del área de estudio

Zona	Sector	Hogares	Personas	Área m2	Densidad hogares por Km2	Densidad personas por Km2
224	8	73	248	125485,769	581,739	1976,320
	9	106	312	54347,104	1950,426	5740,876
	10	112	344	69753,8047	1605,647	4931,631
	Total	291	904	249586,677	1165,928	3621,988
225	7	138	419	102891,921	1341,213	4072,234
	Total	138	419	102891,921	1341,213	4072,234
226	5	73	262	10676,6875	6837,327	24539,446
	7	99	339	24889,4297	3977,592	13620,240
	8	129	407	17708,1162	7284,795	22983,811
	9	63	220	22331,8242	2821,086	9851,412
	Total	364	1228	75606,0576	4814,429	16242,085
Total		793	2551	428084,656	1852,437	5959,102

Elaboración autor

Es de notar que se trata de una zona relativamente hacinada, con una densidad poblacional de entre 2.000 y 25.000 habitantes por Km cuadrado frente a 535,31 habitantes/Km2 del distrito metropolitano y 54,49 habitantes/Km2 del país [9].

Con estas densidades poblacionales podemos elaborar mapas de afectación y determinar el número y porcentaje de personas expuestas a niveles nocivos de ruido, además de identificar los lugares donde esto ocurre.

El mapa de densidad se muestra en la figura 4.2.2 y el mapa de afectación que es una combinación (multiplicación) entre el mapa de ruido (figura 4.1.2) y el de densidad poblacional (figura 4.2.2) se muestra en la figura 4.2.3.

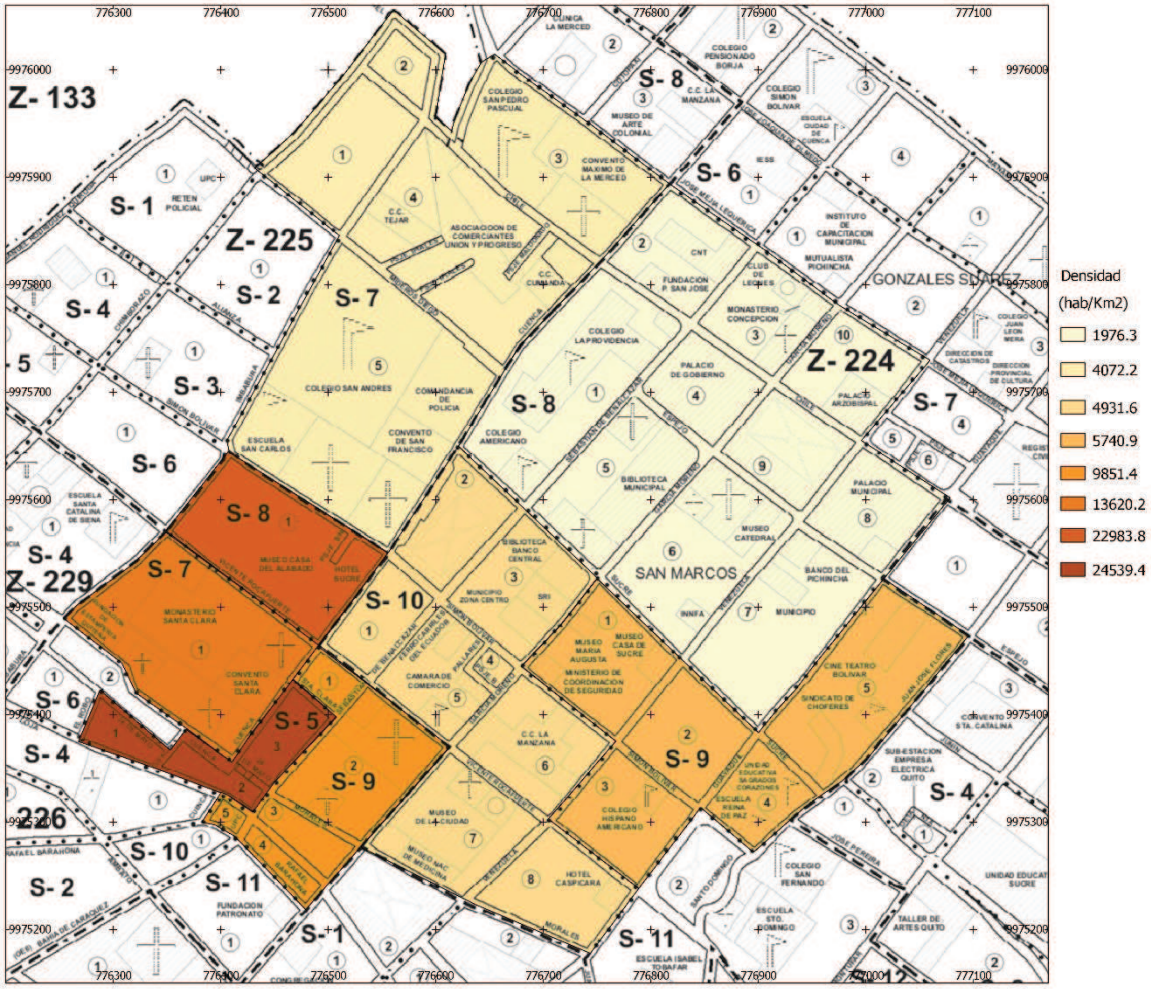

Figura 4.2.2: Densidad poblacional por sectores censales (Fuente: INEC)

De acuerdo con el censo y con este análisis hay 1976 personas[15] en el área de estudio de las cuales 461 (equivalente a un 23,33%)[16] están expuestas diariamente a niveles superiores a 65 dB (nivel establecido por la OMS como aceptable para la contaminación acústica) [8] de ruido entre las 7 de la mañana y las 7 de la noche.

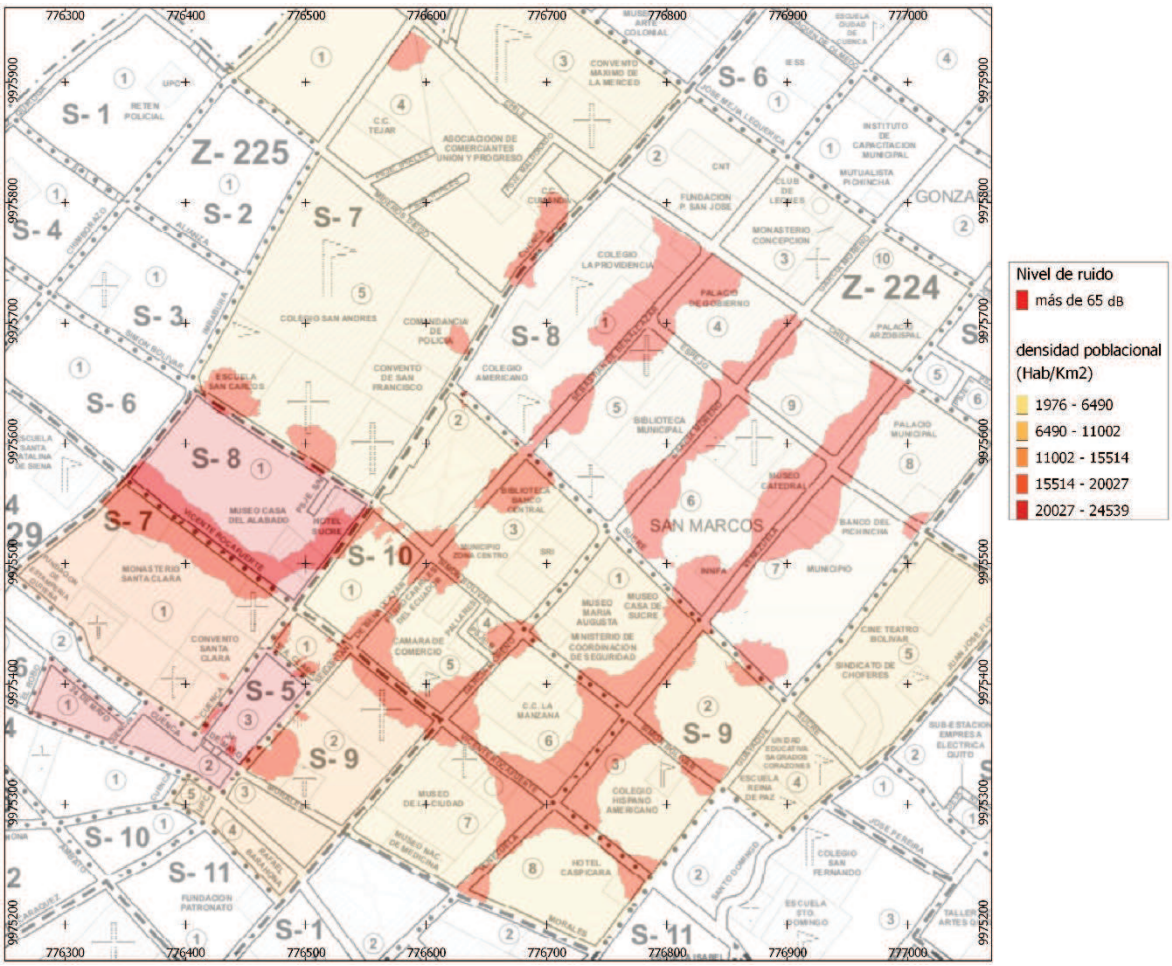

Figura 4.2.3: Combinación densidad y ruido mayor de 65 dB. (Elaboración: autor).

Además de que se identifica en el mapa de afectación (figura 4.2.4) la calle Rocafuerte en su parte media y alta como el sector más afectado ya que registra conjuntamente valores altos de contaminación acústica y valores altos de densidad poblacional. Es decir, hay más gente expuesta a niveles más altos de ruido. Y en

[15] Este número se obtiene con la operación: $\sum[(\text{perímetro_1m.tif} * \text{densidad_censo.tif})/1000000]$ entre mapas en formato raster.

[16] Este número proviene de la operación: $\sum[(\text{mas_de_65.tif} * \text{perímetro_1m.tif} * \text{densidad_censo.tif})/1000000]$ entre mapas en formato raster. Donde $\sum[]$ representa la sumatoria de todos los elementos del mapa resultante.

general, el lado sur-occidente es la parte más afectada del área de estudio mientras que el lado nor-oriente es la parte menos afectada.

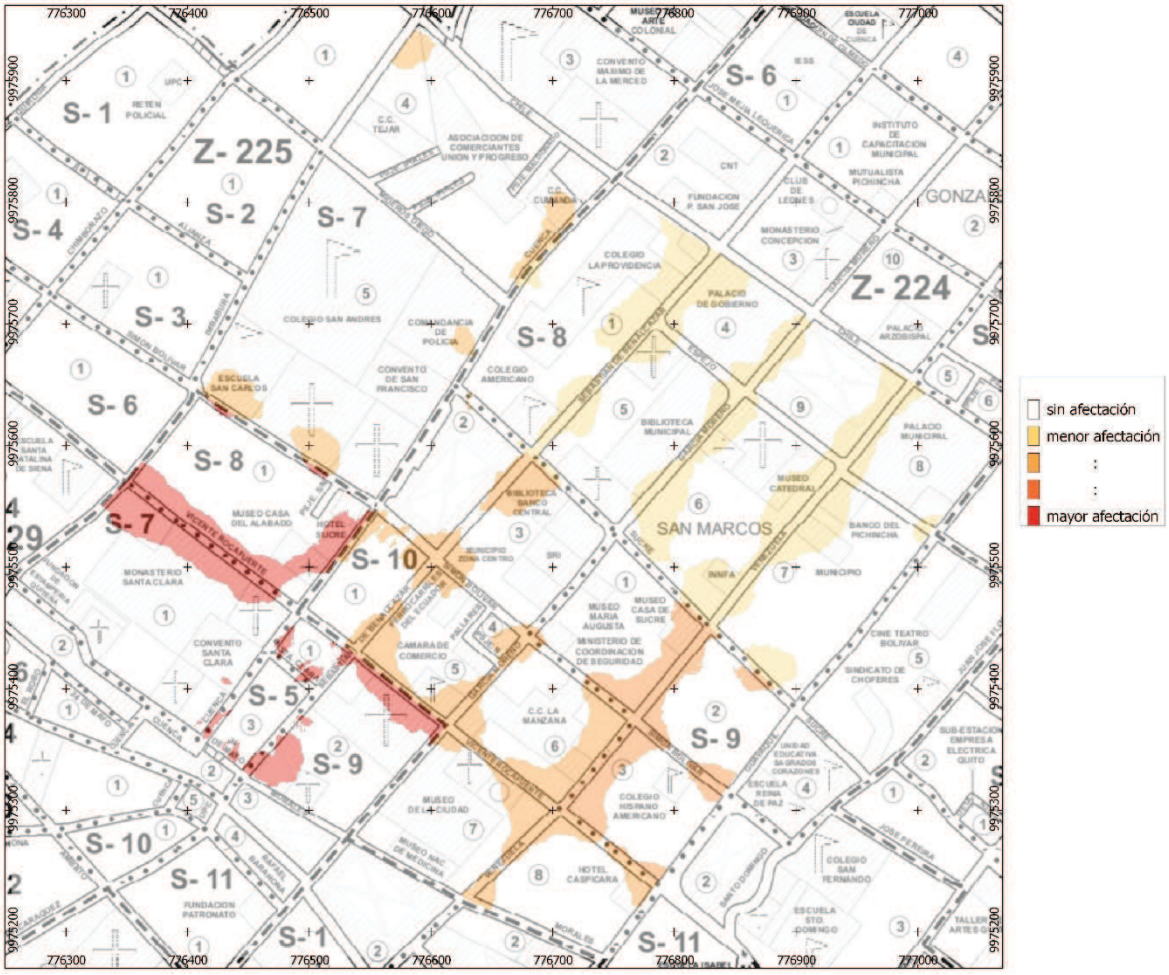

Figura 4.2.4: Mapa de afectación de la contaminación acústica (Elaboración: autor)

En un segundo enfoque y debido a que en censo del 2010 pesan factores como el hecho de que se realizó un domingo, con población flotante que regresa a censarse a su provincias de origen o a sus viviendas en otros sectores de Quito y con negocios cerrados, consideramos que la medida de densidad poblacional para el área de estudio obtenida a partir del censo quedaría subestimada; así que utilizamos estándares de densidad poblacional para viviendas y oficinas para obtener los mismos indicadores antes expuestos.

Con un estándar de ocupación de 25 metros cuadrados por persona (25 metros cuadrados por persona para las viviendas) más la estimación del área de

construcción a partir del número de pisos de las edificaciones (figura 4.2.4)[17] obtenemos otro mapa de densidad poblacional[18] (figura 4.2.5) al que lo combinamos (multiplicamos) con nuestro mapa de ruido para obtener otro mapa de afectación (figura 4.2.6) y nuevos valores de los indicadores antes mencionados.

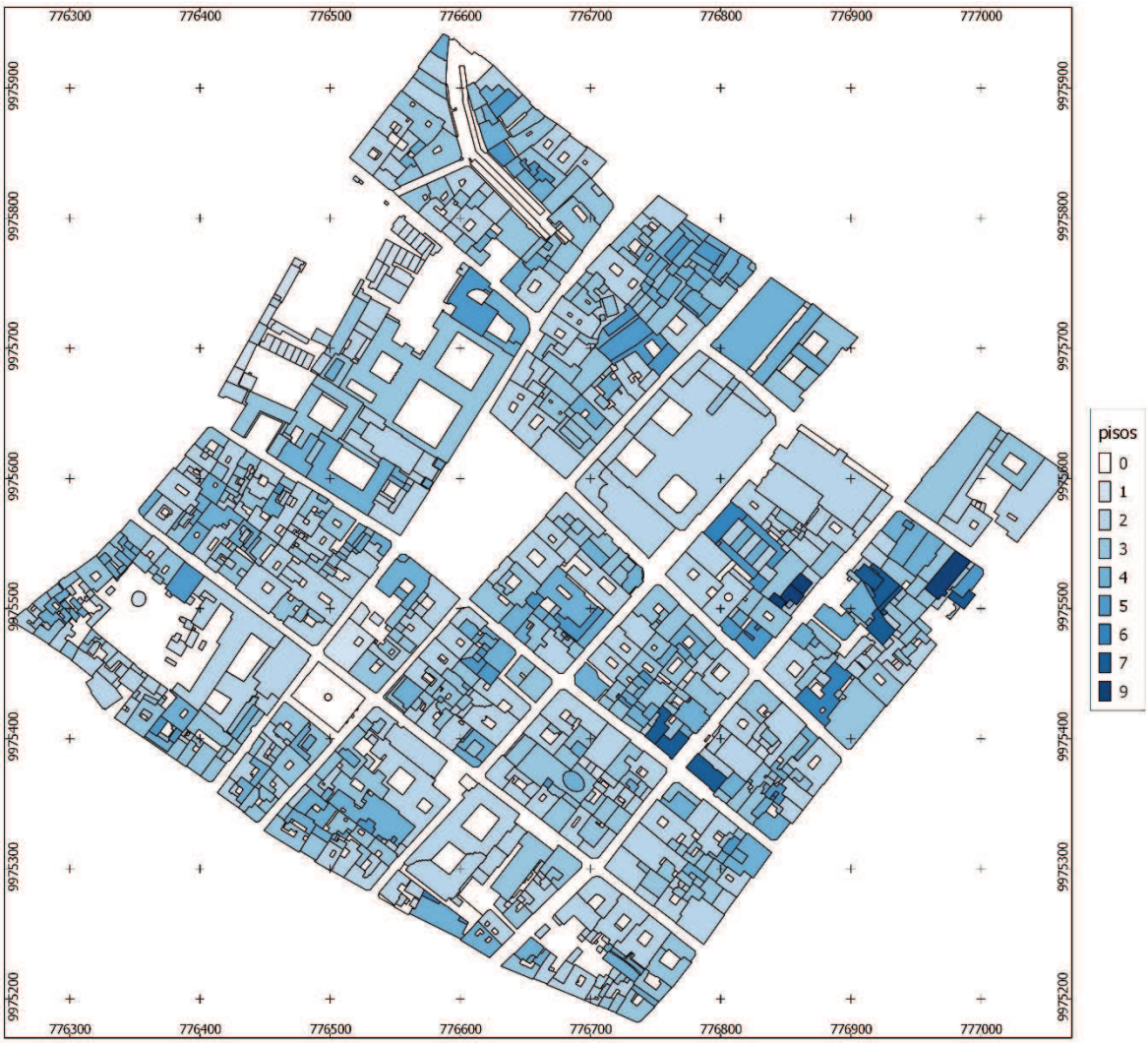

Figura 4.2.4: Número de pisos de cada edificación (Elaboración: autor)

[17] El mapa que muestra el número de pisos para cada edificación en el área de estudio (figura 4.2.4) se lo construyó por observación directa; es decir contando los pisos de las edificaciones, desde la calle para las edificaciones expuestas a la calle y desde los edificios altos para las edificaciones interiores (ver fotos y videos en el directorio fotos del DVD adjunto.

[18] Para esto, partimos del mapa const_centro_Project.shp (fuente: Secretaría de Ambiente del Municipio de Quito) al cual le agregamos una columna correspondiente al número de pisos. Ahora, la densidad poblacional en este caso se refleja en múltiplos de 1/25 personas por metro: 0 cuando hay 0 pisos, 1/25 cuando hay 1 piso, 2/25 para 2 pisos y así. Esto reflejamos en el mapa añadiendo una columna en la tabla asociada al mapa const_centro_Project.shp y exportamos el mapa a formato .tif (densidad_casas.tif) con este múltiplo de (1/25)*1000000 habitantes por Km2 como la categoría asociada al mapa tif.

En este caso, tenemos 5.280 personas[19] expuestas a niveles de ruido superiores a los 65 dB. de un total de 24.100 personas[20] que ocuparían el sector de lunes a viernes de 7 de la mañana a 7 de la noche; dando un 21,91% de población expuesta a niveles nocivos de ruido.

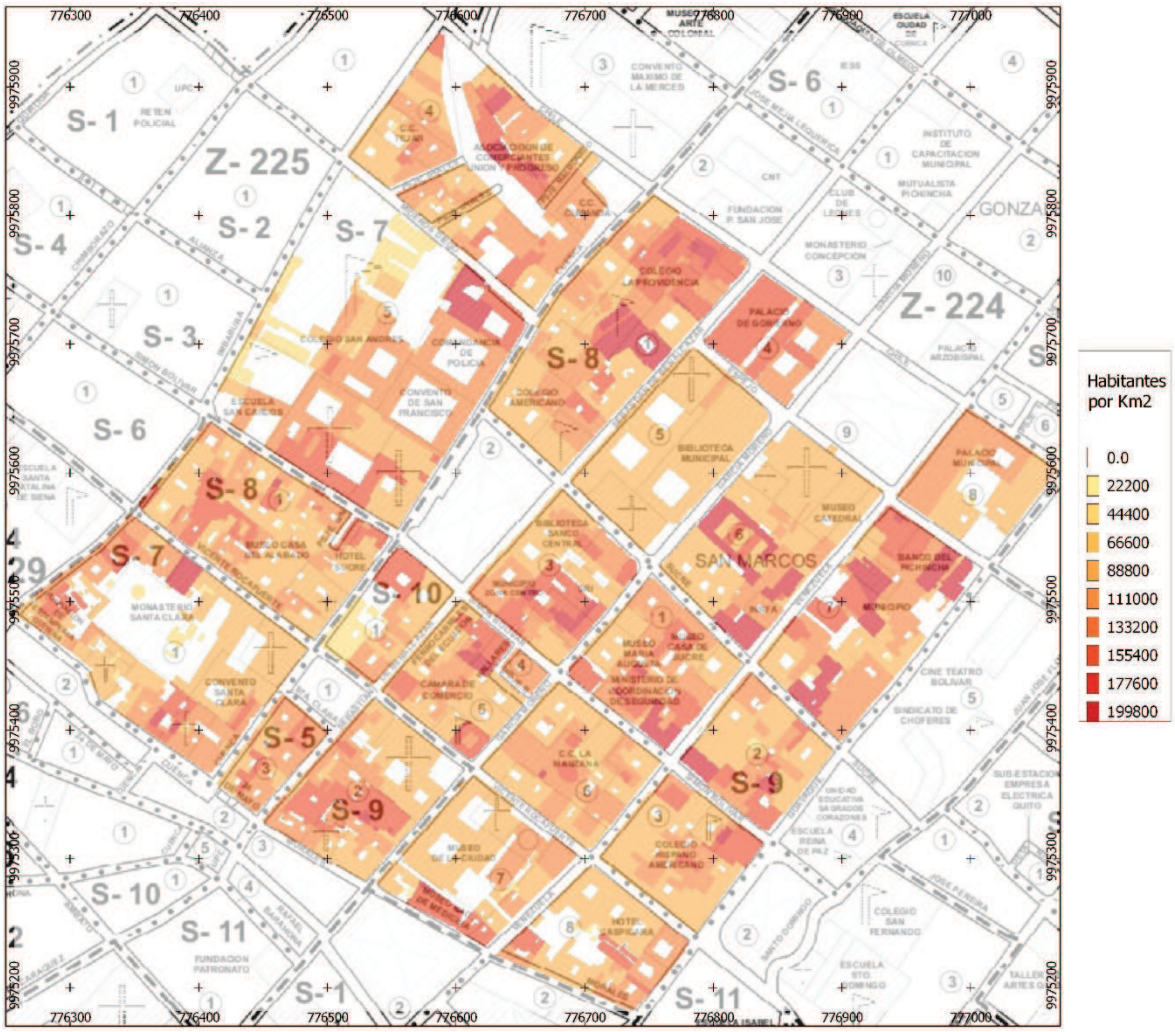

Figura 4.2.5: Densidad poblacional (Elaboración autor)

[19] Este número se obtiene con la operación: $\sum[\text{densidad_pisos.tif} * \text{mas_de_65.tif})/1000000]$ entre mapas en formato raster.

[20] Este número se obtiene con la operación: $\sum[(\text{densidad_pisos.tif})/1000000]$ entre mapas en formato raster.

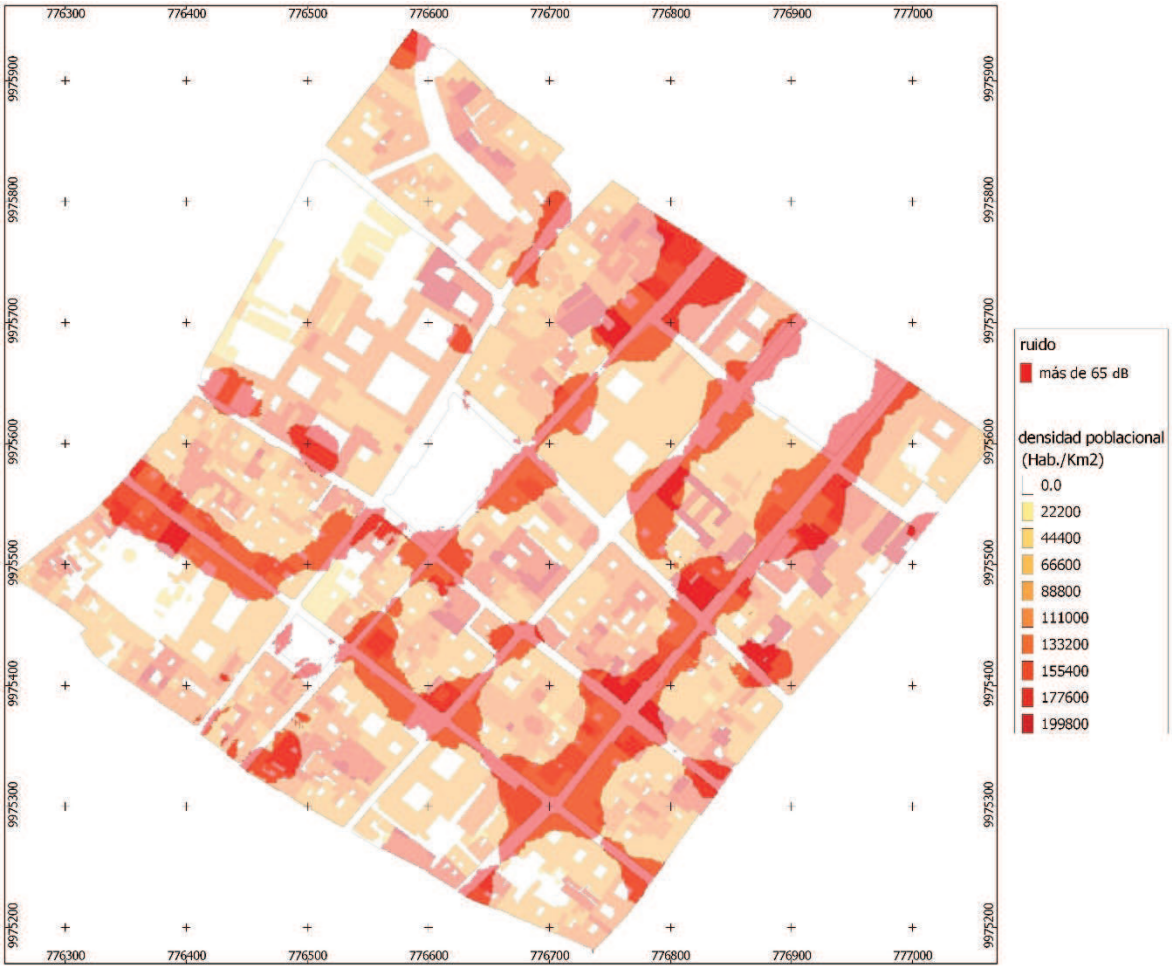

Figura 4.2.6: Combinación densidad y ruido mayor a 65 dB. (Elaboración Autor)

Con este enfoque la afectación se distribuye por toda el área de estudio (ver figura 4.2.7) más bien notándose una mayor afectación en las zonas donde hay edificaciones más altas; aunque, se mantiene la afectación en las calles Rocafuerte y Venezuela igual que en el análisis realizado con los datos de población para zonas y sectores censales.

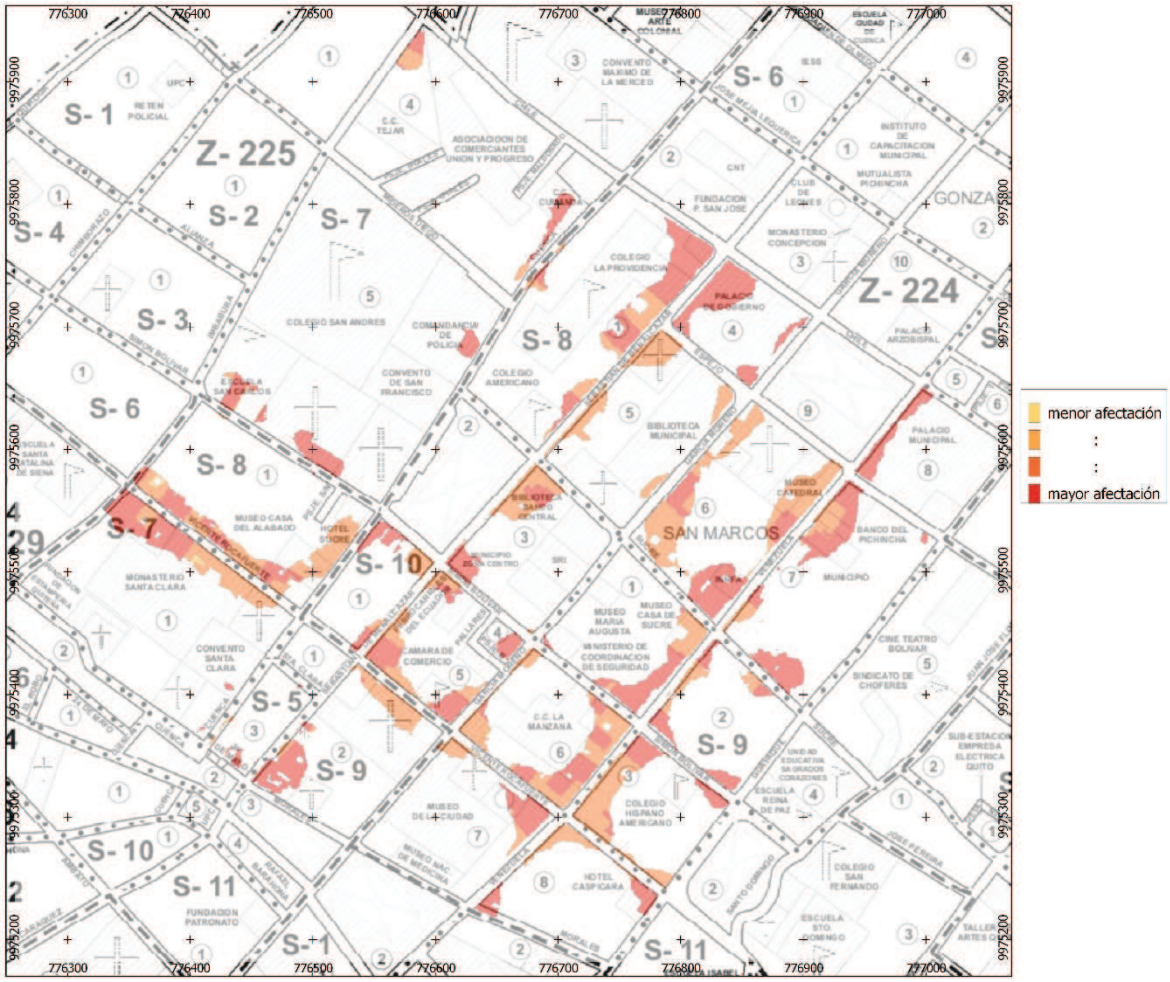

Figura 4.2.7: Mapa de afectación de la contaminación acústica (Elaboración Autor)

4.3. Validación

4.3.1. Comparación de sonómetros

Los sonómetros utilizados y que se comparan a continuación son:

- Extech sound lever meter data logger modelo 407760 que cumple con especificaciones ANSI y IEC 61672 para sonómetros clase 2.
- Svanteck sound level meter modelo SVAN 959 clase 1 que cumple las normas IEC 61672:2002.

Para su comparación se ubicó el sonómetro tipo 2 en la estación centro junto con el sonómetro tipo 1 (que es fijo) en las siguientes fechas y horas:

- 24-08-2012 de 11h43 a 13h20
- 24-08-2012 de 13h57 a 16h08
- 12-09-2012 de 14h57 a 17h03
- 14-09-2012 de 10h09 a 14h10

Los valores de nivel de contaminación acústica medidos por estos dos aparatos son:

Tabla 4.3.1.1: Comparación de sonómetros

Fecha	Extech 407760 clase 2		Svanteck SVAN 979 clase 1	
	Leq	Varianza	Leq	Varianza
24-08-2012	54.018	4.912	55.393	2.807
24-08-2012	54.376	3.889	55.234	1.976
12-09-2012	58.625	4.136	59.345	3.254
14-09-2012	57.791	17.275	58.456	13.654
total	**56.2025**	**7.553**	**57.107**	**5.42275**

Elaboración: autor

Con los promedios y varianzas de la tabla 4.3.1.1 notamos que el sonómetro clase 2 utilizado en este estudio es estadísticamente igual al sonómetro clase 1 de la estación centro.

4.3.2. Comparación de mapas

El mapa obtenido con el método propuesto en este estudio lo comparamos con el mapa hecho aplicando el método RSL-90 a través del programa CADNA a las mediciones realizadas por la Secretaría de Medio Ambiente. Las mediciones que la Secretaría de Ambiente realiza para dichos mapas son conteos de vehículos livianos y pesados con registro de su velocidad. El mapa proporcionado es el que se muestra en la figura 4.3.1.

Para este estudio, se utiliza una misma paleta de colores para la presentación de los dos mapas a ser comparados (ver anexo 6).

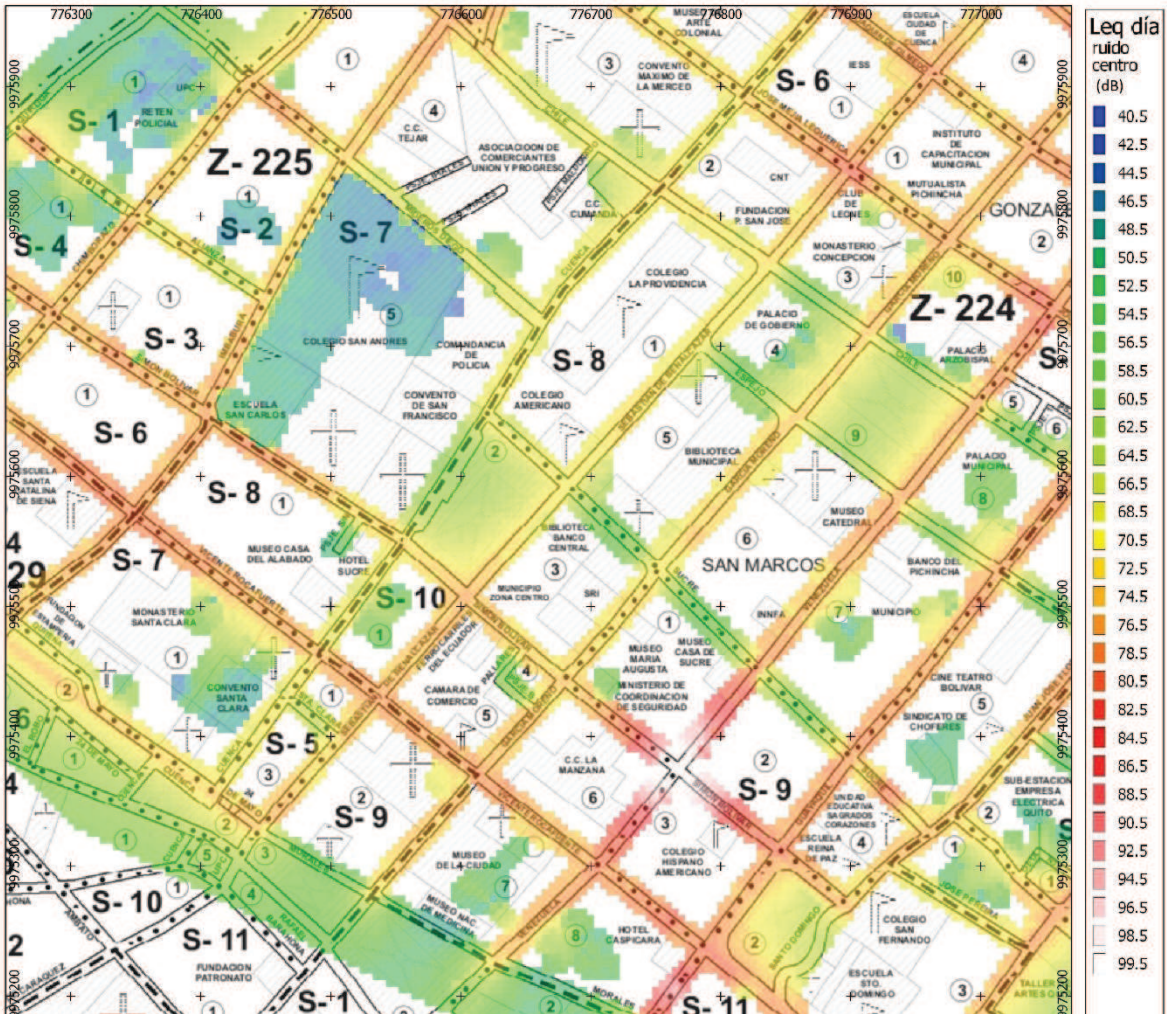

Figura 4.3.2.1: Mapa de contaminación acústica con método RSL-90 (Fuente: Secretaría de Ambiente IMDMQ)

Para la comparación entre los dos métodos, primero establecemos los elementos comunes: El mapa de la Secretaría de Ambiente está hecho con una resolución de 5 metros así que tenemos que disminuir la resolución del nuestro de 1 metro a 5 metros. El mapa de la Secretaría de Ambiente no tiene mediciones en toda el área de estudio así que tenemos que retirar de nuestro mapa los elementos donde no podemos comparar. Y, El mapa de la Secretaría de Ambiente cubre un área mayor a la de nuestro estudio, por lo que debemos recortarlo a nuestros límites. Luego de estos tres arreglos quedan dos mapas a una resolución de 5 metros y con 162*153 = 24.786 elementos, de los cuales 18.806 son elementos sin datos quedando 5.980 elementos para comparar.

Restamos cada uno de los 5.980 elementos raster del mapa construido con nuestro método geo-estadístico (figura 4.1.2) de los elementos del mapa proporcionado por la Secretaría de Ambiente del Ilustre Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (figura 4.3.1)[21]. El resultado de esta resta es otro mapa (figura 4.3.2) cuya categoría corresponde a la variable $[Z_{tesis}(x,y) - Z_{CADNA}(x,y)]$ para cada punto (x,y) de nuestro dominio de estudio.

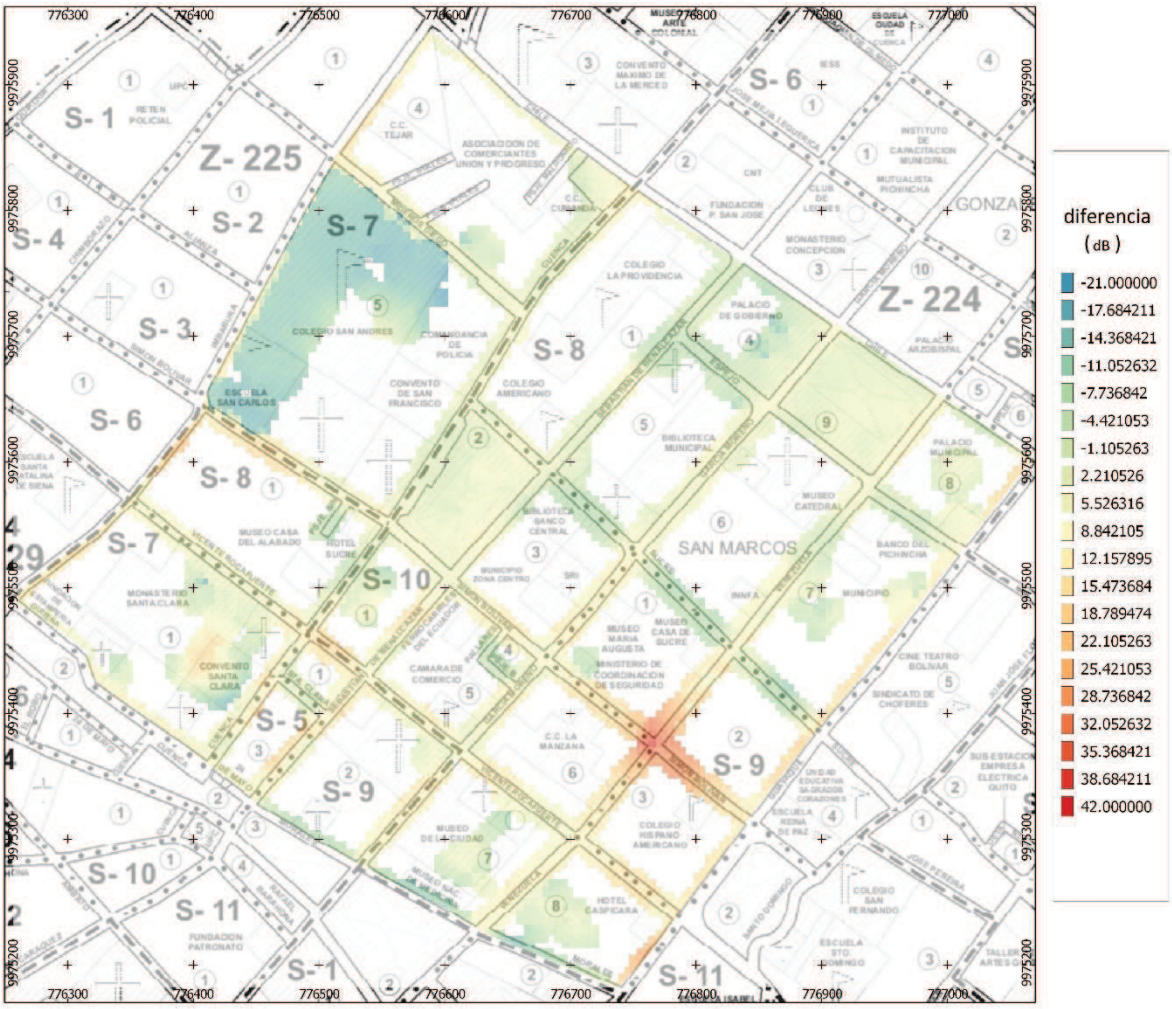

Figura 4.3.2.2: Diferencia entre mapas (Elaboración: autor)

El mapa de diferencias (figura 4.3.2) no muestra grandes discrepancias entre los dos métodos y más bien presenta mucha similitud como los valores más elevados

[21] La operación exacta es:
perimetro_1m.tif * (ruido_centro.asc - resultado_interpolación_ordinaria_friccion_1m.tif)

de contaminación en las calles Rocafuerte, Benalcázar y Venezuela y los calores más bajos de las calles Cuenca e Imbabura.

Para saber si los mapas son estadísticamente similares hicimos una prueba de hipótesis sobre la variable $X = [Z_{tesis}(x,y) - Z_{CADNA}(x,y)]$ en los 5.890 puntos (x,y) antes mencionados. Para esto fue necesario un programa en R (anexo 6) que transforme el mapa de diferencias (figura 4.3.2) en un vector de 5.890 puntos al cual se le hace una prueba de hipótesis sobre la media con H_0: $E[Z_{tesis}(x,y) - Z_{CADNA}(x,y)] = 0$, frente a la hipótesis alternativa H_1: $E[Z_{tesis}(x,y) - Z_{CADNA}(x,y)] \neq 0$.

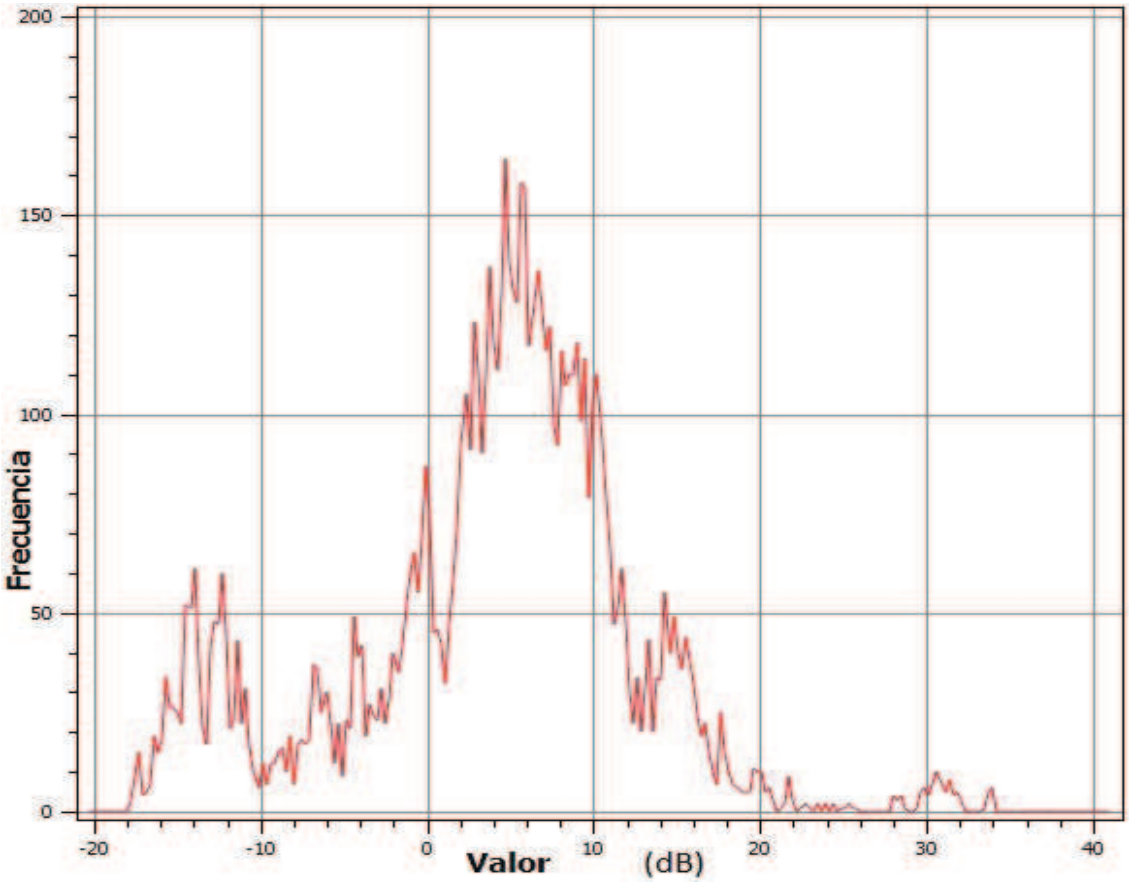

Figura 4.3.2.3: Histograma para la variable diferencia entre mapas (Elaboración: autor)

Debido a que el número de casos es extremadamente alto para la prueba de hipótesis (son 5.980 diferencias) podemos asumir que la variable $X = [Z_{tesis}(x,y) - Z_{CADNA}(x,y)$ tiene una distribución normal (ver figura 4.3.3) y aplicar la prueba de hipótesis al estadístico:

$$Z = \frac{\bar{X}-0}{\sigma_X} \sim \mathrm{N}(0,1) \qquad [4.3.2.1]$$

Donde la desviación estándar

$$\sigma_X = \sqrt{\sigma^2_{Z_{tesis}} + \sigma^2_{Z_{CADNA}}} = \sqrt{5.13198 + 10.80573} = 3{,}9922 \qquad [4.3.2.2]$$

y el estadístico Z es:

$$Z = \frac{\bar{X}-0}{\sigma_X} = \frac{(66.66516-62.82947)-0}{3{,}9922} = 0.960796052 \qquad [4.3.2.14]$$

Ver tabla 4.3.2.1. Con esto, la región de rechazo al 95% de confianza para nuestra hipótesis nula son los intervalos: $]-\infty,-1{,}15]$ y $[1{,}15,+\infty[$ que no contienen a nuestro estadístico Z y por tanto no podemos rechazar la hipótesis nula H_0 concluyendo que los dos mapas son estadísticamente similares.

Tabla 4.3.2.1: Comparación de mapas (Elaboración: autor)

	Mapa de la secretaria (CADNA)	Mapa tesis
Máximo	111.38999938965	77.436782836914
Media	66.665155068209	62.829470106393
Mínimo	42.94100189209	37.777000427246
Desviación estándar	10.805732816928	5.1319771988061

5. Conclusiones y recomendaciones

El método propuesto demuestra ser un método válido que tiene un costo menor.

Dado que es un método intensivo en cuanto a las mediciones se recomienda aplicarlo únicamente en áreas pequeñas de algunas hectáreas.

La utilidad del presente método propuesto consiste en clarificar áreas conflictivas, determinar y/o delimitar áreas de protección, evaluación de denuncias ciudadanas. Además de que puede ser utilizado como un referente para mejorar la precisión de mapas de mayor cobertura.

El presente método puede ser utilizado cuando:

- Las condiciones de tráfico de un sector se salen de los parámetros establecidos para utilizar el método predictivo basado en el tráfico vehicular.
- El tráfico o las condiciones topográficas o ambientales son demasiado complicadas o inusuales para utilizar el método predictivo.
- Se encuentre que este método resulta más económico para un determinado caso.

Se pudo establecer que el área de estudio presenta patrones temporales de contaminación ambiental por ruido: tiene niveles críticos durante las horas pico (de 7 a 10 y de 16 a 19 horas aproximadamente) y cae drásticamente fuera de horas pico.

También se nota que hay una relación entre las rutas de líneas de buses y las calles más contaminadas auditivamente hablando.

Así, La calle Benalcazar tiene 6 rutas de buses:

1. Cooperativa Quito, ruta 8 y ruta 21
2. Cooperativa Quitumbe, ruta 8
3. Cooperativa Atahualpa, ruta 3B
4. Trans Planeta
5. Bellavista, ruta 6
6. Vencedores

La calle Venezuela tiene 6 rutas de buses:

7. Trans Planeta
8. Bellavista. Ruta 6
9. Cooperativa Quito
10. Quitumbe
11. Vencedores

La calle Rucafuerte tiene:

1. San Francisco
2. Trans Planeta

3. Juan Pablo
4. Sustransa

Y la calle Bolivar tiene:

1. San Francisco, ruta 27
2. Vencedores
3. Libertador, Belisario-Libertad

Como puede verse en la figura 5.5.1, las vías asociadas con líneas de buses son las que presentan valores de 70 dB o más (Venezuela, Benalcazar, Rocafuerte y Bolívar) mientras que las calles peatonales o que no tienen líneas de buses (Imbabura. Cuenca, García Moreno, Sucre y Espejo) presentan valores de ruido de alrededor de 60 dB o menos.

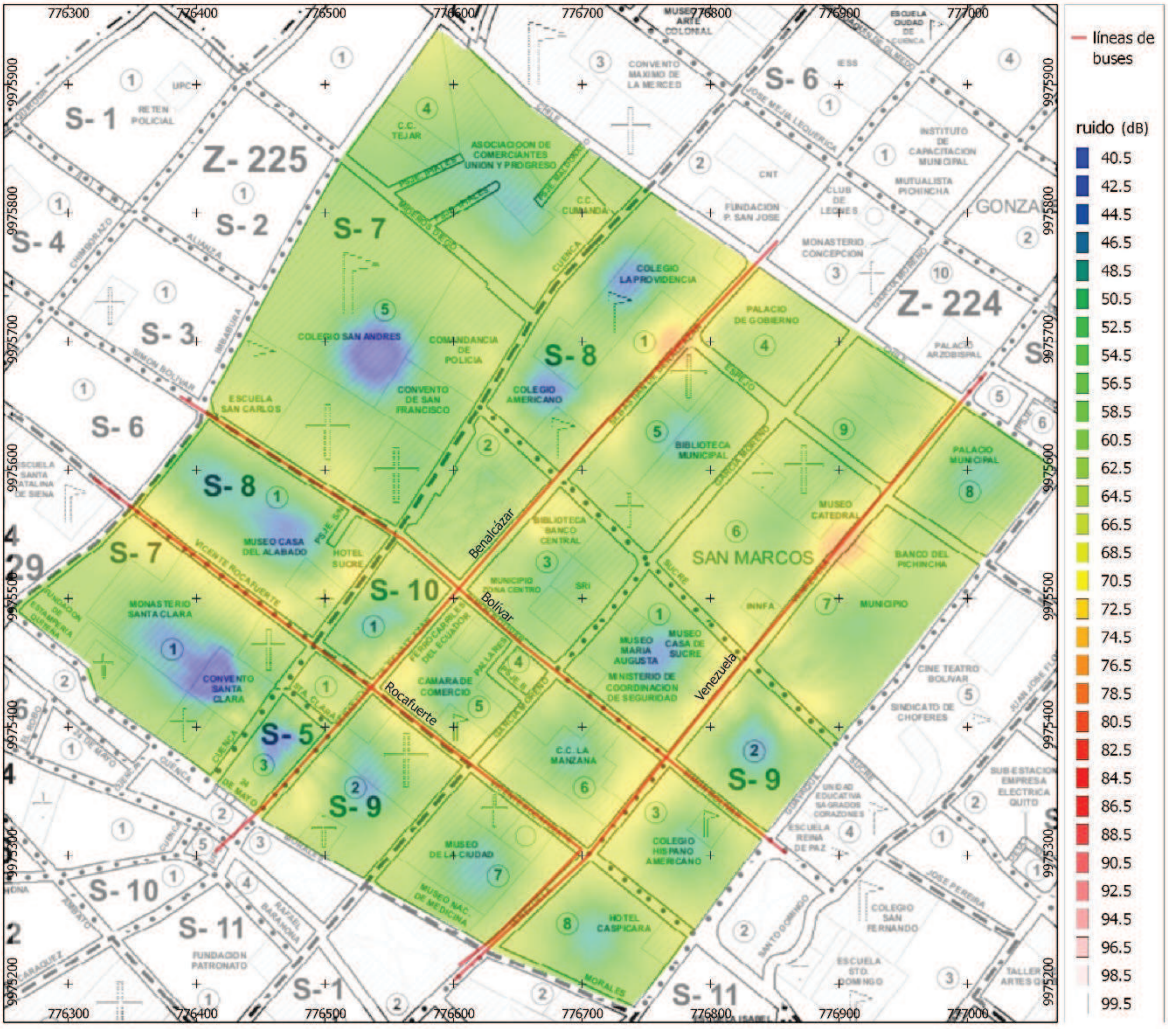

Figura 5.1: Coincidencia entre rutas de buses en el área de estudio y niveles altos de ruido

Antes de establecer el muestreo se recomienda determinar (con mediciones previas) los patrones de comportamiento del ruido en el área de estudio respecto

del tiempo. Esto con el fin de optimizar las mediciones. Con este mismo objetivo se sugiere aplicar solamente una medición en la mitad de las cuadras.

Se recomienda establecer un estándar de paleta de colores para la presentación de los mapas de ruido como el expuesto en el anexo 8 y que corresponde a un gradiente de temperatura que va del azul oscuro (frio extremo) pasando por el azul claro (frio), verde, amarillo, rojo (calor) y blanco (calor extremo) ver figura 5.1.2. Excepto que en nuestro caso es: azul oscuro (ausencia de ruido) pasando por el azul claro (poco ruido), verde, amarillo (algo de ruido), rojo (bastante ruido) y blanco (ruido extremo).

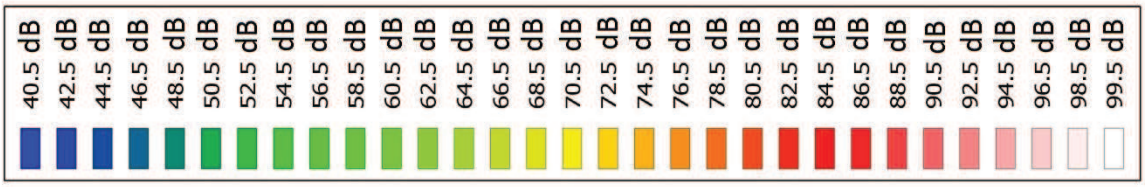

Figura 5.2: Paleta de colores para mapas de ruido

También se podría adoptar el estándar colombiano [16] para la presentación de resultados gráficos en donde se recomienda hacer intervalos en múltiplos de 5 dB y asignarle un color y un sombreado a cada intervalo, como se muestra en las tablas 5.1 y 5.2

Tabla 5.1: Colores para presentación de resultados (intervalos de 5 dB)

Ruido (dB)	**Color**	**Sombreado**
Menor de 35	Verde claro	Puntos pequeños, baja densidad
35 a 40	Verde	Puntos medianos, media densidad
40 a 45	Verde oscuro	Puntos grandes, alta densidad
45 a 50	Amarillo	Líneas verticales, baja densidad
50 a 55	Ocre	Líneas verticales, media densidad
55 a 60	Naranja	Líneas verticales, alta densidad
60 a 65	Cinab rio	Sombreado cruzado, baja densidad
65 a 70	Carmín	Sombreado cruzado, media densidad
70 a 75	Rojo lila	Sombreado cruzado, alta densidad
75 a 80	Azul	Franjas verticales anchas
80 a 85	Azul oscuro	Completamente negro

Tabla 5.1: Colores para presentación de resultados intervalos de 10 dB)

Ruido (dB)	**Color**	**Sombreado**
Menor de 45	Verde	Puntos medianos, media densidad
45 a 55	Amarillo	Líneas verticales, baja densidad
55 a 65	Naranja	Líneas verticales, alta densidad
65 a 75	Rojo	Sombreado cruzado, media densidad
75 a 85	Azul	Franjas verticales anchas

Referencias bibliográficas

[1]. Amazon Web Services, Instance types. (16 de mayo del 2013). Obtenido de http://aws.amazon.com/es/ec2/instance-types/

[2]. Bárdossy, András. (1986). *Introduction to Geostatistics*, Stuttgart: Institute of Hydraulic Engineering University of Stuttgart.

[3]. Brandt y Maennig, *Road noise exposure and residential property prices: Evidence from Hamburg*, Department of Economics, Chair for Economic Policy, University of Hamburg, Von-Melle-Park 5, 22083 Hamburg, Germany

[4]. Bravo, Luis y Chávez, Miguel. (2003). *Línea base de los niveles de ruido ambiental*. Quito: Dirección metropolitana Ambiental.

[5]. CRAN Task View: Analysis of Spatial Data. (15 de mayo del 3013). Obtenido de http://cran.at.r-project.org/

[6]. Cressie, Noel. (1993). *Statistics for spatial data.* United States of America: Wiley Interscience.

[7]. Datakustic.(2012), *CadNa Reference Manual ver. 4.2*, Grifenberg- Alemania.

[8]. Directrices de la OMS. (20 de mayo del 2013). Obtenido de http://www.who.int/publications/guidelines/es/index.html

[9]. Estadísticas, Instituto Nacional de Estadística y Censos. (19 de mayo del 2013). Obtenido de http://www.inec.gob.ec/estadisticas/

[10]. Forssén y otros , Applied Acoustics: *Modelling the interior sound field of a railway vehicle using statistical energy analysis*, Volume 73, Issue 4, April 2012, Pages 307-311

[11]. Fuentes, Nicolás. (2004). *Métodos Estadísticos en problemas espaciales*, San Miguel de Tucumán: Instituto de Investigaciones Estadísticas.

[12]. International Standard Organization. (2007). *Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of environmental noise levels.* Switzerland: International Standard Organization.

[13]. Kerber y Makarewicz , Applied Acoustics*: An optical scale model of traffic noise propagation in an urban environment Original Research Article*, Volume 14, Issue 5, September–October 1981, Pages 331-345

[14]. Kim y otros, Applied Acoustics: *Prediction and evaluation of impact sound transmission in apartment building structures by statistical energy analysis (SEA)*, Volume 62, Issue 6, June 2001, Pages 601-616

[15]. Kolmogórov, Andréi Nikoláyevich. (1956). *Foundations of the Theory of Probability*. New York: Chelsea Publishin Company, second english edition.

[16]. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Norma Nacional de Emisión de Ruido y Ruido Ambiental, Resolución 0627 de Abril 7 de 2006, Publicada en el Diario Oficial 46239 de abril 12 de 2006, Bogota-Colombia.

[17]. Miyara Federico, *Acústica y sistemas de sonido*, cuarta edición, Universidad Nacional de Rosario, Rosario – Argentina, 2006.

[18]. Möser, Michael. (2009), *Engineering Acoustics: An Introduction to Noise Control*, Berlin: Springer.

[19]. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2007). *Ordenanza sustitutiva del título V "De la Prevención y Control del Medio Ambiente", libro segundo, del código municipal para el Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.

[20]. Normas Técnicas para la aplicación de la codificación del título V. (2008). “De la Prevención y Control del Medio Ambiente”. Quito: Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.

[21]. *Organización Internacional de Estandarización*. (18 de mayo del 2013). Obtenido de http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics.htm

[22]. Pulido, Carlos. (1998). *Norma Alemana de Ruido en Carreteras RSL-90. Toledo: Jefatura Provincial de Tráfico de Toledo.*

[23]. Rabin, Steve. (2002). *Ai Game Programming Wisdom.* Massachusetts : CHARLESRIVER MEDIA INC.

[24]. Ripley, Bian. (1981). *Spatial statistics*, Londres: University of London.

[25]. Sayed Abas Ai Ali, *Study effects of school noise on learning achievement and annoyance in Assiut city,* Department of Architecture, Faculty of Engineering, Assiut University, Assiut, Egypt

[26]. Secretaría de Ambiente. (2012). *Informe Anual de la Red de Monitoreo de Contaminación Acústica*, Quito: Secretaría de Ambiente – Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.

[27]. Sgard y otros, Applied Acoustics: *Use of a hybrid adaptive finite element/modal approach to assess the sound absorption of porous materials with meso-heterogeneities*, Volume 72, Issue 4, March 2011, Pages 157-168.

[28]. Stein, Alfred y otros. (1999). Spatial Statistics for Remote Sensing. New York: Kluwer Academic Publishers.

[29]. Suárez Enrique, Curso de Acústica ambiental: ACUS 250, Universidad Austral de Chile - Instituto de Acústica, Valdívia – Chile, 2004.

[30]. The European Parliament and the Council of the European Union. (junio 2002). *Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council, relating to the assessment and management of environmental noise*. Diario Oficial de las Comunidades Europea.

[31]. Thorsson y Ögren, Macroscopic modeling of urban traffic noise – influence of absorption and vehicle flow distribution Original Research Article, Applied Acoustics, Volume 66, Issue 2, February 2005, Pages 195-209

[32]. Wang, Lawrence y otros. (2005). *Advanced Air and Noise Pollution Control.* New Jersey: Humana Press.

[33]. Wikipedia Noise Pollution. (15 de enero del 2013). Obtenido de http://en.wikipedia.org/wiki/Noise_pollution

Anexos

Anexo 1 Algoritmo A* (variante del algotitmo de Dijkstra)

El algoritmo A* asigna a cada nodo de su búsqueda tres propiedades: f(), g() y h(), a los cuales se les suele llamar el ajuste (fitness) f(), la meta (goal) g() y el valor heurístico (heuristic) h(), los mismos que se describen con más detalle a continuación:

g() es el costo de ir desde el nodo inicial hasta el nodo actual

h() es el costo estimado para ir desde el nodo actual hasta el nodo final o nodo objetivo. Para nosotros, h es la abreviación de heurístico (heuristic) que significa buscar o investigar, ya que no sabemos realmente el costo (por eso es que estamos buscando un camino).

f() es la suma de g() y de h(). f() representa nuestra mejor apuesta al costo del camino que va entre el nodo actual y el nodo objetivo. Entre más bajo es el valor de f() mejor pensamos que es el camino.

Adicionalmente, A* mantiene dos listas, una lista abierta y una lista cerrada. La lista abierta tiene nodos que no han sido explorados, mientras que la lista cerrada contiene nodos que ya han sido explorados. Un nodo se considera explorado si el algoritmo ha mirado cada nodo conectado a este en particular, ha calculado sus valores de f(), g() y h() y ha puesto los nodos conectados en la lista abierta para su posterior exploración.

Seudo código para el algoritmo A*

1. Hacer P el nodo de partida.
2. Asignar f(), g() y h() al nodo P.
3. Introducir P a la lista abierta. En esta parte, P es el único nodo en la lista abierta.
4. Sea B el mejor nodo de la lista abierta (el mejor nodo es el que tiene el menor valor f())
    a. Si B es el nodo final, entonces terminar (se ha encontrado un camino).

b. Si la lista abierta está vacía, entonces terminar (no se puede hallar un camino).

5. Sea C un nodo válido conectado a B
    a. Asignar f(), g() y h() al nodo C.
    b. Verificar si C está en la lista abierta o en la lista cerrada.
        i. Si está en una de las listas, verificar si el nuevo camino es más eficiente (menor valor de f()).
            1. Si es más eficiente, actualizar el camino.
        ii. Si no, poner C en la lista abierta
    c. Repetir paso 5 para todos los nodos derivados de B.
6. Mover B desde la lista abierta a la lista cerrada y repetir desde paso 4

Tomado literalmente de [23, págs.: 16 y 107], traducción, autor

Programa en R algoritmo A*

```
paso <- 1
#funcion llenar open_list: 8 puntos con cordenadas
llenar_lista_abierta <- function(x0,y0,x,y,xf,yf,k){
  open_lst <- matrix(nrow=k,ncol=5)
  colnames(open_lst) <- c("X","Y","G","F","C")
  c <- sqrt(2); a <- 1+((sqrt(2)-1)/2); b <- 1+((sqrt(2)-1)/3); d <- 1+(2*(sqrt(2)-1)/3)
  if(k == 8){
    #tres de la derecha
    open_lst[1,1] <- x + paso; open_lst[1,2] <- y + paso; open_lst[1,5] <- c
    open_lst[2,1] <- x + paso; open_lst[2,2] <- y;        open_lst[2,5] <- 1
    open_lst[3,1] <- x + paso; open_lst[3,2] <- y - paso; open_lst[3,5] <- c
    #tres de la iquierda
    open_lst[4,1] <- x - paso; open_lst[4,2] <- y + paso; open_lst[4,5] <- c
    open_lst[5,1] <- x - paso; open_lst[5,2] <- y;        open_lst[5,5] <- 1
    open_lst[6,1] <- x - paso; open_lst[6,2] <- y - paso; open_lst[6,5] <- c
    #el de arriba y el de abajo
    open_lst[7,1] <- x; open_lst[7,2] <- y + paso;        open_lst[7,5] <- 1
```

```
  open_lst[8,1] <- x; open_lst[8,2] <- y - paso;        open_lst[8,5] <- 1
}
if(k == 16){
  #cinco de la derecha
  open_lst[1,1] <- x + 2*paso; open_lst[1,2] <- y + 2*paso;   open_lst[1,5] <- c
  open_lst[2,1] <- x + 2*paso; open_lst[2,2] <- y + paso;     open_lst[2,5] <- a
  open_lst[3,1] <- x + 2*paso; open_lst[3,2] <- y;            open_lst[3,5] <- 1
  open_lst[4,1] <- x + 2*paso; open_lst[4,2] <- y - paso;     open_lst[4,5] <- a
  open_lst[5,1] <- x + 2*paso; open_lst[5,2] <- y - 2*paso;   open_lst[5,5] <- c
  #cinco de la iquierda
  open_lst[6,1] <- x - 2*paso;  open_lst[6,2] <- y + 2*paso;   open_lst[6,5] <- c
  open_lst[7,1] <- x - 2*paso;  open_lst[7,2] <- y + paso;     open_lst[7,5] <- a
  open_lst[8,1] <- x - 2*paso;  open_lst[8,2] <- y;            open_lst[8,5] <- 1
  open_lst[9,1] <- x - 2*paso;  open_lst[9,2] <- y - paso;     open_lst[9,5] <- a
  open_lst[10,1] <- x - 2*paso; open_lst[10,2] <- y - 2*paso;  open_lst[10,5] <- c
  #tres de arriba y tres de abajo
  open_lst[11,1] <- x + paso; open_lst[11,2] <- y + 2*paso;   open_lst[11,5] <- a
  open_lst[12,1] <- x;        open_lst[12,2] <- y + 2*paso;   open_lst[12,5] <- 1
  open_lst[13,1] <- x - paso; open_lst[13,2] <- y + 2*paso;   open_lst[13,5] <- a
  open_lst[14,1] <- x + paso; open_lst[14,2] <- y - 2*paso;   open_lst[14,5] <- a
  open_lst[15,1] <- x;        open_lst[15,2] <- y - 2*paso;   open_lst[15,5] <- 1
  open_lst[16,1] <- x - paso; open_lst[16,2] <- y - 2*paso;   open_lst[16,5] <- a
}
if(k == 24){
  #siete de la derecha
  open_lst[1,1] <- x + 3*paso; open_lst[1,2] <- y + 3*paso; open_lst[1,5] <- c
  open_lst[2,1] <- x + 3*paso; open_lst[2,2] <- y + 2*paso; open_lst[2,5] <- d
  open_lst[3,1] <- x + 3*paso; open_lst[3,2] <- y + paso;   open_lst[3,5] <- b
  open_lst[4,1] <- x + 3*paso; open_lst[4,2] <- y;          open_lst[4,5] <- 1
  open_lst[5,1] <- x + 3*paso; open_lst[5,2] <- y - paso;   open_lst[5,5] <- b
  open_lst[6,1] <- x + 3*paso; open_lst[6,2] <- y - 2*paso; open_lst[6,5] <- d
  open_lst[7,1] <- x + 3*paso; open_lst[7,2] <- y - 3*paso; open_lst[7,5] <- c
```

```
    #siete de la iquierda
    open_lst[8,1] <- x - 3*paso;  open_lst[8,2] <- y + 3*paso;  open_lst[8,5] <- c
    open_lst[9,1] <- x - 3*paso;  open_lst[9,2] <- y + 2*paso;  open_lst[9,5] <- d
    open_lst[10,1] <- x - 3*paso; open_lst[10,2] <- y + paso;   open_lst[10,5] <- b
    open_lst[11,1] <- x - 3*paso; open_lst[11,2] <- y;          open_lst[11,5] <- 1
    open_lst[12,1] <- x - 3*paso; open_lst[12,2] <- y - paso;   open_lst[12,5] <- b
    open_lst[13,1] <- x - 3*paso; open_lst[13,2] <- y - 2*paso; open_lst[13,5] <- d
    open_lst[14,1] <- x - 3*paso; open_lst[14,2] <- y - 3*paso; open_lst[14,5] <- c
    #cinco de arriba y tres de abajo
    open_lst[15,1] <- x + 2*paso; open_lst[15,2] <- y + 3*paso; open_lst[15,5] <- d
    open_lst[16,1] <- x + paso;   open_lst[16,2] <- y + 3*paso; open_lst[16,5] <- b
    open_lst[17,1] <- x;          open_lst[17,2] <- y + 3*paso; open_lst[17,5] <- 1
    open_lst[18,1] <- x - paso;   open_lst[18,2] <- y + 3*paso; open_lst[18,5] <- b
    open_lst[19,1] <- x - 2*paso; open_lst[19,2] <- y + 3*paso; open_lst[19,5] <- d
    open_lst[20,1] <- x + 2*paso; open_lst[20,2] <- y - 3*paso; open_lst[20,5] <- d
    open_lst[21,1] <- x + paso;   open_lst[21,2] <- y - 3*paso; open_lst[21,5] <- b
    open_lst[22,1] <- x;          open_lst[22,2] <- y - 3*paso; open_lst[22,5] <- 1
    open_lst[23,1] <- x - paso;   open_lst[23,2] <- y - 3*paso; open_lst[23,5] <- b
    open_lst[24,1] <- x - 2*paso; open_lst[24,2] <- y - 3*paso; open_lst[24,5] <- d
  }
  for(i in 1:k){
    #poner distancia euclidea hacia adelante H y hacia atras para guia
    open_lst[i,3] <- sqrt(((xf-open_lst[i,1])^2)+((yf-open_lst[i,2])^2)) + sqrt(((x-open_lst[i,1])^2)+((y-
open_lst[i,2])^2))
    #ubicar punto en matriz de friccion compensar 50 a cada lado en matriz friccion
    #compensado 50 celdas a los xs de 255 a 205
    punto_x <- trunc(open_lst[i,1] - 776205)
    #compensado  50 a los ys de 942 a 992
    punto_y <- trunc(9975992 - open_lst[i,2])
    #print(c(punto_y,punto_x))
    #extraer el valor de la fricción esta matriz mide primero hacia abajo y luego a la derecha
    open_lst[i,4] <- matriz_friccion[punto_y, punto_x]*open_lst[i,5]
```

```
  }
  open_lst
}

#funcion hallar camino entre dos puntos
camino <- function(x_i,y_i,x_f,y_f){
  if( sqrt(((x_f - x_i)^2)+((y_f - y_i)^2)) <= paso) {
    lista_cerrada <- list(c(x_i,y_i, sqrt(((x_f - x_i)^2)+((y_f - y_i)^2))))
  } else {
    x_actual <- x_i
    y_actual <- y_i
    lista_cerrada <- list()
    repeat {

      tempo1 <- llenar_lista_abierta(x_i,y_i,x_actual,y_actual,x_f,y_f,8)
      tempo2 <- which(tempo1[,3]==min(tempo1[,3]))
      tempo3 <- min(tempo2)
      lista_cerrada[[length(lista_cerrada)+1]] <-
c(tempo1[tempo3,1],tempo1[tempo3,2],tempo1[tempo3,4])

      if( sqrt(((x_f - tempo1[tempo3,1])^2)+((y_f - tempo1[tempo3,2])^2)) > paso){
        tempo1 <- llenar_lista_abierta(x_i,y_i,x_actual,y_actual,x_f,y_f,16)
        tempo2 <- which(tempo1[,3]==min(tempo1[,3]))
        tempo3 <- min(tempo2)
        lista_cerrada[[length(lista_cerrada)+1]] <-
c(tempo1[tempo3,1],tempo1[tempo3,2],tempo1[tempo3,4])
      } else { break }

      if( sqrt(((x_f - tempo1[tempo3,1])^2)+((y_f - tempo1[tempo3,2])^2)) > paso){
        tempo1 <- llenar_lista_abierta(x_i,y_i,x_actual,y_actual,x_f,y_f,24)
        tempo2 <- which(tempo1[,3]==min(tempo1[,3]))
        tempo3 <- min(tempo2)
```

```
          lista_cerrada[[length(lista_cerrada)+1]] <-
c(tempo1[tempo3,1],tempo1[tempo3,2],tempo1[tempo3,4])

        } else { break}


        x_actual <- tempo1[tempo3,1]

        y_actual <- tempo1[tempo3,2]

        #points(x_actual, y_actual, pch=46, col="red")

        if( sqrt(((x_f - x_actual)^2)+((y_f - y_actual)^2)) <= paso){  break }

      }#repeat

    }#else

    lista_cerrada

}
```

Anexo 2 Variograma experimental y ajuste de variograma teórico (lenguaje R)

```
#Programa para hacer variograma con métrica A*
#calcular la distancia entre dos puntos con costo usando algoritmo A*
fricc_alta <- 1.13
fricc_baja <- 1

x_min <- 776255
x_max <- 777067
y_min <- 9975179
y_max <- 9975942

#subir datos medidos
tempo <- read.csv(file = "D:/t/data/datos_total_ultimo.txt", header=TRUE, sep = "\t")
#pasar a amatriz datos medidos
noise_d <- as.matrix(tempo)
#tamaño de la muestra
n <- 166

#########################################################################
#subir matriz que define los valores de fricción
#########################################################################
tempo2 <- read.csv(file = "D:/t/matriz_friccion.txt", header=TRUE, sep = "\t")
matriz_friccion <- as.matrix(tempo2)

#crear matriz de distancias
dist <- matrix(numeric(0),n,n)

#subir programa de métrica A* con matrices
source("D:/t/progs/4_distancia_estrella_recto_matriz.txt")
```

```
#llenar matriz de distancias
for(i in 1:n){
	for(j in 1:n){
		cam <- camino(noise_d[i,2], noise_d[i,3], noise_d[j,2], noise_d[j,3])
		tempo <- Reduce("+",cam)
		dist[j,i] <- tempo[[3]]
		print(c(i,j))
	}
}

write.table(dist, "D:/t/distancias_muestra_costo.txt", col.names = FALSE,
row.names = FALSE, sep = "\t", quote = FALSE)

###########################################################################
#hacer variograma experimental en base a la matriz de distancias y valores muestrales
###########################################################################
tempo <- read.csv(file = "d:/t/distancias_muestra_costo.txt", header=FALSE, sep = "\t")
dist <- as.matrix(tempo)
vari <- matrix(numeric(0), n,n)
tabla <- matrix(numeric(0), (n*n),2)
#llenar matriz de varianzas entre puntos medidos
for(i in 1:n){
	for(j in 1:n){
		vari[i,j]  <- (noise_d[i,4]-noise_d[j,4])^2
	}
}
#combinar y estirar las matrices: distancias y varianzas
k <- 1
for(i in 1:n){
	for(j in i:n){
		k <- ((i-1)*n)+j
		tabla[k,1]  <- dist[i,j]
```

```
                tabla[k,2]  <- vari[i,j]
        }
}
#quitar los NA
tabla <- tabla[!is.na(tabla[,1]),]
rango <- max(tabla[,1]) - min(tabla[,1])
#definir número de segmentos para construir variograma
segmentos <- 110
lag <- rango / segmentos

variograma <- matrix(numeric(0), segmentos, 4)

for(i in 1:segmentos){
        variograma[i,1] <- 0
        variograma[i,2] <- 0
        variograma[i,3] <- 0
        for (j in 1:(length(tabla)/2)){
                if ( (i-1)*lag < tabla[j,1] && tabla[j,1] <= i*lag ) {
                        variograma [i,2]  <- variograma[i,2]+ tabla[j,2]
                        variograma [i,1]  <- variograma[i,1]+1
                        variograma [i,4]  <- i*lag
                        variograma [i,4]  <- variograma[i,4] - (lag/2)
                }
        }
}

for(i in 1:segmentos){
        variograma[i,3] <- variograma[i,2] / (2*variograma[i,1])
}
#graficar variograma
plot(variograma[,4],variograma[,3])
```

```
#grabar variograma experimental en archivo para ajuste

#write.table(variograma, "d:/t/tabla_variograma_ultimo.txt", col.names = TRUE, row.names =
FALSE, sep = "\t", quote = FALSE)


#########################################################################

#ajustar variograma por mínimos cuadrados generalizados no lineales

#################################################################

#cargar librería para ajuste no lineal por mínimos cuadrados generalizados

library(nlme)

#quitar los valores NA

variograma <- variograma[!is.na(variograma[,4]),]

#pasar tabla de variograma a dataframe

df = data.frame(variograma)


#########################################################################

#estimar parámetros del variograma gausiano

#########################################################################

ajuste_gau <- gnls(X3 ~ (sill*(1 - (2.718281828^(-X4^2/range^2)))) ,

data=df,start=c(sill=50,range=50),control=list(maxIter = 1000, pnlsMaxIter = 20, msMaxIter =
1000))

summary(ajuste_gau)


#########################################################################

#comparación variograma experimental con teórico gausiano

e <- 2.7182818284590452353602874713527

c <-  coef(ajuste_gau)[1]                              # sill

a <-  coef(ajuste_gau)[2]                              # rango

b <-  0                        # valor en cero nugget

temp <- round(a)

test1 <- matrix(ncol = 2, nrow = (20*temp))

for( i in 1:(20*temp)) {

            test1[i,1] <- i

            test1[i,2] <- b + c*(1-(e^(-(test1[i,1]^2)/(a^2))))
```

```
}
par(new=TRUE)
#plot(test1, col="darkblue")
par(new=TRUE)
points(cbind(test1[,1],test1[,2]), col="red")
#



#estimar parámetros del variograma esférico
ajuste_sph <- gnls(X3 ~ (b + sill*( ((3*X4)/(2*range)) - (0.5*(X4/range)^3))),
data=df,start=c(b=0,sill=50,range=50),control=list(maxIter = 1000, pnlsMaxIter = 200,
msMaxIter = 1000,tolerance = 1e-06, pnlsTol = 1e-04, msTol = 1e-07, minScale = 1e-10,
returnObject = TRUE))

summary(ajuste_sph)

##############################################################################
###
#comparación variograma experimental con teórico esférico
c <-  coef(ajuste_sph)[2]                    # sill
a <-  coef(ajuste_sph)[3]                    # rango
b <-  coef(ajuste_sph)[1]                    # valor en cero nugget
test1 <- matrix(ncol = 2, nrow = 20*a)
for( i in 1:(20*a)) {
        test1[i,1] <- i
        test1[i,2] <- b + c*( (3*test1[i,1]/2*a) - (0.5*(test1[i,1]/a)^3) )
}
par(new=TRUE)
#plot(test1, col="darkblue")
par(new=TRUE)
points(cbind(test1[,1],test1[,2]), col="red")
```

```
##############################################################################
#estimar parámetros del variograma exponencial
ajuste_exp <- gnls(X3 ~ b + sill*(1-(2.718281828^(-X4^2/range^2))),data=df,
start=c(b=0,sill=50,range=50))
summary(ajuste_exp)

#estimar parámetros del variograma de potencia
ajuste_pow <- gnls(X3 ~ c*(X4^a),data=df,start=c(c=0.6,c=2))
summary(ajuste_pow)
```

Anexo 3 Retirar puntos fuera del perímetro (lenguaje R)

```
#programa para quitar los puntos fuera del perimetro

#compilar funciones primera vez que se usan

library(compiler)

enableJIT(3)

#límites área de estudio

x_min <- 776255.5

x_max <- 777066.5

y_min <- 9975179.5

y_max <- 9975941.5

require(raster)

perimetro <- raster("D:/t/maps/perimetro_1m.tif", package="raster")

#reclasificar a 1 y 2

r2 <- reclassify(perimetro, c(0.5,1.5,2))

r2 <- reclassify(r2, c(-0.5,0.5,1))

#expandir la grilla para predicciones

grilla <- expand.grid(x=seq(from=x_min, to=x_max, by=1), y=seq(from=y_min, to=y_max, by=1))

grillar <- list()

#reducir grillam quitando los que no entran el el perimetro

for(i in 1 :length(grilla[[1]])){

  if(extract(r2,cbind(grilla[[1]][i],grilla[[2]][i]))==2){

    grillar[[length(grillar)+1]] <- c(grilla[[1]][i],grilla[[2]][i])

  }

  print(i)

}

#grabar resultados

matrixFromList <- function(listX) t(sapply(listX, function(x, n) c(x, rep(NA, n))[1:n], n =
max(sapply(listX, length))))

grillam <- matrixFromList(grillar)

write.table(grillam, "d:/t/grilla_reducida_para_interpolacion.txt", col.names = FALSE, row.names =
FALSE, sep = "\t", quote = FALSE)

#END
```

Anexo 4 Transformación de mapa raster a matriz de fricción (lenguaje R)

```
#programa para hacer matriz de fricción (1 y 1,13) dentro del perímetro

#compilar funciones primera vez que se usan
library(compiler)
enableJIT(3)
enableJIT(3)

fricc_alta <- 1.13
fricc_baja <- 1

x_min <- 776255
x_max <- 777067
y_min <- 9975179
y_max <- 9975942

library(raster)
r <- raster("D:/t/centro_cuadras_utm.tif", package="raster")

#reclasificar a 0 los parques
r2 <- reclassify(r, c(2.5,3.5,0))
#reclasificar a 0 los parques
r2 <- reclassify(r2, c(8.5,9.5,0))
#reclasificar a 0 los parques
r2 <- reclassify(r2, c(17.5,18.5,0))
#reclasificar 1 a 1.13
r3 <- reclassify(r2, c(0.5,Inf,fricc_alta))
#reclasificar a calles y parques de 0 a 1
r3 <- reclassify(r3, c(-0.5,0.5,fricc_baja))

#########################################################################
```

```
#construir matriz grilla con cordenadas de centroides una para los xs y otra para los ys
#############################################################################
#tamaño de los elementos de la reja en metros (1 metro)
paso <- 1.0
rango_grid_x <- (x_max - x_min)
grid_x_n <- rango_grid_x / paso

rango_grid_y <- (y_max - y_min)
grid_y_n <- rango_grid_y / paso

grid_x <- matrix(ncol = grid_x_n, nrow = grid_y_n)
grid_y <- matrix(ncol = grid_x_n, nrow = grid_y_n)

#construir la matriz grid cordenadas x centroide
for(i in 1:grid_x_n){
        for(j in 1:grid_y_n){
                grid_x[j,i]  <- (x_min+(paso/2)) + (paso*(i-1))
        }
}

#construir la matriz grid cordenadas y centroide
for(j in 1:grid_y_n){
        for(i in 1:grid_x_n){
                grid_y[j,i]  <- (y_max-(paso/2)) - (paso*(j-1))
        }
}
#############################################################################
#llenar matriz fricción
#############################################################################
matriz_friccion <- matrix(ncol = grid_x_n, nrow = grid_y_n)

#construir la matriz friccion
```

```
for(i in 1 :grid_y_n){
        for(j in 1:grid_x_n){
          matriz_friccion[i,j] <- extract(r3,cbind(grid_x[i,j],grid_y[i,j]))
          print(c(i,j))
        }
}
library(raster)
final <- raster(matriz_friccion, xmn=x_min, xmx=x_max, ymn=y_min, ymx=y_max)
writeRaster(final, "d:/t/matriz_friccion.tif", format="GTiff", overwrite=TRUE, package="raster")
write.table(matriz_friccion, "d:/t/matriz_friccion.txt", col.names = TRUE,
row.names = FALSE, sep = "\t", quote = FALSE)
#END
```

Anexo 5 Interpolación Kriging ordinario con métrica de costo (lenguaje R)

```
#Programa de interpolación Kriging con costo y métrica A*

#compilar funciones primera vez que se usan
library(compiler)
enableJIT(3)
enableJIT(3)

#cargar librerías de Snowfall para uso de varios núcleos
require(snowfall)

#definir el número de núcleos
sfInit( parallel=TRUE, cpus=88)

#límites área de estudio
#x_min <- 776255.5
#x_max <- 777066.5
#y_min <- 9975179.5
#y_max <- 9975941.5

#Cargar los datos medidos desde archivo
centro <- read.csv(file ="d:/t/data/datos_total_ultimo.txt", header=TRUE, sep = "\t")
noise_data <- as.matrix(centro)

#borrar de memorio objeto que ya no se usa
rm(centro)

#tamaño de la muestra
n <- 166

#subir archivo con grilla para predicciones
grilla <- read.csv(file = "d:/t/grilla_reducida_para_interpolacion.txt",
```

```
header=FALSE, sep = "\t")

#pasar la grilla a matriz
grillam <- as.matrix(grilla, byrow=TRUE)

#subir programa con función camino de métrica A*
source("d:/t/progs/4_distancia_estrella_recto_matriz.txt")

#subir matriz que define los valores de friccion
tempo2 <- read.csv(file = "d:/t/matriz_friccion.txt", header=TRUE, sep = "\t")
matriz_friccion <- as.matrix(tempo2)

#borrar de memorio objeto que ya no se usa
rm(tempo2)

#########################################################################
#cargar matriz de distancias entre puntos muestrales
#########################################################################
tempo <- read.csv(file = "d:/t/distancias_muestra_costo.txt", header=FALSE, sep = "\t")
noise_dist <- as.matrix(tempo)

#retirar de memoria elemento no necesario
rm(tempo)

#########################################################################
#construir la matriz semi_i_j en base a la matriz de ditancias noise_d_m
#y la funcion del variograma gaussiano ajustado
#########################################################################

#valor del número e
e <- 2.71828182845904523536028747135 27
```

```
#valor del sill obtenido en programa de ajuste de variograma
sill <- 53.71075

#valor del rango obtenido en programa de ajuste de variograma
range <- 40.66182

semi_i_j <- matrix(ncol = n, nrow = n)
for(i in 1:n){
        for(j in 1:n){
          semi_i_j[i,j]  <- sill*(1-(e^(-(noise_dist[i,j]^2)/(range^2))))
        }
}

#matrices para vector distancias y semovarianzas
dist_e_m <- matrix(ncol = 1, nrow = n, byrow=TRUE)
semi_medidos_z <- matrix(ncol = 1, nrow = n, byrow=TRUE)

#aumentar multiplicador de lagrange fila de unos
semi_i_j <- rbind(semi_i_j, 1)

#aumentar multiplicador de lagrange columna de unos
semi_i_j <- cbind(semi_i_j, 1)

#aumentar multiplicador de lagrange ultimo es cero
semi_i_j[(n+1),(n+1)] <- 0

#aumentar 1 al vector de datos
noise_v <- matrix(ncol = 1, nrow = (n+1))
for(s in 1:n){noise_v[s,1] = noise_data[s,4] }
noise_v[(n+1),1] <- 1

#invertir matriz extendida de covarianzas entre puntos muestrales
```

```
if(det(semi_i_j) != 0)      { semi_i_j_inv <- solve(semi_i_j) }

#función para evaluar en cada pareja (x,y) de la grilla
evaluar <- function(x,y) {
  for (k in 1:n) {
    #llenar matriz de distancias
    cam <- camino(x, y, noise_data[k,2], noise_data[k,3])
    largo <- 0
    tempo <- Reduce("+",cam)
    dist_e_m[k,1] <- tempo[[3]]
  }
          semi_medidos <- apply(dist_e_m, 1, function(u) sill*(1-(e^(-(u^2)/(range^2)))))
          semi_medidos_z <- as.matrix(semi_medidos, ncols=1, byrows=TRUE)
          semi_medidos_z <- rbind(semi_medidos_z,1)
          W <- (semi_i_j_inv %*% semi_medidos_z)
          t(W)%*% noise_v
}

#exportar a cada núcleo los elementos necesarios
sfExportAll()

#evaluar el modelo sobre la lista de coordenadas
system.time(grilla$pred <- sfApply(grillam, 1 , function(x) evaluar(x[1],x[2])))

#parar el uso de varios núcleos
sfStop()

#escribir los resultados a archivo
write.table(grilla, "d:/t/resultado_interpolacion_ordinaria_friccion_1m.txt",
col.names = TRUE, row.names = FALSE, sep = "\t", quote = FALSE)
#FIN de la simulación
```

```
#convertir los resultados a formato TIF
library(raster)
#convertir grilla a formato espacial
coordinates(grilla) <- ~ V1+V2
gridded(grilla) <- TRUE
temp2 <- raster(grilla)
plot(temp2)

writeRaster(temp2, "d:/t/resultado_interpolación_ordinaria_friccion_1m.tif",
format="GTiff", overwrite=TRUE, package="raster")
#FIN del programa
```

Anexo 6 Programa par prueba de hipótesis sobre la diferencia entre mapas (Lenguaje R)

```
#programa para hacer prueba de hipótesis sobre la nulidad de la diferencia entre mapas

#compilar funciones primera vez que se usan
library(compiler)
enableJIT(3)
enableJIT(3)

#subir mapa de diferencias
library(raster)
resta <- raster("d:/t/maps/diferencia_entre_metodos.tif", package="raster")
#reclasificar 0 a 0
resta2 <- reclassify(resta, c(0.0,0.0,0))

#subir archivo con grilla para predicciones
grilla <- read.csv(file = "d:/t/grilla_reducida_para_interpolacion.txt", header=FALSE, sep = "\t")
#pasar la grilla a matriz
grillam <- as.matrix(grilla, byrow=TRUE)

#construir la lista de diferencias dentro del perímetro
diferencia <- list()

for(i in 1 :length(grillam[1])){
  diferencia[[length(diferencia)+1]] <- extract(resta2,cbind(dif[[1]][i],dif[[2]][i]))
  print(i)
}



#trasformar lista en vector
matrixFromList <- function(listX) t(sapply(listX, function(x, n) c(x, rep(NA, n))[1:n],
n = max(sapply(listX, length)))) diferencia_v <- t(matrixFromList(diferencia))
```

```
#gráfico de cajas para la diferencia entre mapas
boxplot(diferencia_v)

#histograma para la diferencia entre mapas
hist(diferencia_v)

#prueba de hipótesis sobre la nulidad de la media del vector de diferencias
t.test(diferencia_v)
```

Anexo 7 Tabla de mediciones

id	x	y	leqd
26	776571,11	9975578,43	57,64
27	776587,57	9975604,53	57,28
28	776584,85	9975565,87	59,23
29	776605,68	9975588,76	59,14
30	776607,67	9975545,51	61,01
31	776628,06	9975568,63	59,37
32	776625,27	9975529,68	64,91
33	776647,33	9975553,47	66,07
35	776674,05	9975527,24	56,21
38	776698,44	9975462,96	61,76
39	776722,83	9975489,39	61,59
43	776763,20	9975452,07	49,19
44	776775,37	9975395,42	69,14
45	776794,28	9975415,75	71,30
49	776832,80	9975386,47	47,24
70	776540,03	9975689,24	43,53
73	776604,85	9975632,64	59,33
74	776626,29	9975611,99	59,60
75	776649,00	9975591,63	59,45
76	776667,49	9975575,15	68,70
79	776739,99	9975508,64	61,76
82	776817,74	9975442,86	68,00
83	776838,60	9975439,37	64,24
84	776860,64	9975418,52	63,66
85	776881,86	9975398,04	64,83
103	776623,40	9975654,48	62,84
104	776643,89	9975631,13	62,65
105	776666,38	9975611,10	62,02
106	776686,32	9975593,84	67,57
107	776711,93	9975570,60	63,79
108	776733,42	9975548,36	60,97
109	776759,93	9975532,65	62,64
110	776778,30	9975504,99	63,77
111	776797,90	9975485,95	61,05
112	776833,54	9975468,36	67,22
133	776639,77	9975680,36	63,20
134	776669,60	9975659,16	45,13
136	776707,71	9975619,73	67,87
139	776779,20	9975555,55	67,23
142	776855,71	9975493,02	66,08
157	776531,39	9975824,66	57,41

id	x	y	leqd
263	776723,29	9975318,92	70,47
284	776501,41	9975478,15	62,58
286	776545,51	9975439,20	68,60
287	776575,35	9975402,24	68,00
288	776594,73	9975387,63	67,75
289	776616,67	9975372,91	70,20
290	776637,94	9975353,66	66,39
291	776665,33	9975332,08	66,67
292	776689,39	9975314,27	68,37
293	776712,11	9975298,00	68,54
294	776737,50	9975277,19	65,96
295	776757,21	9975257,28	65,88
296	776781,15	9975239,13	67,21
309	776366,04	9975559,74	71,87
310	776397,20	9975536,55	70,79
311	776417,90	9975516,10	70,20
312	776443,22	9975497,53	69,95
313	776467,57	9975479,62	66,98
314	776485,81	9975451,60	64,96
315	776505,74	9975432,57	62,68
316	776526,24	9975419,73	65,35
319	776595,84	9975350,46	64,52
323	776681,70	9975275,54	66,60
324	776708,81	9975243,33	49,82
344	776464,20	9975431,80	59,71
345	776485,80	9975415,86	61,92
346	776505,36	9975395,21	63,23
347	776529,20	9975356,66	50,42
349	776574,11	9975331,21	63,23
351	776622,50	9975288,70	50,65
353	776662,09	9975256,41	65,40
371	776372,09	9975471,45	45,59
374	776442,70	9975407,27	59,45
375	776459,67	9975392,74	50,08
376	776486,15	9975372,79	64,59
379	776556,29	9975311,52	63,56
383	776636,02	9975230,86	65,78
404	776424,51	9975383,70	59,66
406	776464,48	9975350,01	63,92
409	776534,68	9975286,19	63,01
518	776580,68	9975832,92	53,57

id	x	y	leqd		id	x	y	leqd
158	776554,25	9975806,93	59,01		522	776668,07	9975735,90	64,58
159	776577,85	9975787,50	60,08		526	776748,14	9975665,52	65,45
160	776605,78	9975766,42	62,73		527	776775,80	9975624,60	48,57
161	776624,08	9975748,41	63,35		529	776818,97	9975600,01	65,79
162	776646,69	9975729,60	62,90		531	776861,50	9975555,10	53,14
163	776661,83	9975710,56	61,51		532	776893,54	9975537,88	76,35
166	776727,87	9975643,07	68,19		550	776642,02	9975809,59	48,55
169	776801,93	9975578,55	66,75		551	776666,08	9975784,80	53,80
172	776872,87	9975515,70	66,66		552	776686,23	9975760,79	65,11
174	776908,10	9975480,60	47,01		556	776768,09	9975687,31	74,76
191	776489,57	9975594,37	64,69		559	776833,56	9975616,83	66,71
192	776517,35	9975576,50	65,28		562	776913,80	9975559,77	73,03
193	776543,12	9975560,71	63,14		579	776621,49	9975840,07	51,06
194	776562,79	9975541,20	64,53		582	776705,06	9975784,68	66,32
195	776586,29	9975521,28	65,52		584	776732,60	9975750,20	44,45
196	776607,45	9975506,34	68,83		586	776792,60	9975705,62	71,22
197	776634,84	9975483,77	63,84		587	776814,56	9975684,40	61,65
198	776654,77	9975460,64	62,70		588	776837,62	9975664,13	63,23
199	776679,16	9975440,17	65,99		589	776865,54	9975641,83	65,51
200	776700,98	9975424,18	62,43		590	776887,03	9975619,70	60,61
201	776727,57	9975404,07	66,45		591	776909,52	9975603,76	57,78
202	776749,39	9975386,57	69,68		592	776934,36	9975586,83	68,25
203	776773,80	9975364,07	69,47		593	776950,66	9975569,15	66,27
204	776800,95	9975344,79	64,35		594	776973,82	9975552,25	61,05
205	776822,35	9975328,22	66,52		595	777002,34	9975533,71	65,28
219	776430,45	9975627,95	66,02		606	776579,89	9975934,95	67,27
220	776459,49	9975609,11	62,09		611	776704,18	9975830,37	61,69
226	776587,62	9975486,43	66,42		612	776724,33	9975808,24	62,77
228	776630,94	9975447,37	61,65		616	776811,84	9975727,95	69,93
229	776656,77	9975417,83	65,25		619	776886,03	9975667,27	65,39
231	776695,74	9975379,04	50,27		620	776907,75	9975653,32	59,57
233	776742,21	9975343,61	71,60		621	776927,35	9975632,63	58,62
234	776778,87	9975311,19	50,72		622	776946,84	9975612,94	65,81
249	776412,11	9975595,11	49,36		625	777018,35	9975547,63	64,40
251	776459,67	9975560,34	45,42		644	776786,37	9975793,74	64,94
252	776486,56	9975540,00	49,11		646	776831,67	9975750,05	71,56
254	776520,68	9975501,93	64,91		649	776902,19	9975687,73	65,95
255	776542,20	9975483,80	49,16		650	776922,68	9975667,15	59,67
256	776568,23	9975464,86	67,09		651	776947,07	9975653,32	59,22
257	776591,16	9975432,80	50,57		652	776969,45	9975638,27	66,65
259	776639,95	9975398,25	66,84		654	777005,10	9975596,00	50,48
373	776420,00	9975430,00	43,40		852	776983,93	9975654,64	68,80

Anexo 8 Paleta de colores para presentación de mapas de contaminación acústica

Leq_día	rojo	verde	azul	etiqueta
40,5	0	0	255	40,5 dB
41,5	0	17	237	41,5 dB
42,5	0	34	220	42,5 dB
43,5	0	51	203	43,5 dB
44,5	0	69	185	44,5 dB
45,5	0	86	168	45,5 dB
46,5	0	103	151	46,5 dB
47,5	0	121	133	47,5 dB
48,5	0	138	116	48,5 dB
49,5	0	155	99	49,5 dB
50,5	0	172	82	50,5 dB
51,5	0	190	64	51,5 dB
52,5	0	207	47	52,5 dB
53,5	0	224	30	53,5 dB
54,5	0	242	12	54,5 dB
55,5	4	255	0	55,5 dB
56,5	21	255	0	56,5 dB
57,5	38	255	0	57,5 dB
58,5	56	255	0	58,5 dB
59,5	73	255	0	59,5 dB
60,5	90	255	0	60,5 dB
61,5	108	255	0	61,5 dB
62,5	125	255	0	62,5 dB
63,5	142	255	0	63,5 dB
64,5	159	255	0	64,5 dB
65,5	177	255	0	65,5 dB
66,5	194	255	0	66,5 dB
67,5	211	255	0	67,5 dB
68,5	229	255	0	68,5 dB
69,5	246	255	0	69,5 dB

Leq_día	rojo	verde	azul	etiqueta
70,5	255	246	0	70,5 dB
71,5	255	229	0	71,5 dB
72,5	255	211	0	72,5 dB
73,5	255	194	0	73,5 dB
74,5	255	177	0	74,5 dB
75,5	255	159	0	75,5 dB
76,5	255	142	0	76,5 dB
77,5	255	125	0	77,5 dB
78,5	255	108	0	78,5 dB
79,5	255	90	0	79,5 dB
80,5	255	73	0	80,5 dB
81,5	255	56	0	81,5 dB
82,5	255	38	0	82,5 dB
83,5	255	21	0	83,5 dB
84,5	255	4	0	84,5 dB
85,5	255	12	12	85,5 dB
86,5	255	30	30	86,5 dB
87,5	255	47	47	87,5 dB
88,5	255	64	64	88,5 dB
89,5	255	82	82	89,5 dB
90,5	255	99	99	90,5 dB
91,5	255	116	116	91,5 dB
92,5	255	133	133	92,5 dB
93,5	255	151	151	93,5 dB
94,5	255	168	168	94,5 dB
95,5	255	185	185	95,5 dB
96,5	255	203	203	96,5 dB
97,5	255	220	220	97,5 dB
98,5	255	237	237	98,5 dB
99,5	255	255	255	99,5 dB

Anexo 9 DVD adjunto