



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

VALIDACIÓN DEL MODELO PREDICTIVO DE RUIDO DE TRÁFICO
SEGÚN EL MÉTODO COMÚN EUROPEO EN LAS CONDICIONES
VEHICULARES DE LA CIUDAD DE QUITO

AUTOR

EDISON DAVID PACHECO BUCHELI

AÑO

2017



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

VALIDACIÓN DEL MODELO PREDICTIVO DE RUIDO DE TRÁFICO SEGÚN
EL MÉTODO COMÚN EUROPEO EN LAS CONDICIONES VEHICULARES DE
LA CIUDAD DE QUITO

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero de Sonido y Acústica

Profesor guía

Ing. Luis Alberto Bravo Moncayo

Autor

Edison David Pacheco Bucheli

Año

2017

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Luis Alberto Bravo Moncayo

Ingeniero acústico

CI: 1711710606

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Jorge Páez Rodríguez

Master en gestión y evaluación de la contaminación acústica

CI: 1756773154

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Edison David Pacheco Bucheli

C.I. 1718161266

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera especial a la Universidad de las Américas y a mis docentes por formarme con calidad y exigencia, a mis padres por acompañarme paso a paso en este proceso universitario y a todos los que de alguna forma aportaron a esta investigación.

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres que me han formado con su ejemplo de perseverancia, dedicación y sacrificio, a mis hermanos quienes llenan de alegría cada uno de mis días y en especial a mis abuelos que han estado en mi crecimiento personal y profesional.

RESUMEN

Este trabajo es una investigación y validación del modelo de predicción de ruido de tráfico denominado Common Noise Assessment Methods (CNOSSOS) desarrollado en 2012 por la Unión Europea que tiene como objetivo mejorar la fiabilidad, la consistencia y la comparabilidad de los resultados de la evaluación del ruido en todos los estados miembros de la UE. La investigación se enfoca en la validación del modelo en la realidad vehicular de Quito. Se midieron y grabaron varias muestras de ruido de tráfico rodado de las cuales se obtuvo información acerca de los descriptores acústicos utilizados para estudios de impacto ambiental. Se definió los puntos de medición en los cuales se evidenciaba los escenarios planteados en el modelo de predicción como el flujo de tránsito, pendientes, semáforos, redondeles etc. Esta investigación se centra en la comparación de los valores medidos y modelados buscando la relación de estos y de qué manera se ajusta el modelo a la realidad vehicular de Quito.

ABSTRACT

This work is a research and validation of the traffic noise prediction model called Common Noise Assessment Methods (CNOSSOS) developed in 2012 by the European Union which aims to improve the reliability, consistency and comparability of the evaluation results of the Noise in all EU member states. The research focuses on the validation of the model in the vehicle reality of Quito. Several road traffic noise samples were measured and recorded from which information was obtained on the acoustic descriptors used for environmental impact studies. The measurement points were defined in which the scenarios presented in the prediction model were evidenced, such as traffic flow, slopes, traffic lights, redondeles, etc. This research focuses on the comparison of measured and modeled values looking for the relation of these and how the model is adjusted to the vehicle reality of Quito.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Alcance	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivo general	4
1.5 Objetivos específicos	5
1.6 Hipótesis	5
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Conceptos generales	5
2.1.1 Fuente puntual.....	5
2.1.2 Fuente lineal	6
2.1.3 Receptor	6
2.1.4 Modelo de ruido de tráfico	7
2.1.5 Nivel de potencia sonora	7
2.1.6 Nivel de presión sonora	7
2.1.7 Espectro de los sonidos:	8
2.2 Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-UE).....	10
2.2.1 Desarrollo del CNOSSOS-EU	11
2.2.2 Objetivo del CNOSSOS-EU	11
2.2.3 Fases del CNOSSOS	12
2.2.3.1 Primera fase:	12
2.2.3.2 Segunda fase:	14

2.2.4	Rango de frecuencia en CNOSSOS-UE	16
2.2.5	Indicadores de ruido en CNOSSOS-UE	16
2.2.5.1	Nivel día-tarde-noche (LDEN)	16
2.2.5.2	Nivel sonoro continuo equivalente (Leq).....	17
2.2.6	Nivel de Presión Sonora Ponderado A, B y C	17
2.2.7	Clasificación de vehículos en CNOSSOS-UE	20
2.2.8	Número y posición de fuentes sonoras equivalentes	21
2.2.9	Condiciones de referencia del CNOSSOS-UE	22
2.2.10	Variables de entrada en el modelo CNOSSOS-UE	22
2.2.11	Parámetros para tráfico rodado en CNOSSOS-UE	23
2.3	Descripción de la situación actual en Quito	24
3.	METODOLOGÍA	27
3.1	Levantamiento de información	27
3.2	Selección de Localidades para validación del modelo CNOSSOS-UE	28
3.2.1	Flujo de tráfico	28
3.2.1.1	Flujo continuo fluido:	28
3.2.1.2	Flujo continuo en pulsos:.....	28
3.2.1.3	Flujo acelerado en pulsos:	29
3.2.1.4	Flujo decelerado en pulsos:	29
3.2.1.5	Flujo congestionado:	29
3.2.1.6	Flujo intermitente:.....	29
3.3	Equipo y registro de valores de ruido de tráfico	40
3.4	Diseño de la calculadora del modelo de predicción de ruido tráfico CNOSSOS-UE.....	44
3.4.1	Implementación de los algoritmos propuestos por el modelo CNOSSOS-UE a la calculadora	46

3.4.1.1	Ruido de rodadura.....	49
3.4.1.2	Ruido de propulsión	50
3.4.1.3	Implementación de correcciones del modelo CNOSSOS-UE....	51
3.4.2	Predicción a través de la calculadora	56
4.	RESULTADOS	59
4.1	Presentación de los resultados obtenidos	59
4.1.1	Presentación de los resultados por punto de medición	59
4.2	Comparación de resultados modelados versus medidos	64
4.3	Análisis de los resultados.....	67
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
5.1	Conclusiones.....	79
5.2	Recomendaciones	82
6.	POSIBLES AMPLIACIONES DEL PROYECTO	83
6.1	Campos investigativos impulsados por el proyecto	83
	REFERENCIAS	84
	ANEXOS	87

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Existe una gran cantidad de efectos en la salud tanto fisiológicos, cuanto psicológicos, ocasionados por la exposición prolongada al ruido, problema del cual existe evidencia suficiente para exigir un control más minucioso. Varios estudios demuestran que la contaminación acústica del tráfico rodado se asocia con efectos perjudiciales sobre la salud (Babisch, 2006, van Kempen y Babisch, 2012). Numerosos expertos entre estos: Morley (2015), Steele (2001), Kephelopoulos (2014), catalogan a la molestia generada por el ruido, como una de sus reacciones adversas. La molestia producida por la exposición prolongada al ruido, ha sido definida a nivel internacional como la perturbación del estado de ánimo y el bienestar psicológico y/o fisiológico (ISO/TS 15666:2003). Se define al ruido como aquella señal que genera respuestas y reacciones negativas del individuo que actúa como receptor. La forma en la que es interpretado un sonido para definirlo si es o no un ruido depende del criterio subjetivo de cada persona. Sin embargo, para expertos del campo es fácil determinar que ciertos factores y ciertos tipos de sonidos pueden ser considerados como ruido. Factores como el tráfico ocasionado por el tráfico automotor de las grandes ciudades, industrias y centros de diversión nocturna, entre otros se los puede considerar fuentes de ruido, sin embargo, sigue siendo una perspectiva de cada individuo la que clasifique un sonido.

En el proceso de evaluación de la contaminación acústica existen diversas herramientas, planes o estrategias que forman parte de un proceso de cuantificación y visualización de la contaminación acústica. Para ello se toma en cuenta los 3 elementos principales que intervienen en este problema: la fuente, el receptor y los obstáculos. La evaluación que se lleva a cabo, toma en cuenta los diversos tipos de fuentes que actúan e influyen para que los niveles de ruido se eleven. Teniendo en cuenta este escenario, expertos proponen como uno de los posibles procesos de evaluación, los modelos de predicción de ruido. Estos modelos de predicción son una de las herramientas vitales para la evaluación del ruido. Esta técnica tuvo un impulso después de la Directiva

Europea sobre el Ruido Ambiental 2002/49/CE, establezca que los mapas de ruido son una exigencia para las grandes infraestructuras de transporte dentro y fuera de aglomeraciones urbanas (Directiva de la UE 2002/49 / CE, 2002).

Los modelos de predicción son respuesta al aumento de problemas causados por la exposición al ruido. Estos surgieron a partir del aumento creciente en la cantidad de automóviles después de la segunda Guerra Mundial, y también del interés actual en materia de medio ambiente en general (Steele, 2001).

Steele (2001) hizo una revisión crítica exhaustiva de diversos modelos de ruido de tráfico en la que se muestra las características principales de algunos modelos propuestos a nivel mundial y su eficiencia en términos de los resultados obtenidos. Se concluye que un modelo de predicción es, efectivamente, una herramienta muy útil para la evaluación de la contaminación acústica.

Europa es uno de los continentes que ha sido pionero en tomar medidas para mitigar y controlar la contaminación acústica. Desde junio de 2007, los países de la Unión Europea están obligados a elaborar e implementar mapas estratégicos de ruido para todas las carreteras principales, vías férreas, aeropuertos y aglomeraciones, que deben ser revisados y actualizados cada cinco años (Kephalopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012). La Directiva sobre el ruido ambiental END (2002/49 / CE) exige a los Estados miembros de la UE determinar la exposición al ruido ambiental a través de mapas estratégicos de ruido y elaborar planes de acción con el fin de reducir la contaminación acústica (Kephalopoulos et al., 2014). Debido a los diferentes algoritmos de cálculo establecidos en los modelos predictivos utilizados en varios países de la UE, e.g. CoRTN en Reino Unido, RLS 90 en Alemania, Son Road en Suiza, Nord 2000 en Países Bajos y NMPB-Routes-2008 en Francia (Garg & Maji, 2013), los resultados no son comparables; por lo que ha surgido la necesidad de desarrollar un modelo común para evaluar la exposición al ruido ambiental en toda la UE. Esta estimación debe ser fiable para estimar la exposición al ruido ambiental de los ciudadanos. Por este motivo la realización del marco común para los métodos de evaluación del ruido (CNOSSOS-UE) ha sido

desarrollado por la Comisión Europea en cooperación con sus Estados miembros. CNOSSOS-UE representa un enfoque armonizado y coherente para evaluar los niveles de ruido de las principales fuentes de ruido (tráfico rodado, tráfico ferroviario, las aeronaves e industriales) en toda Europa.

El Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU), desarrollado en 2012 tiene como objetivo mejorar la fiabilidad, la consistencia y la comparabilidad de los resultados de la evaluación del ruido en todos los Estados miembros de la UE.

En base a estas investigaciones que sirven como antecedente se plantea la temática de este trabajo de titulación con el cual se realizará la validación del Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS) para las condiciones vehiculares de la ciudad de Quito.

1.2 Alcance

El alcance de la investigación integra los aspectos siguientes:

Levantamiento de información de sectores estratégicos de la ciudad de Quito con respecto al flujo vehicular, cantidad de automóviles, velocidad media de cada categoría, curvas de nivel, la medición in situ de las zonas definidas estratégicamente, catastro, geometría de la vía y tipo de calzada, para utilizarlos como datos de entrada en el modelo predictivo de ruido de tráfico Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU).

El proyecto de titulación permite evaluar la evolución de la contaminación acústica por ruido de tráfico en diferentes períodos, locaciones y flujos de tráfico dentro de la ciudad de Quito. Verificará qué tan precisos y acertados son los algoritmos propuestos por la Unión Europea para un modelo de predicción de ruido de tráfico aplicado a la realidad de la ciudad de Quito. Además, se implementa una calculadora en la que se hará la validación corresponde del modelo de predicción.

1.3 Justificación

El proyecto de titulación permite validar el método común europeo de valoración de ruido de tráfico en las condiciones de circulación vehicular de la ciudad de Quito, esto con el fin de identificar si los algoritmos planteados por el CNOSSOS-UE y la base de datos en la que se basa este modelo es aplicable a la realidad vehicular de la ciudad de Quito.

Este trabajo de validación de un modelo de predicción de ruido de tráfico forma parte del proceso para la implementación de mapas de ruido o mapas estratégicos, que son la representación más importante del impacto acústico-ambiental de una ciudad o sector específico. En el Ecuador no se han implementado modelos de predicción que abarquen todo el territorio de una ciudad. Se ha realizado estudios por zonas de forma independiente y con diferente metodología, lo que dificulta la comparación de los resultados. Por esta razón, la propuesta de validación del modelo de predicción para ruido de tráfico CNOSSOS, sería uno de los pasos previos al desarrollo de mapas de ruido o mapas estratégicos en la ciudad de Quito.

Todo este proceso de validación planteado en este trabajo de titulación aporta al posible desarrollo e implementación de mapas de ruido que como se mencionó anteriormente son herramientas que actualmente se están aplicando en el escenario internacional además de ser considerado uno de los elementos principales en la gestión del ruido ambiental.

1.4 Objetivo general

Validar el método común Europeo de predicción de ruido de tráfico CNOSSOS-UE en las condiciones de tránsito vehicular de la ciudad de Quito para garantizar la validez, la credibilidad y la fiabilidad del mismo, tomando en cuenta las condiciones de referencia propuestas por el modelo predictivo.

1.5 Objetivos específicos

- Desarrollar una calculadora con los algoritmos proporcionados por el método común europeo de valoración de ruido de tráfico para su validación en la realidad vehicular de la ciudad de Quito.
- Realizar mediciones acústicas para validar los resultados arrojados por el modelo de predicción.
- Levantar información relacionada con el flujo vehicular, cantidad de automóviles, velocidad media de cada categoría, catastro, geometría de la vía y tipo de calzada.
- Realizar un análisis estadístico para comparar las desviaciones existentes entre los valores medidos y los valores modelados.

1.6 Hipótesis

El Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU) es un modelo de predicción de ruido de tráfico cuyos resultados son coherentes con la realidad del ruido que genera el tráfico rodado en la ciudad de Quito.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Conceptos generales

Para la comprensión de este trabajo investigativo, se detalla a continuación una serie de conceptos que son importantes y definir para el correcto entendimiento de esta investigación y sin duda facilitará la interpretación de los resultados obtenidos en esta investigación:

2.1.1 Fuente puntual

Una fuente puntual es la representación de una fuente generadora de sonido ubicada en un punto específico del espacio. La intensidad de la fuente es expresada por el nivel de potencia sonora direccional L_w . Miyara sostiene que “Cuando una fuente esférica es de tamaño despreciable frente a la longitud de onda que está emitiendo, se dice que es una fuente puntual” (Miyara, 1999, p.18). Este tipo de fuente emite energía en todas las direcciones con igual intensidad y su energía se propaga en forma de frentes de onda esférica.

2.1.2 Fuente lineal

Una fuente lineal se caracteriza por una distribución continua de varias fuentes puntuales. “La fuente lineal puede ser aproximada a un conjunto de segmentos de una línea recta” (Kephalopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012, p.21). Este proceso de segmentación consiste, en dividir la fuente lineal en segmentos de línea, los cuales representan fuentes puntuales equivalentes, de la siguiente manera:

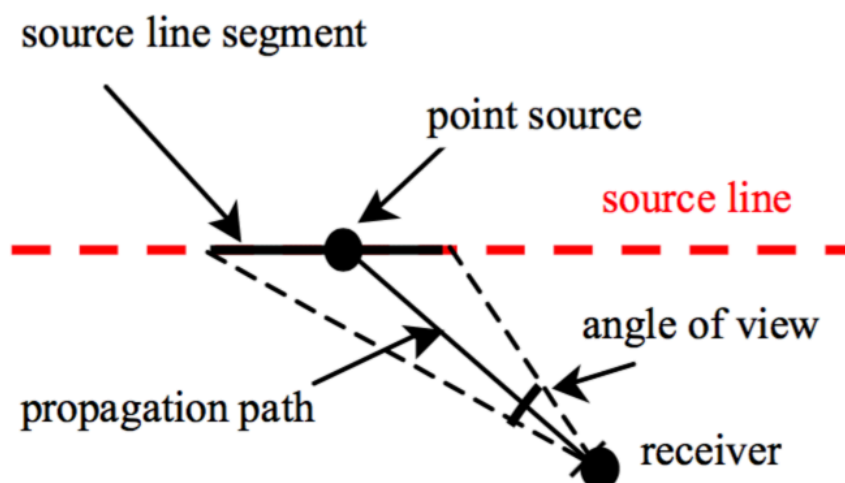


Figura 1. Fuente lineal segmentada.

Tomado de Kephalopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012, p.21.

2.1.3 Receptor

“Un receptor es un punto en el que se calculará el nivel de intensidad de sonido incidente promediado en el tiempo” (Kephalopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012, p.22). Debemos identificar dos tipos de receptores, los cuales enfocaremos su definición en base a un modelo de tráfico. Existen los receptores de campo libre, que son aquellos que perciben la influencia de trayectorias de propagación en todas las direcciones. Y por otro lado tenemos receptores que perciben la energía que, al tener cierta direccionalidad, influye directamente en la fachada de una vivienda.

2.1.4 Modelo de ruido de tráfico

Un modelo de tráfico es una representación y descripción acústica de un flujo de tráfico de un sector o vía en específico. El modelo de ruido de tráfico sirve para la predicción de los niveles de potencia sonora de una fuente direccional, en este caso vehículos móviles. La potencia acústica de la fuente se modela y predice en base a información real de las condiciones vehiculares del lugar de estudio. Se utilizan datos estadísticos reales que se obtienen del estudio, conteo y registro de la realidad vehicular del lugar. Esto permite recrear y predecir posibles escenarios en base a los datos estadísticos. Esto servirá para describir la contaminación que genera el tráfico con un porcentaje alto de fiabilidad.

2.1.5 Nivel de potencia sonora

Es el nivel de potencia sonora direccional emitido por banda de frecuencia. Llamamos potencia sonora a la energía que una fuente sonora es capaz de emitir durante un tiempo determinado. Esta dado por la siguiente ecuación:

$$L_W = 10 * \log \frac{W}{W_{ref}} [dB] \quad (\text{Ecuación 1})$$

En donde:

W : Es la potencia de la fuente sonora emitida en [Watts]

W_{ref} : Es la potencia de referencia igual a 10^{-12} [W]

2.1.6 Nivel de presión sonora

El nivel de presión sonora a entendemos como la relación (logarítmica) entre una presión emitida por una fuente en específico y una presión de referencia. “Debido al rango extraordinariamente amplio de la presión sonora, resulta conveniente utilizar una escala logarítmica para expresar sus valores” (Miyara, 1999, p.24). Este nivel de presión sonora está dado por:

$$NPS = 20 * \log \frac{P_{ef}}{P_{ref}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

En donde:

P_{ef} : Es el valor eficaz de la presión sonora de la fuente.

P_{ref} : Es la presión de referencia que es igual a $2 * 10^{-5}$.

2.1.7 Espectro de los sonidos:

Cada sonido que nuestro oído es capaz de captar tiene como componentes, ciertas frecuencias con características específicas. “Conocemos como espectro de los sonidos la información acerca de qué frecuencias integran un sonido y sus respectivas amplitudes y fases entre otras características” (Miyara, 1999, p.24-25).

“Ciertas situaciones requieren un análisis del contenido de frecuencia de un ruido en lugar del nivel de ruido general. Esto requiere información expresada a través de la gama de frecuencias. Sin embargo, si tratamos de analizar cada frecuencia por separado, esto daría lugar a un enorme volumen de información” (Murphy & King, 2014, p.2.14).

Por lo antes mencionado, se intenta que la información sea más fácil de manejar, la gama de frecuencias completa se divide en bandas de frecuencia separadas. Son divididas por bandas de octava y bandas de tercera octava. Las bandas de octava son utilizadas para agrupar diferentes frecuencias en un “sonido”, esto en busca de que la información de frecuencia pueda analizarse de una manera fácil. En la Tabla 1 vemos el rango específico de frecuencias que abarca cada banda. “Cuando se trata de bandas de octava generalmente identificamos cada uno por la “frecuencia central” (Murphy & King, 2014, p.2.14). Podemos ver en la Figura 2 una representación gráfica de bandas de octava.

Tabla 1.

Rango específico de frecuencias que abarca cada banda

Lower Band Limit [Hz]	Centre Frequency [Hz]	Upper Band Limit [Hz]
44	63	88
88	125	177
177	250	355
355	500	710
710	1000	1420
1420	2000	2840
2840	4000	5680
5680	8000	11,360

Tomado de Murphy & King, 2014, p.16.

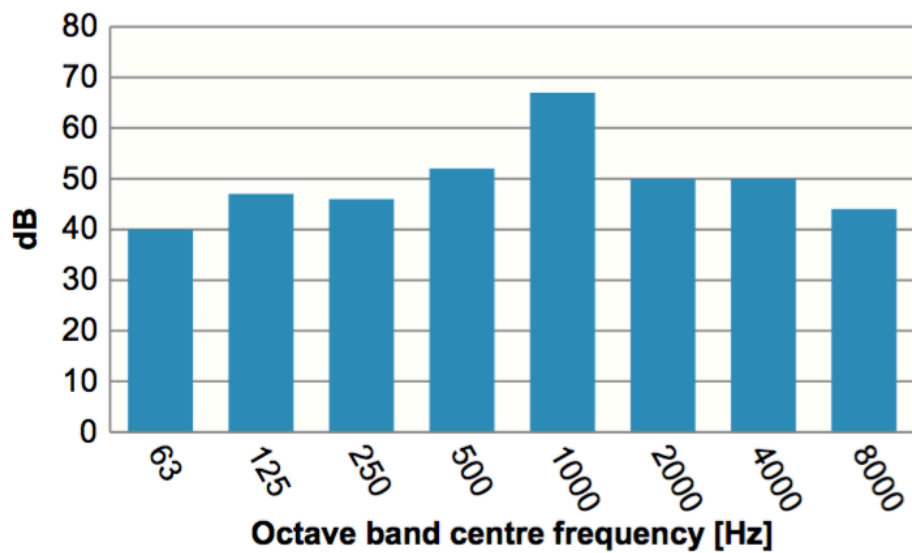


Figura 2. Muestra representada en bandas de octava.

Tomado de Kephelopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012, p. 21.

2.2 Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-UE)

Europa es uno de los continentes que se ha mantenido como pionero en la toma y ejecución de medidas en contra de la contaminación acústica. El modelo predictivo CNOSSOS-UE nace en respuesta a la necesidad de la Unión Europea de desarrollar e implementar un marco armonizado común para la evaluación del ruido. Era necesario tener entre los estados miembros un enfoque común que les permita evaluar los niveles de ruido en su territorio. Esto, con el fin de obtener cifras y valores coherentes y comparables sobre la contaminación acústica que realmente genera el tráfico. “En 2009, la Comisión Europea decidió desarrollar CNOSSOS-EU (Métodos comunes de evaluación del ruido) para la cartografía del ruido del tráfico por carretera, tráfico ferroviario y tráfico aéreo” (Kephalopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012, p.11). Europa tiene en vigencia la Environmental Noise Directive (END) que exige a los países miembros desde el año 2007 la elaboración de mapas de ruido estratégicos para todas las carreteras principales, vías férreas y aeropuertos con una periodicidad quinquenal. “Estos mapas de ruido son utilizados por las autoridades nacionales competentes para determinar las prioridades de la planificación de la acción y por la Comisión Europea para evaluar globalmente la exposición al ruido en toda la UE” (Kephalopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012, p.11). Toda esta información que se logra recolectar por medio de esta directiva sirve en gran medida para el cuidado de las personas en general ya que se informa sobre los niveles de ruido a los que están expuestos y las medidas que están tomando las autoridades competentes para la reducción de la contaminación acústica a un nivel que garantice la salud pública y del medio ambiente. Europa está actualmente diseñando y planificando maneras de combatir la contaminación acústica. Además, la Directiva sobre ruido ambiental (2002/49 / CE) exige a los Estados miembros de la UE que estimen la influencia de la contaminación del ruido ambiental junto a la elaboración de mapas estratégicos de ruido que den como resultado planes de control y mitigación para reducir el grado de contaminación que existe actualmente en los países miembros de la UE.

2.2.1 Desarrollo del CNOSSOS-EU

CNOSSOS-EU fue desarrollado durante el periodo 2009 – 2012 por la Comisión Europea en cooperación entre algunos entes privados y gubernamentales. Entre estos esta la Agencia Europea de Medio Ambiente, la Agencia Europea de Seguridad Aérea, la Organización Mundial de la Salud Europa y expertos que fueron designados por los países miembros. Con una necesidad existente de mejorar la eficacia de la Environmental Noise Directive (END) se planifica el desarrollo de este método común. El proceso para el desarrollo del marco metodológico y principales características del CNOSSOS-EU se realizó en conjunto con las entidades y personas antes mencionadas, lo que garantizó que este método común se ajuste a la mayoría de realidades que describió cada uno de los que conformaban el equipo de trabajo que diseñó este método. Su diseño y planificación se desarrolló de forma informal entre marzo del año 2009 a mayo del 2010. En este periodo se desarrolló la base en la que se trabajaría en los siguientes años en materia de normativas, marco legal y aspectos generales. En su segunda etapa desarrollada entre noviembre de 2010 a marzo de 2012 se revisaron avances técnicos que servirían para definir la metodología que se ajuste a la mayoría de escenarios que se establecieron. En su última fase se integra el Comité Técnico CNOSSOS-UE integrado por expertos en áreas relacionadas designados por los países miembros y se da inicio al plan establecido por este comité para la implementación de un método común.

2.2.2 Objetivo del CNOSSOS-EU

El objetivo principal del CNOSSOS-EU es “Desarrollar un método de evaluación coherente capaz de proporcionar resultados comparables de la cartografía estratégica del ruido realizada por los Estados Miembros para cumplir con sus obligaciones bajo el END” (Kephalopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012, p.29).

El CNOSSOS-EU a su vez tiene objetivos específicos que son el “Poner a disposición de los ciudadanos europeos información fidedigna sobre los niveles de ruido a los que están expuestos y las consecuencias para la salud que ello

conlleva” (Kephalopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012, p.12) y “Elaborar planes de acción apropiados para prevenir y reducir la exposición a niveles nocivos de ruido de manera sostenible y eficiente en cuanto a los recursos” (Kephalopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012, p.12).

2.2.3 Fases del CNOSSOS

El CNOSSOS-EU tiene dos fases que han sido divididos como lo especifica el documento oficial, en grupos de trabajo y divididos en dos fases. Se adjunta Figura 3 para mayor comprensión:



Figura 3. Fases del CNOSSOS-EU

Tomado de Kephalopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012, p. 17.

2.2.3.1 Primera fase:

Dentro de la primera fase se han puesto en marcha 8 de 13 grupos de trabajo los cuales tenían delegado las siguientes responsabilidades:

- **GT 1 sobre "Marco de calidad"**

Definió el objetivo principal y los requisitos de CNOSSOS-UE (Capítulo II).

- **GT 2 sobre "Emisión de fuentes de ruido de tráfico rodado"**

Se encargó de definir la sección de emisión de la fuente de ruido de tráfico de CNOSSOS-UE y sus parámetros asociados, además de establecer una base de datos de valores de entrada para el ruido del tráfico vial (Capítulo III).

- **GT 3 sobre "Emisión de fuentes de ruido de tráfico ferroviario"**

Se encargó de la defunción de la parte de emisión de la fuente de ruido del tráfico ferroviario de CNOSSOS-UE y sus parámetros asociados, además de establecer una base de datos de valores de entrada para el ruido del tráfico ferroviario (Capítulo IV).

- **El GT 4 sobre "Predicción del ruido de las aeronaves"**

Se encargó de describir el apartado de CNOSSOS-UE relacionado con la predicción del ruido de aeronaves (Capítulo VII).

- **GT 5 sobre "Propagación del sonido y emisión de fuentes de ruido industrial"**

Definió las emisiones de la fuente de ruido industrial y las partes de propagación del sonido de CNOSSOS-UE (capítulos V y VI respectivamente).

- **GT 6 sobre "Directrices de buenas prácticas"**

Desarrolló la "Guía para el uso competente de CNOSSOS-UE" (Capítulo IX).

- **GT 9 sobre "Mecanismo revisado de presentación electrónica de datos sobre el ruido" (ENDRM)**

Se encargó de la revisión del Mecanismo Electrónico de Presentación de Datos sobre el Ruido, que fue coordinado por la European Environment Agency (EEA) y representa la interfaz clave entre la evaluación del ruido en toda Europa y el intercambio de resultados mediante un marco metodológico común sobre el ruido (Capítulo X).

- **GT 10 sobre "Asignación de niveles de ruido y población a edificios"**

Es el encargado del desarrollo de la metodología para asignar puntos de recepción a las fachadas de edificios y asignar datos de población a los puntos de recepción en las fachadas de edificios (Capítulo VIII).

2.2.3.2 Segunda fase:

En la segunda fase se pone en funcionamiento cuatro grupos de trabajo extra que su labor va enfocada más a la ejecución, validación e implementación del CNOSSOS-UE. Estos grupos de trabajo tenían delegado las siguientes funciones:

- **GT 7 sobre la "base de datos CNOSSOS-EU"**

Es el encargado de establecer e implementar la base de datos CNOSSOS-UE de datos de entrada para el tráfico rodado, el tráfico ferroviario, el ruido industrial y aeronáutico y desarrollar el procedimiento para la transposición de bases de datos nacionales existentes a la base de datos CNOSSOS-EU.

- **GT 8 sobre el "software de referencia CNOSSOS-UE"**

Se encarga de diseñar y desarrollar el software de referencia CNOSSOS-UE para el tráfico rodado, el tráfico ferroviario, la emisión de fuentes de ruido industrial y los cálculos de propagación punto a punto y para la predicción del ruido de las aeronaves en general.

- **GT 12 sobre "Estudios piloto para la validación CNOSSOS-UE"**

Se encarga de desarrollar e implementar casos de prueba y estudios piloto para diversas configuraciones meteorológicas y de superficie (por ejemplo, condiciones meteorológicas específicas, secciones transversales particulares como valles / colinas, barreras pequeñas, cañones de la calle, difracción lateral alrededor de obstáculos, etc.) con el fin de validar la metodología CNOSSOS-EU.

- **GT 13 sobre "Help desk y formación para los Estados miembros de la UE"**

Se encarga de proporcionar a los Estados miembros de la UE servicios de asistencia y formación sobre el uso competente de la CNOSSOS-UE para la cartografía estratégica del ruido.

Se ha definido un esquema que muestra los diferentes Grupos de Trabajo que se implementaron para el correcto diseño y aplicación del CNOSSOS-EU, se lo muestra a continuación:

PHASE A

CNOSSOS-EU WG/DT 1	"Quality framework"
CNOSSOS-EU WG/DT 2	"Road traffic noise source emission"
CNOSSOS-EU WG/DT 3	"Railway traffic noise source emission"
CNOSSOS-EU WG/DT 4	"Aircraft noise prediction"
CNOSSOS-EU WG/DT 5	"Sound propagation and industrial noise source emission"
CNOSSOS-EU WG/DT 6	"Good practice guidelines"
CNOSSOS-EU WG/DT 9	"Revised Electronic Noise Data Reporting Mechanism"
CNOSSOS-EU WG/DT 10	"Assigning noise levels and population to buildings"

Figura 4. Grupos de trabajo de la Fase A en el desarrollo del CNOSSOS-EU

Tomado de Kephelopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012, p.19.

PHASE B

CNOSSOS-EU WG/DT 6	"Good practice guidelines"
CNOSSOS-EU WG/DT 7	"CNOSSOS-EU database"
CNOSSOS-EU WG/DT 8	"CNOSSOS-EU reference software"
CNOSSOS-EU WG/DT 11	"Burden of disease estimation"
CNOSSOS-EU WG/DT 12	"Pilot studies for CNOSSOS-EU validation"
CNOSSOS-EU WG/DT 13	"Help desk and training for EU MS"

Figura 5. Grupos de trabajo de la Fase B en el desarrollo del CNOSSOS-EU

Tomado de Kephelopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012, p.19.

2.2.4 Rango de frecuencia en CNOSSOS-UE

El rango de frecuencia en el que se maneja el CNOSSOS-UE está definido de 125 Hz a 4KHz para ruido de tráfico, de 125 Hz a 4KHz para ruido ferroviario, de 63 Hz a 4KHz para ruido industrial y de 50Hz a 10KHz para ruido aéreo. Para los resultados que presenta el modelo se maneja el mismo rango de frecuencia con la misma clasificación.

2.2.5 Indicadores de ruido en CNOSSOS-UE

Los indicadores que se utilizan en esta investigación se basan en la DIRECTIVA 2002/49/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO que define la evaluación y gestión sobre ruido ambiental y define aquellos indicadores que se utilizan para un correcto análisis e interpretación sobre el ruido ambiental.

2.2.5.1 Nivel día-tarde-noche (L_{DEN})

Este indicador de ruido quizá es uno de los más representativos en cuanto a estudios de impacto ambiental generado por ruido, el L_{DEN} integra la influencia de los periodos día – tarde – noche. Está definido por:

$$L_{DEN} = 10 * \lg \left[\frac{12}{24} 10^{L_{day}/10} + \frac{4}{24} 10^{(L_{evening}+5)/10} + \frac{8}{24} 10^{(L_{night}+10)/10} \right]$$

(Ecuación 3)

donde:

L_{day} : Es el nivel sonoro promedio a largo plazo ponderado A del día

$L_{evening}$: Es el nivel sonoro promedio a largo plazo ponderado A de la tarde

L_{night} : Es el nivel sonoro promedio a largo plazo ponderado A de la noche

Los horarios que se manejan para cada periodo se clasifican de la siguiente forma. A partir de las 07:00 a 19:00 se considera el periodo del día, de 19:00 a 23:00 se considera el periodo de la tarde, y en el horario definido de 23:00 a 07:00 se lo toma en cuenta como periodo de la noche, todo esto se

especificado en la normativa ISO 1996-2: 2007 que es la norma en la que el CNOSSOS-UE basa varios puntos de su metodología.

2.2.5.2 Nivel sonoro continuo equivalente (L_{eq})

El Nivel sonoro continuo equivalente se lo define como la media energética del nivel de ruido promediado en el intervalo de tiempo que ha sido medido el fenómeno acústico. Se lo expresa mediante la siguiente ecuación:

$$L_{eq} = 10 * \lg \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P_A^2 dt^2}{P_{ref}^2} [dB] \quad (\text{Ecuación 4})$$

donde:

P : Presión sonora instantánea [Pa]

P_{ref} : Presión de referencia que es igual a $2 * 10^{-5}$

T : Tiempo total de la medición

2.2.6 Nivel de Presión Sonora Ponderado A, B y C

Para el análisis e interpretación de datos medidos se necesita tener datos que se ajusten a la realidad auditiva del oído humano, con este fin se crearon las curvas de ponderación que no son más que valores que ajustan los datos que se obtienen en medición, a la respuesta que tiene nuestro oído. Para utilizar determinada curva de ponderación debemos tener en cuenta características de las fuentes que se van a medir y saber el SPL de la fuente.

Utilizar las curvas de ponderación es importante debido a que permiten aproximar lo más cercanamente posible datos medidos a la respuesta natural del oído humano. Para obtener este nivel ponderado A, B o C nacen de un análisis de las denominadas “Curvas Isofónicas”. En 1933, Fletcher y Munson realizaron una investigación psicoacústica basada en la comparación entre dos tonos puros. “Graficando los resultados en función de la frecuencia, obtuvieron para cada intensidad de la referencia una curva o contorno de la sonoridad igual. Las curvas, denominadas contornos de Fletcher-Munson” (Miyara, 1999, p.27-28). La forma de aplicar estas curvas consiste en una corrección que

generalmente se la aplica por tercio de octava. En este proceso se ajusta la curva de ponderación que corresponda al caso estudiado.

“Debe advertirse que estas curvas reflejan en realidad los promedios de un número considerable de personas jóvenes y con el oído en buenas condiciones, pudiendo haber, por consiguiente, variaciones individuales importantes” (Miyara, 1999, p.27-28). La curva de ponderación A corresponde a la inversión de la curva isofónica de 40 fons, la curva de ponderación B corresponde a la inversión de la curva isofónica de 70 fons y la curva de ponderación C corresponde a la inversión de la curva isofónica de 100 fons.

En la Figura 6 se muestra las curvas isofónicas de Fletcher y Munson y en la Figura 7 se muestra las curvas de ponderación o compensación A, B y C.

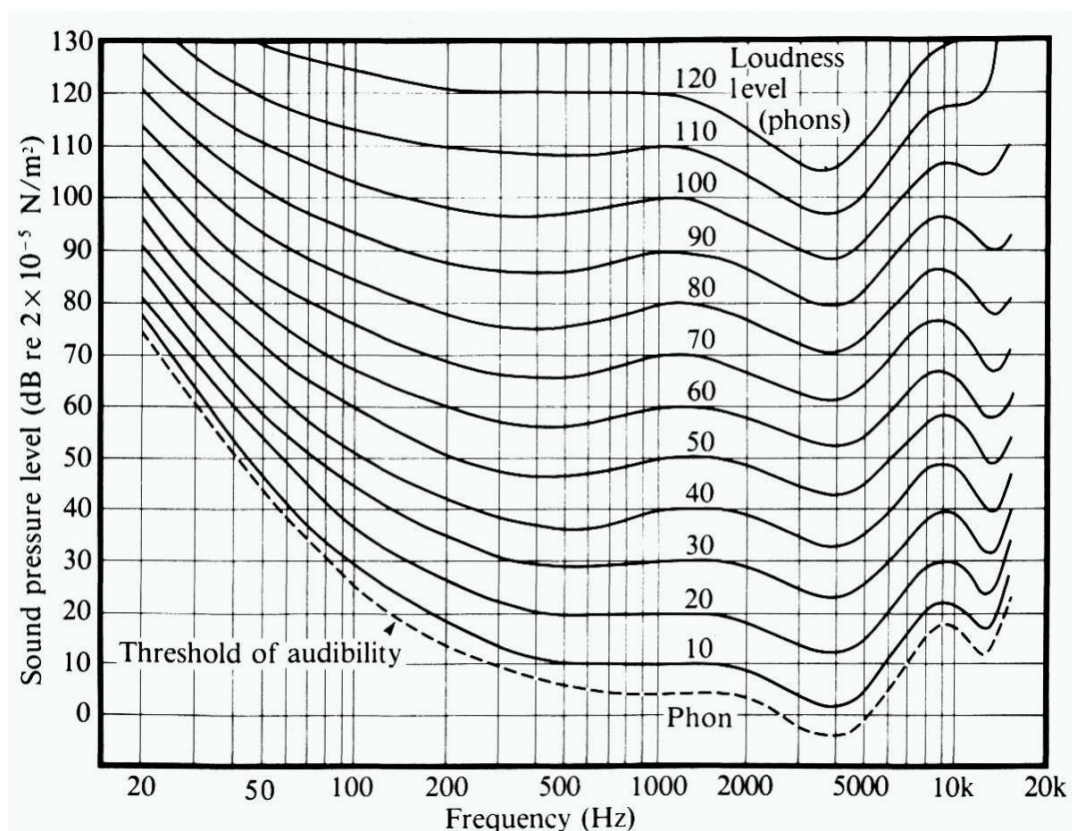


Figura 6. Curvas Isofónicas de Fletcher y Munson

Tomado de Fletcher, H., & Munson, W. A., 1933.

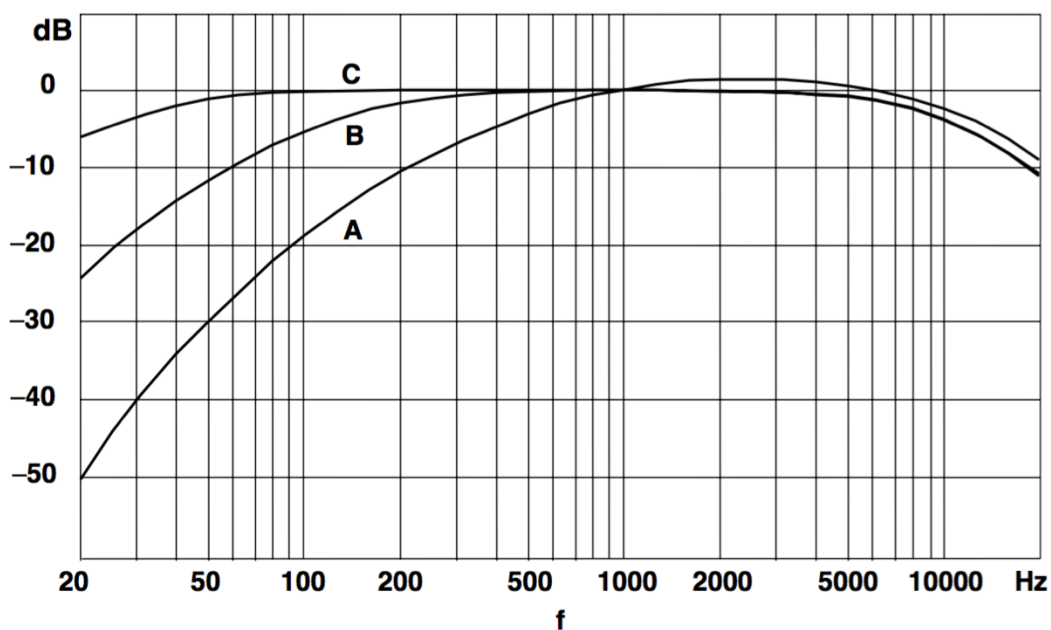


Figura 7. Curvas de ponderación o compensación A, B y C. Para cada una de las frecuencias, la ordenada indica la corrección que se debe aplicar al nivel de presión acústica de un tono de esa frecuencia para obtener su nivel ponderado.

Tomado de Miyara, 1999, p.4-3.

Se toma en cuenta las ponderaciones frecuenciales para esta investigación ya que la influencia de bajas, medias y altas frecuencias en el espectro que maneja el modelo de predicción de ruido de tráfico CNOSSOS-UE, tomar en cuenta estos aportes, dependiendo el tipo de ruido, es de vital importancia para una correcta cuantificación del ruido de tráfico. Se considera la curva de ponderación A para sonidos de nivel bajo (ruidos de fondo), la curva de ponderación B se usa para niveles intermedios, pero con una reducción menor en frecuencias bajas y la curva de ponderación C aporta una ligera atenuación en bajas frecuencias, se la utiliza para evaluación de emisiones de ruido de alto nivel.

2.2.7 Clasificación de vehículos en CNOSSOS-UE

El CNOSSOS-EU separa su modelo de predicción para cada categoría, tráfico rodado, ferroviario, aéreo e industrial. En el Capítulo III se especifica la información, ecuaciones, variables y procedimientos que se manejan en el modelo para ruido de tráfico rodado. La fuente de ruido de tráfico de una carretera se determina combinando la emisión de ruido de cada uno de los vehículos que forman el flujo de tráfico. Para esto tenemos una clasificación de los vehículos que integran el conjunto de fuentes de ruido. Esta clasificación se requiere para separar la contribución que cada tipo de vehículo y saber su aporte al nivel de ruido total.

La clasificación se detalla a continuación en la Tabla 2:

Tabla 2.

Categorías de vehículos del modelo predictivo CNOSSOS-UE

CATEGORIA	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1	Vehículos Livianos	Vehículos de pasajeros, furgonetas de entrega $\leq 3,5$ toneladas, SUV, monovolúmenes, incluidos remolques y caravanas
2	Vehículos medio pesados	Vehículos pesados medios, furgonetas de entrega $> 3,5$ toneladas, autobuses, vehículos de turismo, etc. con dos ejes y montaje de neumáticos gemelos en el eje trasero
3	Vehículos pesados	Vehículos pesados, coches de turismo, autobuses, con tres o más ejes
4	Dos ruedas motorizadas	4a motos, cuadrones o tricimotos $<50\text{cc}$
		4b motos, cuadrones o tricimotos $>50\text{cc}$
5	Categoría abierta	A definir de acuerdo con las necesidades futuras

Tomado de Kephapoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012.

Las situaciones en que puede considerarse pertinente incluir categorías adicionales de vehículos, pueden darse cuando hay una cantidad influyente de vehículos híbridos o eléctricos en el total de vehículos en el modelamiento de

una situación en específico, para esto se tiene la categoría 5 abierta, siempre y cuando exista la necesidad de utilizarla.

2.2.8 Número y posición de fuentes sonoras equivalentes

“Para el cálculo de la propagación del ruido y para la determinación de la emisión de potencia sonora, es necesario describir la fuente con una o varias fuentes puntuales” (Kephalopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012, p.32). En el modelo de predicción CNOSSOS-UE cada una de los vehículos de diferente categoría está representado por una única fuente puntual, la misma que se coloca a 0,05 m por encima de la carretera. Se puede ver de mejor manera en la figura siguiente:

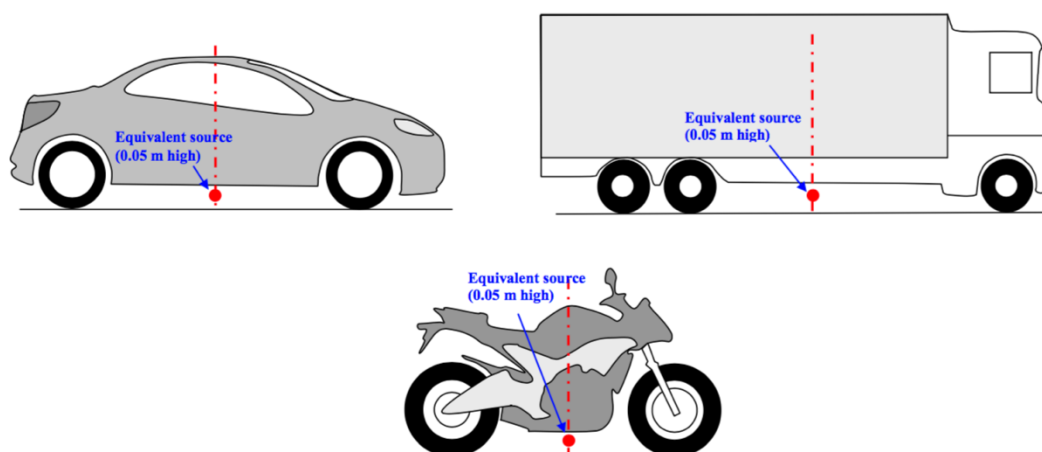


Figura 8. Localización de una fuente puntual equivalente en vehículos ligeros (categoría 1), vehículos pesados (categorías 2 y 3) y vehículos de dos ruedas (categoría 4)

Tomado de Kephalopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012, p.32.

Es importante detallar que el flujo de tráfico está representado por una fuente lineal. Se sabe que la fuente lineal puede ser representada como la unión de varias fuentes puntuales en una línea. En el modelado de una carretera con carriles múltiples, cada carril debe idealmente ser representado por una línea de la fuente colocada en el centro de cada carril. Sin embargo, para mapeo de ruido estratégico es aceptable modelar una línea de fuente en el medio de una carretera de dos vías, o una línea de fuente por calzada en el carril exterior de carreteras de múltiples carriles (Shilton, 2015, p.3).

2.2.9 Condiciones de referencia del CNOSSOS-UE

El marco metodológico del CNOSSOS-UE ha sido desarrollado pensando en ciertas condiciones de referencia. Las ecuaciones y coeficientes se derivan para ser válidos en condiciones de referencia en términos de meteorología y tráfico. A continuación, se nombra las condiciones de referencia que el modelo predictivo maneja para sus cálculos, esto no quiere decir que si existen escenarios diferentes no se puede aplicar, sino al contrario, se lo aplica con ciertas correcciones que el modelo propone para ajustar las condiciones que se tiene. Las condiciones de referencia del CNOSSOS-UE son:

- Velocidad constante del vehículo
- Superficie plana
- Temperatura del aire $\tau_{ref} = 20 \text{ }^\circ \text{C}$
- Superficie de referencia virtual, consistente en un promedio de hormigón asfáltico denso 0/11 y asfalto bituminoso 0/11, entre 2 y 7 años de edad y en condiciones de mantenimiento representativas
- Superficie de carretera seca
- Parque automotor cuyas características correspondan a los valores de la media europea
- Llantas sin labrado excesivo

2.2.10 Variables de entrada en el modelo CNOSSOS-UE

El modelo CNOSSOS-UE tiene ciertas variables de entrada que caracterizan los diferentes escenarios posibles. Estas variables son:

- Promedio de temperatura ($^\circ\text{C}$)
- Pendiente (%)
- Tipo de superficie (tipo de calzada)
- Meses por año donde los autos ocupan neumáticos con labrado especial
- Distancia a un cruce
- Tipo de cruce (redondel o paso peatonal)

En el modelo CNOSSOS se tiene una clasificación para los automotores de 5 categorías. El modelo especifica esta clasificación debido a que cada tipo de vehículo aporta de manera diferente al ruido ambiental y tienen varios factores a considerar en cada una de las categorías, así como variables que solo se definen en base a la categoría de vehículo. Por ejemplo:

- Tipo de flujo vehicular
- Velocidad (km/h)
- Fracción de vehículos con neumáticos de labrado especial

2.2.11 Parámetros para tráfico rodado en CNOSSOS-UE

En el modelo CNOSSOS se tiene algunos parámetros para modelar tomando como referencia la base de datos creada durante en la primera fase del desarrollo del modelo. Algunos de estos parámetros forman parte de los algoritmos que se utilizan para el modelado del ruido de tráfico y toman en cuenta factores que influyen de manera directa al aumento o reducción de la contaminación, por esta razón es muy importante definirlos.

- Velocidad de referencia (70km/h)
- Altura de la fuente
- Temperatura de referencia

Al igual que las variables de entrada, los parámetros que toma en cuenta el modelo varían dependiendo la categoría de los vehículos. Por esta razón el modelo CNOSSOS-UE posee parámetros que para cada categoría tiene diferente influencia, a continuación estos parámetros:

- Ruido de rodadura
- Ruido de propulsión
- Neumáticos con labrado especial (presenta o no presenta)
- Coeficientes *ai* y *bi*. Son definidos si existe presencia de neumáticos con labrado especial.

- Coeficiente $K_{surface}$. Coeficiente genérico que se aplica por octava para calcular el efecto de la temperatura del aire en el comportamiento del ruido de rodadura.
- Cálculo de la corrección por gradiente (por categoría de vehículo)
- Coeficientes de emisión (por categoría de vehículo)
 - Coeficientes $AR_{i,m}$ y $BR_{i,m}$ para ruido de rodadura
 - Coeficientes $AP_{i,m}$ y $BP_{i,m}$ para ruido de propulsión
- Variación de velocidad
 - Coeficientes Or_k y Op_k para corrección de aceleración o desaceleración por categoría de vehículo y por tipo de cruce (redondel o paso peatonal).
- Corrección por tipo de superficie
 - Coeficiente $\alpha_{i,m}$ (corrección espectral) con una velocidad de referencia de 70 km/h para las categorías m (1, 2, 3) y para un espectro de banda i (125 Hz a 4000 Hz).
 - Coeficiente $\beta_{i,m}$. Corrección al efecto de la velocidad en la reducción del ruido de rodadura.

2.3 Descripción de la situación actual en Quito

Actualmente en el estudio del impacto ambiental acústico, el desarrollo de mapas de ruido es uno de los elementos más representativos para el análisis y valoración del impacto existente en una zona geográfica determinada. En el Ecuador, la normativa vigente de ruido ambiental, establece la necesidad de que ciudades con una población mayor a 250 mil habitantes desarrollen mapas de ruido.

Sin embargo, no existe evidencia de su elaboración a gran escala o a través de modelos predictivos, encontrando solo mapas de ruido de zonas reducidas, que han podido ser utilizados como proyectos piloto, o como insumo de investigaciones académicas.

La normativa que especifica actualmente los niveles permisibles dependiendo el tipo de suelo es el Libro VI, Anexo 5 de la norma técnica denominada “Texto

Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio de Ambiente” (TULSMA). La presente norma técnica determina o establece:

- Los niveles máximos de emisión de ruido emitido al medio ambiente por fuentes fijas de ruido (FFR).
- Los niveles máximos de emisión de ruido emitido al medio ambiente por fuentes móviles de ruido (FMR).
- Los métodos y procedimientos destinados a la determinación del cumplimiento de los niveles máximos de emisión de ruido para FFR y FMR.

Sin embargo, la norma no especifica una metodología con la cual proceder al cálculo de los niveles de ruido. En consecuencia no existen un marco común de procedimientos a seguir para la evaluación de la contaminación acústica en Ecuador. Se presenta en Tabla 3 y Tabla 4 los niveles permisibles de la normativa nacional para fuentes fijas de ruido y fuentes móviles de ruido respectivamente:

Tabla 3.

Niveles máximos de emisión de ruido para FFR (Fuente fija de ruido).

NIVELES MÁXIMOS DE EMISIÓN DE RUIDO PARA FFR		
Uso de suelo	LKeq (dB)	
	Periodo Diurno	Periodo Nocturno
	07:01 hasta 21:00 horas	21:01 hasta 07:00 horas
Residencial (R1)	55	45
Equipamiento de Servicios Sociales (EQ1)	55	45
Equipamiento de Servicios Públicos (EQ2)	60	50
Comercial (CM)	60	50
Agrícola Residencial (AR)	65	45
Industrial (ID1/ID2)	65	55
Industrial (ID3/ID4)	70	65
Uso Múltiple	Cuando existan usos de suelo múltiple o combinados se utilizará el LKeq más bajo de cualquiera de los usos de suelo que componen la combinación. Ejemplo: Uso de suelo: Residencial + ID2 LKeq para este caso = Diurno 55 dB y Nocturno 45dB.	
Protección Ecológica (PE) Recursos Naturales (RN)	La determinación del LKeq para estos casos se lo llevara a cabo de acuerdo al procedimiento descrito en el Anexo 4.	

Tomado de TULSMA, 2015, p.62.

Tabla 4.

Niveles máximos de emisión de ruido para vehículos.

CATEGORÍA DE VEHÍCULO	DESCRIPCIÓN	NPS MAXIMO (dBA)
	De hasta 200 c.c	80
Motocicletas	Entre 200 y 500 c.c.	85
	Mayores a 500 c. c.	86
Vehículos	Transporte de personas, nueve asientos, incluido el conductor.	80
	Transporte de personas, nueve asientos, incluido el conductor, y peso no mayor a 3,5 toneladas	81
	Transporte de personas, nueve asientos, incluido el conductor, y peso mayor a 3,5 toneladas.	82
	Transporte de personas, nueve asientos, incluido el conductor, peso mayor a 3,5 toneladas, y potencia de motor mayor a 200 HP.	85
	Peso máximo hasta 3,5 toneladas.	81
Vehículo de Carga:	Peso máximo de 3,5 toneladas hasta 12 toneladas	86
	Peso máximo mayor a 12 toneladas.	88

Tomado de TULSMA, 2015, p.63.

Hoy en día se están desarrollando diferentes investigaciones y trabajos de titulación enfocados en la valoración del ruido de tráfico y sus efectos directos e indirectos en la vida cotidiana de las personas en la ciudad de Quito. Es por esto que se propone la validación del modelo de predicción de ruido de tráfico CNOSSOS, diseñado por la Unión Europea, en zonas específicas en la ciudad de Quito para obtener datos relevantes y una valoración del ruido de tráfico existente en la ciudad, a través del análisis de zonas en específico, como una herramienta adicional al desarrollo de una metodología para elaborar mapas de ruido de las principales ciudades del país.

La validación del modelo propuesto por esta investigación responde a esta necesidad y falta de un marco metodológico común para el análisis, valoración y control de la contaminación acústica en el Ecuador.

3. METODOLOGÍA

3.1 Levantamiento de información

Como primer procedimiento que se llevó a cabo en la investigación fue el análisis a fondo de la realidad vehicular de Quito y de qué forma se ajusta el modelo de predicción de ruido de tráfico CNOSSOS-UE a la misma. Tomando en cuenta las variables y los parámetros que el modelo propone, se definió el enfoque para la selección de localidades para la correspondiente validación del modelo predictivo, esto con el fin de que las selecciones de localidades respondan a todas las variables, parámetros y escenarios propuestos por el modelo.

En el proceso de levantamiento de información se definió dieciséis localidades, tratando de incluir los diferentes tipos de vías, tipos de flujo vehicular, entre otras características propias que el modelo propone. Se seleccionó lugares que describan los diferentes escenarios que plantea al modelo CNOSSOS-UE.

Para poder mejorar la exactitud de la estimación y suplir la escases de información de ciertos lugares y zonas de la ciudad, se decidió realizar el levantamiento de información en forma manual en las dieciséis localidades.

Dentro de la información necesaria se definió los siguientes puntos:

- Numero de autos (por categoría)
- Velocidad (por categoría)
- Temperatura (si existe una variación considerable de 10 °C o más de la temperatura de referencia del CNOSSOS-UE)
- Presencia de redondeles o cruces peatonales
- Condiciones ambientales
- Condiciones de suelo (tipo de calzada y estado de las misma)

3.2 Selección de Localidades para validación del modelo CNOSSOS-UE

Tomando en cuenta la información requerida, las variables de entrada, los escenarios planteados y los parámetros manejados por el modelo CNOSSOS-UE, se definió las localidades para el levantamiento de información. Estas localidades pertenecen al sector norte de la ciudad de Quito.

Se inició la selección en base a lo antes mencionado y buscando cubrir todos los escenarios. Se inició la selección de vías por medio del flujo de tráfico.

3.2.1 Flujo de tráfico

Para la selección de las localidades se tomó en cuenta el tipo de flujo de tráfico que tienen las vías. Para la clasificación de los tipos de flujo vehicular se utilizó los detallados en la Directiva de la Comisión Europea (2003/613/CE). Se debe tener en cuenta que el tipo de flujo de tráfico es un parámetro complementario de la velocidad, tiene en cuenta la aceleración, tipo de labrado de neumáticos, carga del motor y flujo del tráfico en pulsos o continuo. Además se tomó en cuenta dos tipos de flujo vehicular, que es común verlos en la realidad del tráfico de Quito, estos son definidos por Torija (2010, pp. 31-32). Se describe los flujos vehiculares a continuación:

3.2.1.1 Flujo continuo fluido:

Este tipo de flujo mantiene una velocidad constante. Se puede registrar variaciones a lo largo del día, pero no son variaciones bruscas ni con cierto patrón. Este tipo de flujo se lo puede evidenciar en autopistas, vías interurbanas y todas las vías de alta velocidad urbanas, además de vías de entornos urbanos. En este tipo de flujo “los vehículos se desplazan a una velocidad casi constante por el segmento de vía considerado. Se habla de fluido cuando el flujo es estable tanto en el espacio como en el tiempo durante los períodos de menos diez minutos” (Comisión Europea, 2003, p.L212/59).

3.2.1.2 Flujo continuo en pulsos:

Flujo con una cantidad significativa de vehículos en la transición, en este tipo de flujo existen variaciones bruscas del flujo en un periodo de tiempo corto. Esto quiere decir que en cualquier momento existen congestionamientos y

concentración de vehículos en un periodo corto de tiempo. De todas maneras, es posible definir una velocidad media para este tipo de flujos, que es estable y repetitivo durante un periodo de tiempo largo. “Este tipo de flujo se corresponde con las calles de los centros urbanos, las vías importantes que se encuentran se encuentran a la saturación, las vías de conexión o la distribución de intersecciones, estacionamientos, pasos de peatones y accesos a zonas de vivienda” (Comisión Europea, 2003, p.L212/59).

3.2.1.3 Flujo acelerado en pulsos:

Se trata de un flujo de con variaciones considerables. Se entiende que “una proporción significativa de los vehículos está acelerando, lo que implica que la noción de velocidad sólo tiene sentido en puntos discretos, pues no es estable durante el desplazamiento” (Comisión Europea, 2003, p.L212/59). Este tipo de flujo es común en vías de alta velocidad después de una intersección o peaje.

3.2.1.4 Flujo decelerado en pulsos:

Se trata de un flujo contrario al descrito anteriormente. En este flujo una porción considerable de los vehículos está decelerando. “Este tipo de tráfico se observa en general en las grandes intersecciones urbanas, en las salidas de autopistas y vías rápidas, en la aproximación a peajes, etc.” (Comisión Europea, 2003, p.L212/59).

3.2.1.5 Flujo congestionado:

Este flujo vehicular consiste en aquellos escenarios en los que existe una gran cantidad de vehículos circulando a una velocidad muy reducida. Se evidencia lapsos de tiempo donde existe aceleración-deceleración. Este flujo es común cerca de semáforos y otros tipos de señalizaciones, así también cuando la cantidad de vehículos sobrepasa la capacidad establecida para la vía.

3.2.1.6 Flujo intermitente:

Este tipo de flujo vehicular se lo puede ver cuando no hay solapamiento de eventos sonoros, es decir cuando la densidad de circulación es baja y es posible distinguir por separado a cada vehículo.

Con esta clasificación se definió las localidades. Se presenta en la Figura 9 las localidades ubicadas en el mapa del norte de la ciudad de Quito:

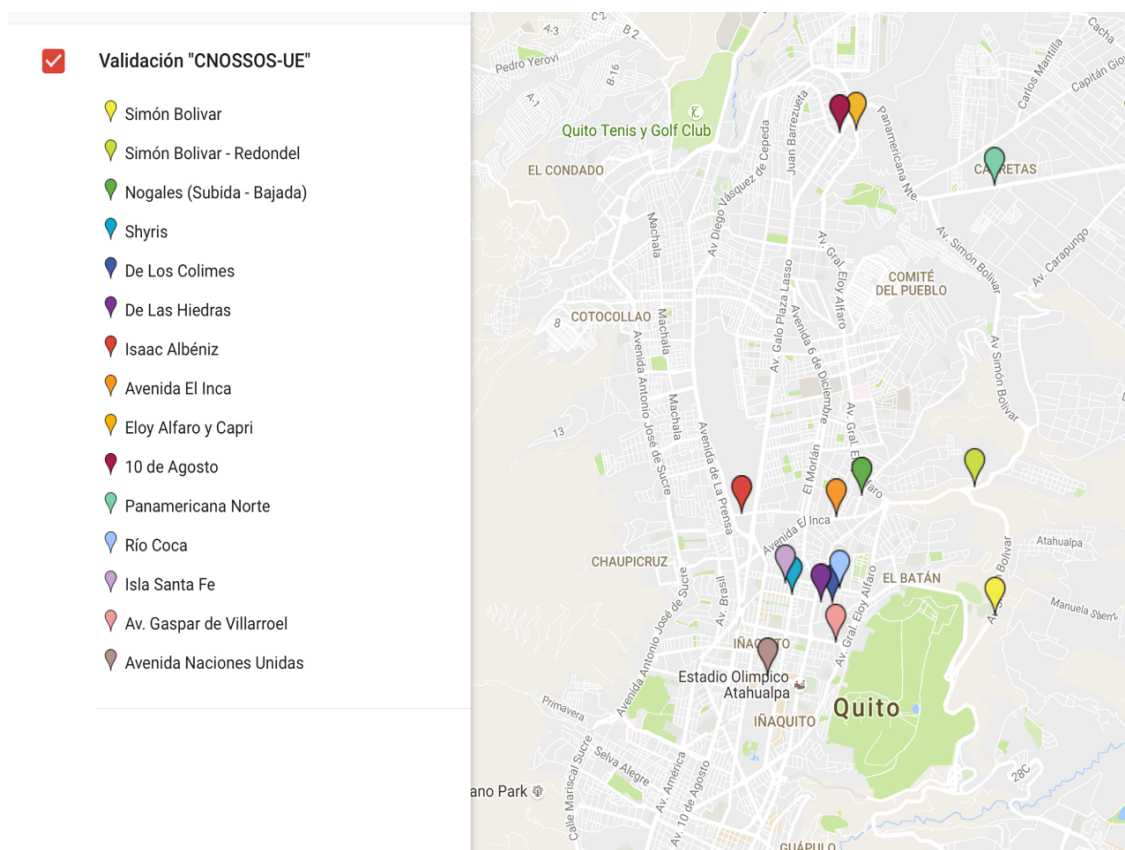


Figura 9. Localidades seleccionadas del Distrito Metropolitano de Quito para el ensayo ubicadas en Google Maps

Para el levantamiento de información de los lugares establecidos anteriormente se diseñó una hoja de campo para el registro la información. Existe la necesidad de recalcar que para que el escenario modelado por medio de CNOSSOS-UE sea lo más cercano a la realidad y no varíe en porcentajes altos, la información recolectada tiene un papel fundamental, que asegurará la veracidad y cercanía de los valores modelados a los medidos (si es el caso). Es por esto que el proceso de recolección de información debe ser lo más completo y detallado posible. Se tomó en cuenta la hoja de campo como herramienta para la organización, manejo y clasificación correcta de la información. El registro de la información se lo hizo de forma manual en las 16 localidades, tomando y siguiendo las medidas de seguridad correspondientes.

La información que se requería documentar se la dividió en cinco puntos importantes:

- Datos generales del lugar e información del ensayo a realizarse
- Descripción de los técnicos que realizan el ensayo
- Información acerca del equipamiento utilizado
- Condiciones ambientales, de suelo y del escenario en general
- Información requerida por el modelo de predicción de ruido de tráfico CNOSSOS-UE (Numero de autos por categoría, velocidad de cada categoría)

Los procesos de recolección de información sobre las localidades se los realizó a través de una inspección visual de las mismas. La investigación se limitó a seguir un cronograma detallado para poder cumplir con los plazos de desarrollo de la misma. Se estableció una fecha y horario específico para cada localidad tomando en cuenta que la influencia de cada categoría varía en función del horario en el que se registre la información. Con este criterio se trató de cubrir el rango horario que se especifica en la normativa ISO 1996-2: 2007.

En la Figura 10 se presenta la hoja de campo utilizada para el registro y levantamiento de información en las dieciséis localidades definidas:



Edison Pacheco
TRABAJO DE TITULACIÓN

DATOS GENERALES		
TITULAR:		
TIPO DE ACTIVIDAD:		
NOMBRE ACTIVIDAD:		
DIRECCION:		
AREA DE SENSIBILIDAD:		
ENSAYO A REALIZAR:		
FECHA DEL ENSAYO:	HORA DE INICIO:	HORA FIN:

Técnicos que realizan el ensayo:			
1.-			
2.-			
Equipo para la medición:			
Nombre	Marca y Modelo	Número de Serie	Estado
Sonómetro	NTI – XL2	-	Bueno
Trípode	-	-	Bueno
Micrófono	NTI – 2371	-	Bueno

Verificación de Calibración:			
Equipo	Operación	Nivel de Referencia	Nivel del equipo
NTI Sonómetro	Calibración	94 dB	93.9 dB

Condiciones Ambientales	
Condiciones Ambientales	Condiciones suelo
Observaciones:	Observaciones:

CANTIDAD Y VELOVIDAD DE AUTOS	
CATEGORIA 1 (livianos):	CATEGORIA 3 (pesados):
CATEGORIA 2 (semipesados):	CATEGORIA 4 (motos):
	<50cc
	>50cc

Figura 10. Hoja de campo para levantamiento de información

Elaboración: Edison Pacheco

Para el registro de los datos requeridos sobre la calzada es indispensable la inspección visual de las vías, esto con el objetivo de constatar la realidad de las condiciones en las que se encuentran las vías seleccionadas. Se realizó la inspección visual de cada vía registrando las condiciones del lugar y condiciones de la calzada de la vía. El registro de información acerca de la materia prima de la carretera, se basó en la clasificación del modelo CNOSSOS-UE donde especifica los tipos de material utilizado por los estados miembros de la Unión Europea.

Los materiales de calzada que propone CNOSSOS-UE, tienen cierta relación a las características de los materiales utilizados en la construcción de las vías y carreteras en la ciudad de Quito, sin embargo, los estados de estas no pueden ser consideradas “óptimas” por su desgaste y condiciones actuales. Esto dificulta de cierta manera el correcto modelado del ruido y contaminación acústica generada por la vía, ya que las condiciones de estas varían.

Se utilizó como una variable importante al momento de definir las localidades los materiales que CNOSSOS-UE propone. Se toma en cuenta este punto ya que características del patio automotor de la ciudad de Quito como modelos, tipos y antigüedad cambian de forma considerable a los establecidos por el modelo.

Los materiales que el modelo CNOSSOS-UE especifica en su documento son los siguientes:

- Concreto transversalmente cepillado
- Hormigón con revestimiento superficial 2/4
- Hormigón lavado
- Asfalto poroso 6/16
- Doble capa de asfalto poroso 4/8 - 11/16
- Mezcla bituminosa de Stone Mastic Asphalt 0/6
- Tratamiento superficial 4/8

Para el registro de las condiciones y materiales de calzada, se realizó una inspección física y documentación fotográfica de cada vía. Se documentó

aspectos generales en la hoja de campo y se registró aquellos factores que podrían interferir con la etapa de medición. Se adjunta Figura 11 para mejor comprensión del procedimiento llevado a cabo para registro de información sobre la superficie de la vía.

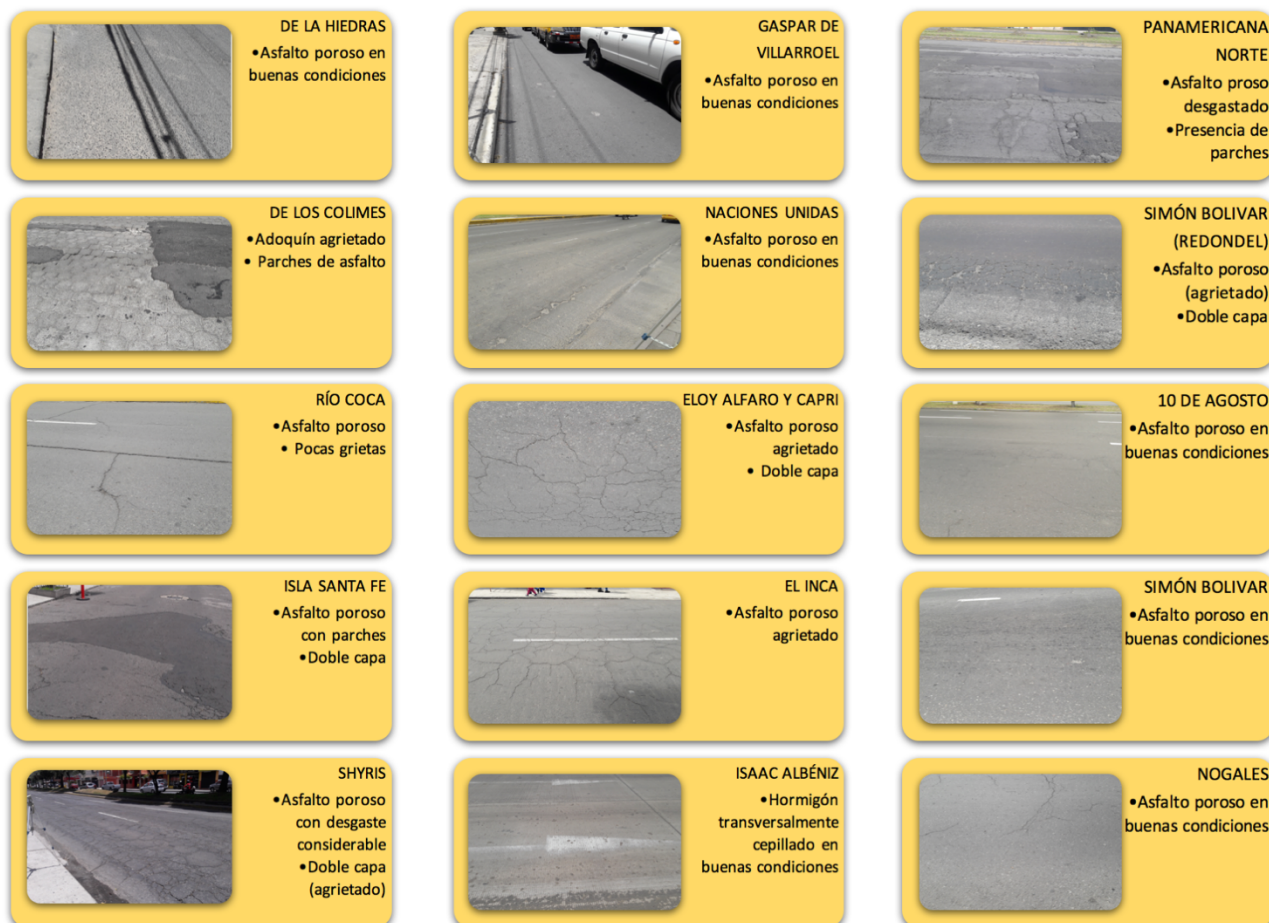


Figura 11. Detalle de los materiales de calzada de las localidades establecidas para el estudio

Elaboración: Edison Pacheco

El proceso de recolección de información tiene una importancia crucial en el proceso de validación de un modelo de predicción, debido a que los modelos predictivos, como se mencionó anteriormente, funcionan en base a información real y estadística del lugar de estudio. Esto implica que el éxito del modelo dependerá de la calidad y fidelidad de los datos registrados.

En el proceso de registro y levantamiento de información se manejó datos relacionados a los siguientes factores:

- **Pendiente en la vía (%)**

Para el registro de la pendiente de la vía se utilizó el dispositivo GLM80 marca BOSH, como se indica en la Figura 10. Este dispositivo tiene la función de inclinómetro la cual fue utilizada para el fin descrito.



Figura 12. Dispositivo GLM80 BOSCH

Tomado de <http://www.bosch-pt.com/productspecials/professional/glm80/es/es/>

Con este dispositivo se registró la pendiente que presentaban ciertas vías, arrojando el resultado en grados. El procedimiento llevado a cabo para medir la pendiente de una vía, consistió en medir 3 puntos en la vía, para posteriormente promediar los 3 registros obtenidos. El tiempo de cálculo del dispositivo es muy reducido por lo que no hubo ningún tipo de riesgo al momento de medir la pendiente. Se adjunta Figura 12 y Figura 13 para entender de mejor manera el procedimiento llevado a cabo:

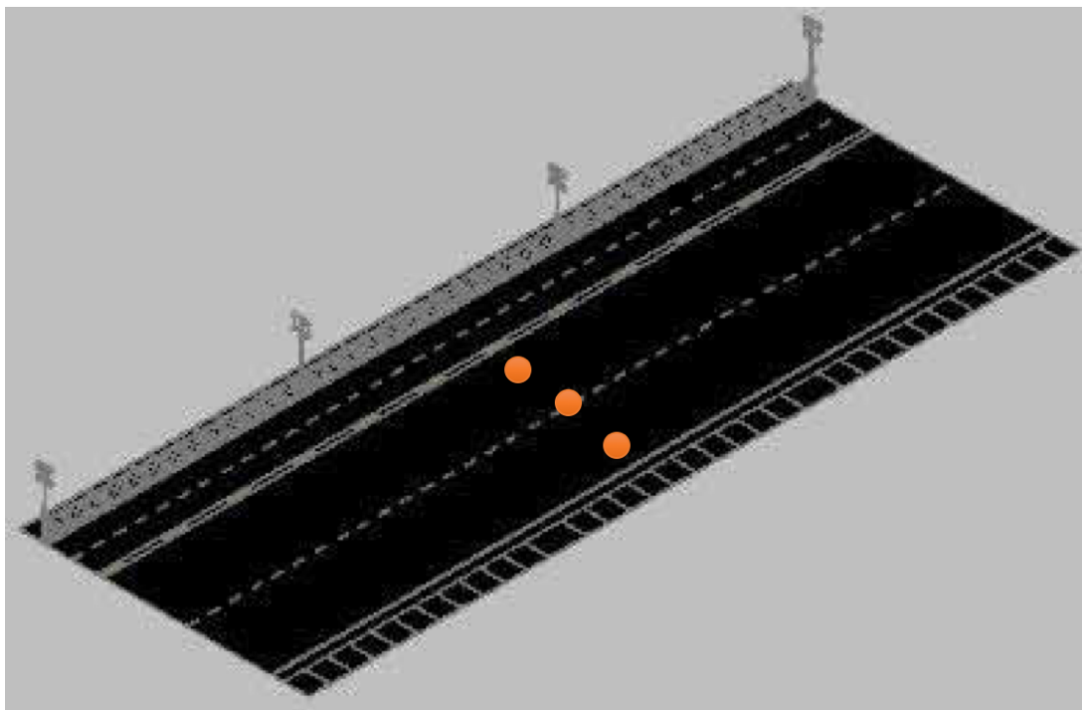


Figura 13. Puntos de registro manual de la pendiente de la vía

Tomado

http://img08.bibliocad.com/biblioteca/image/00030000/8000/ciclovia_38310.jpg

de



Figura 14. Registro manual de pendiente con el equipo GLM80 BOSH.

- **Número y velocidad media de automóviles por categoría**

Para el conteo de automóviles en primera instancia se pensó en utilizar una base de datos existente. Esta base de datos ha sido creada por la Secretaria de Movilidad de la ciudad de Quito. Lamentablemente los datos que se registran en estos informes están incompletos y no se ajustan a las condiciones de referencia del modelo predictivo CNOSSOS-UE, por este motivo se procedió al conteo y al cálculo de la velocidad de las diferentes categorías de forma manual.

Para el conteo del número de autos se estableció un periodo de tiempo de 20 minutos. Se tomó esta decisión pensando en el procedimiento de registro de los niveles de ruido en las localidades, ya que un tiempo estimado de 20 minutos asegura una estabilización del nivel y una correcta integración de los niveles por parte del equipamiento utilizado.

Definido una vez el tiempo en el cual se va a realizar el conteo, se procedió a registrar la cantidad de autos por cada una de las categorías utilizando un contador manual, que se lo muestra en la Figura 15:



Figura 15. Contador manual para el registro de cantidad de automóviles.

A la par del registro del número de automóviles, se realizó el registro de la velocidad media de recorrido por categoría. Para esto con la ayuda de un cronómetro se calculó el tiempo transcurrido de un punto establecido a otro. Se realizó este procedimiento con al menos 6 vehículos por cada categoría. Con los registros de tiempo y distancia recorrida se procedió a calcular la velocidad en km/h, como lo establece el modelo. De esta forma se culminó con la recopilación de información necesaria para poder proceder con la fase de proyección propuesta por el modelo CNOSSOS-UE.

Se adjunta Tabla 5 y Tabla 6 con los resultados obtenidos en la recolección de información de las localidades seleccionadas:

Tabla 5.

Información levantada de las dieciséis localidades.

HORA	LUGAR (VÍA)	TIPO DE VÍA	OBSERVACIONES	INCLINACIÓN
09:00 - 10:00	DE LAS HIEDRAS	LOCAL	ASFALTO, POCO TRANSITO	NO PRESENTA
10:00 - 11:00	DE LOS COLIMES	LOCAL	ADOQUÍN, TRANSITO FLUIDO	NO PRESENTA
12:00 - 13:00	RÍO COCA	COLECTORA PRINCIPAL	PENDIENTE, SEMÁFORO, ASFALTO	2,2
13:00 - 14:00	ISLA SANTA FE	LOCAL	POCO TRANSITO, ASFALTO DOS CAPAS	NO PRESENTA
14:00 - 15:00	AV. SHYRIS	ARTERIAL	ASFALTO POROSO, CONTINUO	NO PRESENTA
09:00 - 10:00	GASPAR DE VILLARROEL	COLECTORA PRINCIPAL	ASFALTO POROSO, PENDIENTE, CONGESTIONADO	6,5
11:00 - 12:00	NACIONES UNIDAS	COLECTORA PRINCIPAL	ASFALTO POROSO	NO PRESENTA
13:00 - 14:00	ELOY ALFARO Y CAPRI	ARTERIAL	DOBLE CAPA ASFALTO	3,8
14:00 - 15:00	EL INCA	COLECTORA PRINCIPAL	ASFALTO POROSO, CONGESTIONADO	NO PRESENTA
11:00 - 12:00	ISAAC ALBÉNIZ	COLECTORA SECUNDARIA	HORMIGÓN TRANSVERSALMENTE CEPILLADO	NO PRESENTA
16:00 - 17:00	PANAMERICANA NORTE	EXPRESA	ASFALTO POROSO, TRANSPORTE PESADO	NO PRESENTA
12:00 - 13:00	SIMÓN BOLIVAR (REDONDEL)	EXPRESA	DOBLE CAPA ASFALTO POROSO, CONGESTIONADO, REDONDEL	NO PRESENTA
12:00 13:00	10 DE AGOSTO	ARTERIAL	ASFALTO POROSO, PENDIENTE	4,2
10:00 - 11:00	SIMÓN BOLIVAR	EXPRESA	ASFALTO POROSO, CONTINUO, PENDIENTE	4,1
17:00 - 18:00	NOGALES (BAJADA)	LOCAL	ASFALTO POROSO, PENDIENTE (BAJADA)	6,3
18:00 - 19:00	NOGALES (SUBIDA)	LOCAL	ASFALTO POROSO, PENDIENTE (SUBIDA)	6,3

Tabla 6.

Cantidad de vehículos y velocidad promedio de cada categoría en las localidades escogidas.

LUGAR (VÍA)	TIPO DE FLUJO	# LIVIANOS	VELOCIDAD	# SEMI PESADOS	VELOCIDAD	# PESADOS	VELOCIDAD	# MOTOS <50	VELOCIDAD	# MOTOS >50	VELOCIDAD
DE LAS HIEDRAS	FLUJO INTERMITENTE	60	50,0	5	40,0	1	40,0	4	50,0	3	55,0
DE LOS COLIMES	FLUJO INTERMITENTE	145	60,0	2	50,0	2	50,0	5	60,0	2	60,0
RÍO COCA	FLUJO CONTINUO EN PULSOS	150	60,0	3	50,0	4	50,0	5	60,0	4	60,0
ISLA SANTA FE	FLUJO INTERMITENTE	33	44,6	2	25,5	0	23,5	5	40,4	4	54,6
AV. SHYRIS	FLUJO CONTINUO EN PULSOS	424	50,3	20	52,4	31	32,8	13	62,5	12	82,4
GASPAR DE VILLARROEL	FLUJO CONGESTIONADO	205	25,6	8	17,1	1	11,7	5	28,5	16	36,6
NACIONES UNIDAS	FLUJO CONGESTIONADO	586	51,7	18	43,1	17	43,9	11	59,9	33	65,9
ELOY ALFARO Y CAPRI	FLUJO ACELERADO EN PULSOS	187	64,0	16	44,3	18	38,4	2	64,0	8	72,0
EL INCA	FLUJO CONGESTIONADO	299	19,6	16	19,6	20	18,8	4	32,1	18	40,2
ISAAC ALBÉNIZ	FLUJO CONTINUO EN PULSOS	244	47,5	6	42,7	2	33,7	1	61,0	17	75,4
PANAMERICANA NORTE	FLUJO CONTINUO FLUIDO	502	49,9	69	39,6	34	36,2	3	51,3	20	57,7
SIMÓN BOLIVAR (REDONDEL)	FLUJO DECELERADO EN PULSOS	467	50,7	83	46,1	40	39,0	1	63,4	7	72,4
10 DE AGOSTO	FLUJO ACELERADO EN PULSOS	351	48,6	20	35,6	24	35,9	2	51,9	20	54,3
SIMÓN BOLIVAR	FLUJO CONTINUO FLUIDO	397	83,2	63	52,0	34	46,2	3	69,4	5	104,0
NOGALES (BAJADA)	FLUJO DECELERADO EN PULSOS	154	33,5	8	27,4	9	26,0	1	45,7	8	50,3
NOGALES (SUBIDA)	FLUJO ACELERADO EN PULSOS	130	28,7	6	22,3	8	19,7	3	43,1	10	45,7

3.3 Equipo y registro de valores de ruido de tráfico

Para el registro de los niveles de ruido de tráfico se utilizó el sonómetro clase 1 marca NTi modelo XL2, del cual se adjunta su fotografía en la Figura 16. En cuanto al procedimiento para el proceso de medición de niveles de ruido, se siguió los lineamientos y directrices establecidas en la normativa ISO 1996-2:2007.



Figura 16. Sonómetro clase 1 marca NTi modelo XL2.

Como establece la normativa antes del proceso de medición se procedió a la verificación de la calibración del sonómetro. El procedimiento detallado en la normativa consiste en verificar antes y después de cada serie de mediciones. Este procedimiento consiste en aplicar al micrófono un calibrador acústico de clase 1 para comprobar que el nivel obtenido no varíe excesivamente de 94 dB.

Durante el desarrollo de esta investigación se realizó la verificación del equipo los días programados para el registro de los valores de nivel de ruido, en su inicio y finalización, como especifica la norma. En la Figura 17 se puede ver los niveles obtenidos en uno de los procesos de verificación realizados.

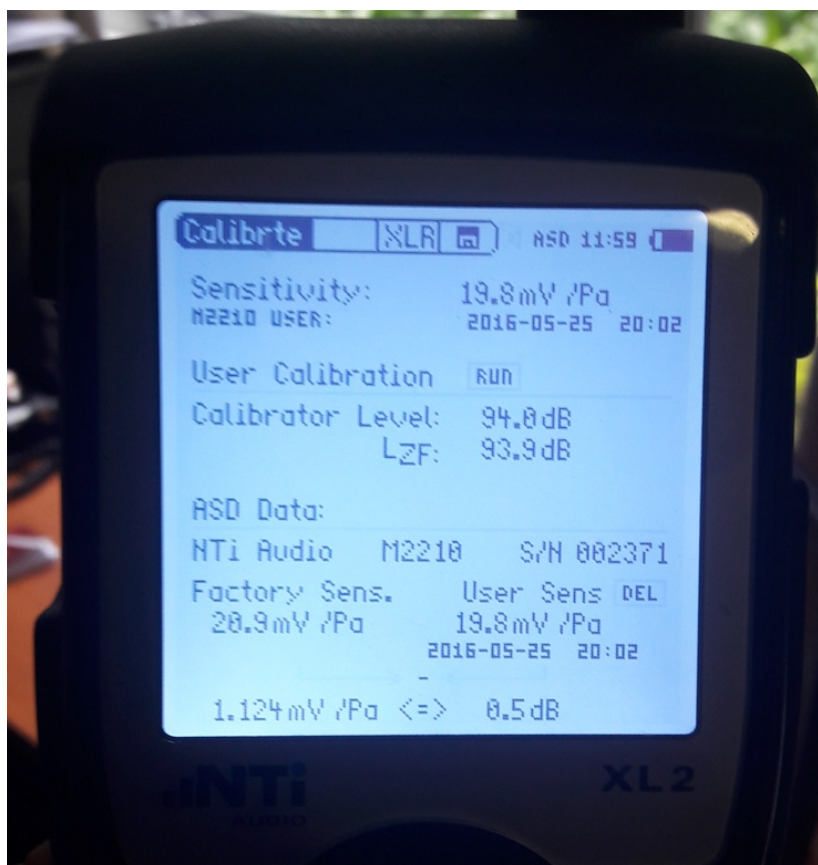


Figura 17. Verificación de calibración del sonómetro marca NTi modelo XL2.

Para definir el tiempo de medición se tomó en cuenta los lineamientos de la normativa en donde se especifica la necesidad de medir durante al menos 10 minutos para promediar las variaciones inducidas por el clima en la vía de propagación. Por lo tanto, como se especificó anteriormente, se definió el tiempo de 20 minutos por localidad para el registro de valores de ruido de tráfico.

Para iniciar el procedimiento de medición de niveles de ruido se estableció la altura del sonómetro, como lo especifica la normativa, en una altura aproximada de $(1,5 \pm 0,1)$ metros y una distancia de 1 metro al borde de la acera. Se configuró el sonómetro con una ponderación temporal *Slow*, y se

utilizó la ponderación frecuencial A con un filtro de 1/3 de octava, además de incluir algunos de los descriptores acústicos comunes en el informe. Se adjunta Figura 18 como respaldo del procedimiento realizado en todas las localidades:



Figura 18. Ubicación del sonómetro NTi durante un registro de ruido vehicular.

Para culminar la etapa de mediciones del ruido se organizó los datos y registros obtenidos en una matriz para manejar la información de forma ordenada para la posterior etapa de predicción con el modelo de ruido de tráfico CNOSSOS-UE.

La creación de la matriz se lo hizo en el software Microsoft Office Excel. Se adjunta a continuación la Tabla 7 con los valores registrados en fase de mediciones:

Tabla 7.

Niveles y descriptores acústicos registrados en la etapa de medición en las diferentes localidades.

LUGAR (VÍA)	LAeq (dB)	LCeq (dB)	LASmin (dB)	LASmax (dB)	LAeq (dB)	LAF10% (dB)	LAF90% (dB)
DE LAS HIEDRAS	64,6	80,2	47,9	80,0	69,0	68,4	51,0
DE LOS COLIMES	66,6	77,0	48,5	80,0	70,1	70,4	53,8
RÍO COCA	68,2	81,4	54,6	83,5	71,8	70,8	58,9
ISLA SANTA FE	65,1	73,8	45,6	88,1	70,2	63,2	49,9
AV. SHYRIS	72,4	83,7	50,5	89,7	76,4	75,5	59,3
GASPAR DE VILLARROEL	72,2	83,5	57,5	91,4	77,2	74,3	61,9
NACIONES UNIDAS	71,6	83,2	59,6	87,8	76,1	73,7	62,2
ELOY ALFARO Y CAPRI	71,7	82,5	54,3	86,0	75,2	75,2	59,7
EL INCA	74,8	84,2	60,7	94,4	78,4	76,0	63,6
ISAAC ALBÉNIZ	71,2	81,3	57,3	94,8	74,9	71,9	62,3
PANAMERICANA NORTE	75,2	86,1	56,2	91,0	78,7	78,1	61,6
SIMÓN BOLIVAR (REDONDEL)	73,9	86,9	59,7	90,8	78,9	76,8	65,2
10 DE AGOSTO	73,2	81,7	51,7	90,1	76,3	76,1	61,4
SIMÓN BOLIVAR	79,8	87,2	64,6	98,6	83,4	80,8	69,9
NOGALES (BAJADA)	69,5	80,0	51,0	86,7	74,4	72,0	58,4
NOGALES (SUBIDA)	72,6	83,1	50,8	90,1	76,3	74,4	58,3

3.4 Diseño de la calculadora del modelo de predicción de ruido tráfico CNOSSOS-UE

Para la fase de diseño e implementación de la calculadora, que se encarga de modelar los niveles de contaminación acústica, se siguió los lineamientos y procedimientos que especifica el documento oficial del modelo CNOSSOS-UE. Se empezó este proceso con la selección de la plataforma para el diseño de la interfaz y la implementación de los algoritmos que propone el modelo. Se decidió utilizar Microsoft Office Excel por ser un software común y de fácil acceso. Una vez definida la plataforma en la que se implementaría la calculadora se inició con el diseño de la interfaz.

Se pensó en el diseño de la calculadora con el objetivo de evidenciar el aporte de cada uno de los parámetros y variables que toma en cuenta el modelo de predicción CNOSSOS-UE. Para esto se separó el ruido de propulsión y el ruido de rodadura en diferentes espacios para poder visualizar como aporta cada uno de estos tipos de ruido al valor de ruido total.

Se diseñó la calculadora para dar facilidad al usuario de seleccionar cada una de las correcciones que propone el modelo, separándolas en aquellas que influyen en el ruido de propulsión y las que influyen en el ruido de rodadura, siempre y cuando en el escenario modelado existan estos factores y variables que definen si existe o no corrección.

La parte principal de la calculadora, es el espacio donde se definen las variables de entrada. En la Figura 19 se puede ver de qué forma se organizó la sección de datos de entrada de la calculadora.

Con este criterio de diseño se definió los siguientes datos de entrada para la calculadora:

- Número de vehículos (por categoría)
- Velocidad (por categoría)

DATOS DE ENTRADA				
Categoría:	Categoría en EC:	Nombre	Valor	
Categoría 1	M1 Y N1	Número de vehículos livianos	1	
		Vm (M1, N1)	1 km/h	
Categoría 2	M2, N2, M3, N3	Número de vehículos medio pesados	1	
		Vm (M2, N2)	1 km/h	
Categoría 3	M2, N2 con trailer. M3, N3	Número de vehículos pesados	1	
		Vm (M3, N3 con trailer)	1 km/h	
Categoría 4	L1, L2, L6 L3, L4, L5, L7	Número de vehículos de dos ruedas	4a < 50cc	1
			Vm 4a	1 km/h
			4b > 50cc	1
			Vm 4b	1 km/h
Velocidad de referencia			70 km/h	

Figura 19. Interfaz para el ingreso de datos en la calculadora de CNOSSOS-UE.

El espacio definido para visualizar los cálculos se lo diseñó como se muestra en la Figura 20.

Index (i) Banda de frecuencia	1	2	3	4	5	6	7	8
Frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
LWR - M1	24,5	9,1	12,7	42,8	37,3	25,3	12,1	0,5
LWR - M2	28,6	22,6	31,3	52,8	41,9	24,1	13,1	6,5
LWR - M3	31,6	29,9	36,3	53,8	42,1	25,8	15,9	7,6
LWR - M4a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
LWR - M4b	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

<input type="checkbox"/> CALZADA Transversely brushed concrete								
LWR - M1	24,5	9,1	12,7	42,8	37,3	25,3	12,1	0,5
LWR - M2	28,6	22,6	31,3	52,8	41,9	24,1	13,1	6,5
LWR - M3	31,6	29,9	36,3	53,8	42,1	25,8	15,9	7,6
LWR - M4a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
LWR - M4b	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

<input type="checkbox"/> STUDDED TYRES								
LWR - M1	24,5	9,1	12,7	42,8	37,3	25,3	12,1	0,5
LWR - M2	28,6	22,6	31,3	52,8	41,9	24,1	13,1	6,5
LWR - M3	31,6	29,9	36,3	53,8	42,1	25,8	15,9	7,6
LWR - M4a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
LWR - M4b	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

<input type="checkbox"/> CROSSING WITH TRAFFIC LIGHTS OR A ROUNDABOUT								
Distancia	20 No mayor a 100 m							
Crossing								
LWR - M1	24,5	9,1	12,7	42,8	37,3	25,3	12,1	0,5
LWR - M2	28,6	22,6	31,3	52,8	41,9	24,1	13,1	6,5
LWR - M3	31,6	29,9	36,3	53,8	42,1	25,8	15,9	7,6
LWR - M4a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
LWR - M4b	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

<input type="checkbox"/> TEMPERATURE								
Temperatura medida	18							

Index (i) Banda de frecuencia	1	2	3	4	5	6	7	8
Frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
LWP - M1	95,8	82,1	80,4	78,0	76,3	79,0	75,4	68,2
LWP - M2	102,9	91,9	92,5	90,4	92,2	88,8	82,4	76,3
LWP - M3	104,4	97,6	97,2	96,1	95,2	91,0	86,4	80,4
LWP - M4a	83,9	80,2	79,8	82,3	81,1	80,2	73,9	68,4
LWP - M4b	91,8	91,4	81,0	81,5	83,4	80,8	79,2	74,7

<input type="checkbox"/> CALZADA								
LWP - M1	95,8	82,1	80,4	78,0	76,3	79,0	75,4	68,2
LWP - M2	102,9	91,9	92,5	90,4	92,2	88,8	82,4	76,3
LWP - M3	104,4	97,6	97,2	96,1	95,2	91,0	86,4	80,4
LWP - M4a	83,9	80,2	79,8	82,3	81,1	80,2	73,9	68,4
LWP - M4b	91,8	91,4	81,0	81,5	83,4	80,8	79,2	74,7

<input type="checkbox"/> CROSSING WITH TRAFFIC LIGHTS OR A ROUNDABOUT								
LWP - M1	95,8	82,1	80,4	78,0	76,3	79,0	75,4	68,2
LWP - M2	102,9	91,9	92,5	90,4	92,2	88,8	82,4	76,3
LWP - M3	104,4	97,6	97,2	96,1	95,2	91,0	86,4	80,4
LWP - M4a	83,9	80,2	79,8	82,3	81,1	80,2	73,9	68,4
LWP - M4b	91,8	91,4	81,0	81,5	83,4	80,8	79,2	74,7

<input type="checkbox"/> ROAD GRADIENT								
% Inclinación	0 Subida (positivo) - Bajada (negativo)							
LWP - M1	95,8	82,1	80,4	78,0	76,3	79,0	75,4	68,2
LWP - M2	102,9	91,9	92,5	90,4	92,2	88,8	82,4	76,3
LWP - M3	104,4	97,6	97,2	96,1	95,2	91,0	86,4	80,4
LWP - M4a	83,9	80,2	79,8	82,3	81,1	80,2	73,9	68,4
LWP - M4b	91,8	91,4	81,0	81,5	83,4	80,8	79,2	74,7

Figura 20. Espacio de cálculo de ruido de rodadura y propulsión de CNOSSOS-UE.

Con la ayuda de la herramienta de “casillas de control” se hizo la validación para definir respuestas afirmativas o negativas (Si/No) para algunos parámetros de la calculadora. La validación de esta casilla de control se implementó en la calculadora de tal manera que active o desactive un proceso o cálculo específico. Además, con la ayuda de listas desplegables se configuró aquellos parámetros que poseían opciones múltiples de selección. Este es el caso de los materiales de la calzada, antes mencionados.

Se implementó en la calculadora una serie de comentarios en forma de “avisos” para ciertos parámetros de la calculadora que se rigen a rangos de valores específicos o a ciertas características de una variable de entrada.

3.4.1 Implementación de los algoritmos propuestos por el modelo CNOSSOS-UE a la calculadora.

En el modelo predictivo CNOSSOS-UE la emisión de ruido de un flujo de tráfico está representada por una línea fuente, caracterizada por su potencia sonora. Esto corresponde a la suma de la emisión sonora de las fuentes individuales que en este caso son los vehículos en el flujo de tráfico. En el modelo predictivo CNOSSOS-UE la emisión de ruido tiene como parte principal la influencia individual de un vehículo dependiendo su categoría. Para implementar los algoritmos en la calculadora del modelo se procedió a identificar las ecuaciones generales que maneja el modelo y de esta manera incluirlas a la calculadora.

Para poder modelar en función de la contribución individual de un vehículo a través de la calculadora se implementó la siguiente ecuación:

$$L_{W',eq,line,i,m} = L_{W,i,m} + 10 * \lg \left(\frac{Q_m}{1000 * V_m} \right) \quad (\text{Ecuación 5})$$

En donde:

$L_{W,i,m}$: Es la potencia de sonido direccional instantánea de un solo vehículo por banda de octava (i) y por categoría (m).

Q_m : Es el promedio de autos anual por período de tiempo (día-tarde-noche), por categoría (m).

V_m : Velocidad media por categoría (m) expresada en [km/h].

Hay que tener en cuenta que $L_{W',eq,line,i,m}$ se expresa en dB y son niveles de potencia sonora se calculan para cada banda de octava (i) de 125 Hz a 4 kHz.

En esta ecuación las fuentes individuales de ruido se modelan como fuentes omnidireccionales. Para el factor Q_m se utilizó datos de flujo de tráfico de entrada derivados del conteo manual, por consiguiente, en este estudio se lo definió en función de los 20 minutos en los que se realizó el registro del número de autos en la fase de medición.

La velocidad media (V_m) es una velocidad representativa por categoría de vehículo (m). En tres localidades se definió una velocidad media igual a la velocidad máxima permitida de cada vía para cada categoría de vehículo. Esta decisión se tomó en base a lo descrito en el documento oficial del CNOSSOS-UE como procedimiento, cuando este valor de velocidad media no se lo ha obtenido.

“El aporte de los vehículos de forma individual se define por dos parámetros principales: categoría y velocidad. Y se corrige para varios efectos ambientales o aspectos específicos” (Kephalopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012, p.33). Los cálculos se realizaron con una velocidad media para cada categoría de vehículo.

El modelo de predicción de ruido de tráfico consta de un conjunto de ecuaciones y logaritmos matemáticos que modelan las dos principales fuentes de emisión de ruido en un vehículo:

- Ruido de rodadura debido a la interacción neumático / carretera.
- Ruido de propulsión producido por la transmisión (motor, escape, etc.) del vehículo.

Se analizó la forma general de la ecuación matemática para el nivel de potencia acústica emitida por una fuente con el fin de comprender la influencia del ruido de rodadura y de propulsión. El nivel de potencia acústica emitida por estas fuentes está dado por la siguiente estructura:

$$L_{W,i,m}(V_m) = A_{i,m} + B_{i,m} * f(V_m) \quad (\text{Ecuación 6})$$

En donde:

$f(V_m)$: Es una función logarítmica de (V_m) en el caso de rodadura y ruido aerodinámico y una función lineal de (V_m) en el caso de ruido de propulsión.

Una vez analizada la forma general de la ecuación para el nivel de potencia acústica emitida por una sola fuente, la metodología sugiere que para los vehículos ligeros, medio pesados y pesados (categorías 1, 2 y 3), la potencia acústica corresponde a la suma energética del ruido de rodadura y de propulsión. En la categoría de vehículos de dos ruedas sólo se debe considerar el ruido de propulsión.

Con este criterio y lineamiento propuesto por el modelo de predicción se procedió a implementar la siguiente ecuación en la calculadora, la cual define el nivel de potencia acústica de una fuente lineal tomando en cuenta el ruido de rodadura y de propulsión, en función de la velocidad media:

$$L_{W,i,m}(V_m) = 10 * \lg (10^{L_{WR,i,m}(V_m)/10} + 10^{L_{WP,i,m}(V_m)/10}) \quad (\text{Ecuación 7})$$

En donde:

$L_{WR,i,m}(V_m)$: Es el nivel de potencia acústica para ruido de rodadura.

$L_{WP,i,m}(V_m)$: Es el nivel de potencia acústica para ruido de propulsión.

Una vez implementada esta ecuación en la calculadora se separó el ruido de rodadura y de propulsión para hacer el cálculo de forma independiente y que sea más fácil para el usuario identificar el aporte de cada uno al nivel de ruido total. Para esto se implementó en la calculadora las ecuaciones para el cálculo de ruido de rodadura y de propulsión.

3.4.1.1 Ruido de rodadura

Se procedió a incluir el cálculo del ruido de rodadura en la calculadora. Se procuró seguir el criterio de diseño establecido en un inicio. El cálculo de este tipo de ruido viene dado por la siguiente ecuación:

$$L_{W,i,m} = A_{R,i,m} + B_{R,i,m} * \lg\left(\frac{V_m}{V_{ref}}\right) + \Delta L_{WR,i,m}(V_m) \quad (\text{Ecuación 8})$$

En donde:

$A_{R,i,m}$ y $B_{R,i,m}$: Son los coeficientes de emisión para ruido de rodadura.

$\Delta L_{RW,i,m}(V_m)$: Corresponde a la suma de los coeficientes de corrección que se aplicarán a la emisión de ruido de rodadura.

Se implementó en la calculadora las tablas que indican los coeficientes de emisión para ruido de rodadura establecidos en el Apéndice III-A del documento oficial del modelo de predicción CNOSSOS-UE. Se adjunta esta tabla de coeficientes en el Anexo 1. Estos factores están dados para todas las bandas de octava para cada categoría de vehículo y para una velocidad de referencia $V_{ref} = 70$ (km/h).

Se procedió a desglosar en la calculadora la variable $\Delta L_{RW,i,m}(V_m)$ que corresponde a la suma de los coeficientes de corrección que se aplican a la emisión de ruido de rodadura. Siguiendo el criterio de diseño se desglosó los coeficientes de corrección para operarlos de forma individual. Las correcciones que propone el modelo son para condiciones específicas de la carretera o del vehículo que se desvíen de las condiciones de referencia del modelo. Se tiene las siguientes correcciones para el ruido de rodadura:

$$\Delta L_{WR,i,m}(V_m) = \Delta L_{WR,road,i,m}(V_m) + \Delta L_{WR,studded\ tyres,i,m=1}(V_m) + \Delta L_{WR,acc,i,m} + \Delta L_{W,temp}(\tau) \quad (\text{Ecuación 9})$$

En donde:

$\Delta L_{WR,road,m}(V_m)$: Coeficiente de corrección por superficie de carretera.

$\Delta L_{WR, \text{studded tyres}, i, m=1}$: Coeficiente de corrección por neumáticos de labrado especial

$\Delta L_{WR, \text{acc}, i, m}$: Coeficiente de corrección por aceleración o desaceleración resultado de la presencia de redondel o cruce.

$\Delta L_{W, \text{temp}}(\tau)$: Coeficiente de corrección por temperatura

3.4.1.2 Ruido de propulsión

De la misma manera que se implementó el ruido de rodadura, se procedió a añadir el cálculo de ruido de propulsión en un espacio independiente en la interfaz de la calculadora. El aporte del ruido de propulsión viene dado la siguiente ecuación:

$$L_{WP, i, m} = A_{P, i, m} + B_{P, i, m} * \frac{(V_m - V_{ref})}{V_{ref}} + \Delta L_{WP, i, m}(V_m) \quad (\text{Ecuación 10})$$

En donde:

$A_{P, i, m}$ y $B_{P, i, m}$: Son los coeficientes de emisión para ruido de propulsión.

$\Delta L_{WP, i, m}(V_m)$: Corresponde a la suma de los coeficientes de corrección que se aplicarán a la emisión de ruido de propulsión.

Se implementó en la calculadora las tablas que indican los coeficientes de emisión para ruido de propulsión establecidos en el Apéndice III-A del documento oficial del modelo de predicción CNOSSOS-UE. Se adjunta esta tabla de coeficientes en el Anexo 1.

Se procedió a implementar en la calculadora las correcciones que integran el factor $\Delta L_{RP, i, m}(V_m)$, que corresponde a la suma de los coeficientes de corrección que se aplican a la emisión de ruido de propulsión.

Se tiene las siguientes correcciones:

$$\Delta L_{WP, i, m}(V_m) = \Delta L_{WP, \text{road}, i, m}(V_m) + \Delta L_{WP, \text{acc}, i, m} + \Delta L_{WP, \text{grad}, i, m}(V_m) \quad (\text{Ecuación 11})$$

En donde:

$\Delta L_{WR,road,m}(V_m)$: Coeficiente de corrección por superficie de carretera.

$\Delta L_{WP,acc,i,m}$: Coeficiente de corrección por aceleración y desaceleración por presencia de cruce.

$\Delta L_{WP,grad,i,m}(V_m)$: Coeficiente de corrección por presencia de gradiente o pendiente en la vía.

3.4.1.3 Implementación de correcciones del modelo CNOSSOS-UE

El proceso que realiza la calculadora para aplicar los coeficientes de corrección se lleva a cabo a la par en los dos tipos de ruido. Sin embargo, existen correcciones que se aplican únicamente para un tipo de ruido, y otras que se aplican a los dos, tanto para rodadura como para propulsión. Se tomó la decisión de diseñar la calculadora de forma que se visualice el aporte de cada una de estas correcciones a cada tipo de ruido. Siguiendo el criterio inicial de diseño definido para la calculadora.

- **Coeficiente de corrección por superficie de carretera (se aplica a ruido de rodadura y propulsión)**

Esta corrección se aplicó en los dos tipos de ruido, pero su cálculo tiene ciertas variaciones. El coeficiente de corrección por superficie se aplica el momento que las propiedades acústicas de la superficie son diferentes a las especificadas en las condiciones de referencia. Se tomó en cuenta los diferentes tipos de material que propone el modelo, ya que cada uno de estos tienen diferentes características y la corrección varía para cada uno de estos. Por lo tanto, se diseñó una lista desplegable utilizando herramientas de diseño de Excel para seleccionar el material de la superficie, para que la corrección sea aplicada en aquellas vías que poseen otras propiedades acústicas diferentes a las de referencia.

La corrección por superficie que se aplica al ruido de rodadura se la implementó en la calculadora y está definida por la siguiente ecuación:

$$\Delta L_{WR,road,m}(V_m) = \alpha_{i,m} + \beta_m * \lg\left(\frac{V_m}{V_{ref}}\right) \quad (\text{Ecuación 12})$$

En donde:

$\alpha_{i,m}$: Es la corrección espectral a la velocidad de referencia para la categoría m (1, 2 ó 3) y la banda espectral i (banda de octava de 125 a 4000 Hz).

β_m : Es efecto de la velocidad en la reducción del ruido de rodadura. Aunque este coeficiente es en principio dependiente de la frecuencia, no hay datos espectrales disponibles en la literatura y se asume un valor constante.

El factor de corrección de la superficie de la carretera en el ruido de propulsión viene dado por:

$$\Delta L_{WR,road,m} = \min\{\alpha_{i,m}; 0\} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Se debe tener en cuenta que las correcciones de superficie de la carretera pueden variar de un escenario a otro debido a las diferentes composiciones o características de las materias primas con las que se construyen las carreteras.

Para esta corrección los valores de $\alpha_{i,m}$ y β_m están definidos por el modelo predictivo y se los adjunta al documento en el Anexo 2.

- **Coeficiente de corrección por neumáticos de labrado especial (se aplica únicamente en el ruido de rodadura)**

Se estableció la corrección por los denominados “*studded tyres*”. Se implementó y configuró el algoritmo en la calculadora de forma que se haga el cálculo únicamente para la categoría de livianos ($m1$), como lo especifica el modelo de predicción. Se siguió los lineamientos del modelo y se configuró la calculadora para que el usuario, en base a su criterio, aplique o no la corrección. Esto se debe a que esta corrección se aplica en aquellos casos en que un número significativo de vehículos ligeros en el tráfico utilizan

neumáticos de labrado especial durante varios meses cada año y esto varía dependiendo la ubicación y realidad vehicular del lugar de estudio, por lo que queda a criterio del usuario definirlo.

Para implementar esta corrección se configuró la calculadora de tal forma que se aplique únicamente al ruido de rodadura y se lo visualice de forma independiente. La corrección viene dada por:

$$\Delta L_{WR,stud,i,m=1}(V_m) = \begin{cases} a_i + b_i * \lg\left(\frac{V_m}{70}\right) & \text{para } 50 \leq V_{m=1} \leq 90 \text{ km/h} \\ a_i + b_i * \lg\left(\frac{90}{70}\right) & \text{para } V_{m=1} > 90 \text{ km/h} \\ a_i + b_i * \lg\left(\frac{50}{70}\right) & \text{para } V_{m=1} < 50 \text{ km/h} \end{cases}$$

(Ecuación 14)

En donde:

a_i y b_i : Coeficientes de cálculo dados por el modelo predictivo CNOSSOS-UE

Los coeficientes a_i y b_i vienen definidos en la tabla de coeficientes de emisión para ruido de rodadura establecidos en el Apéndice III-A del documento del modelo de predicción CNOSSOS-UE, se adjunta esta tabla de coeficientes en el Anexo 1 del documento. Sus valores vienen dados por banda i (banda de octava de 125 a 4000 Hz). Además se implementó una tabla dentro de la calculadora con los valores que definen estos coeficientes.

Se debe recalcar que los neumáticos con labrado especial para camiones no son muy comunes, aunque sí existen. Pero el modelo detalla que únicamente se aplica a la categoría $m=1$ que consiste en vehículos livianos.

- **Coeficiente de corrección por influencia de la aceleración de desaceleración (se aplica a ruido de rodadura y propulsión)**

La aceleración y la desaceleración de los vehículos pueden tener un efecto significativo sobre la emisión de ruido de los vehículos, especialmente al acercarse o salir de los cruces de carretera, por esta razón se integró en la

calculadora esta corrección pensando en dos escenarios que propone el modelo de predicción.

Estos escenarios son la presencia de un redondel y la presencia de un cruce peatonal o semáforo. El coeficiente de corrección se desarrolla a partir de cálculos basados en la distancia x (en metros), desde la fuente puntual hasta la intersección más cercana de la línea de origen respectiva con otra línea de origen. Se configuró la calculadora de tal manera que el término de corrección se atribuye igualmente a todas las bandas de octava, para ruido de rodadura y de propulsión:

$$\Delta L_{WR,acc,i,m} = C_{R,m,k} * \text{Max}\left(1 - \frac{|x|}{100}; 0\right) \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$\Delta L_{WP,acc,i,m} = C_{P,m,k} * \text{Max}\left(1 - \frac{|x|}{100}; 0\right) \quad (\text{Ecuación 16})$$

En donde:

$C_{R,m,k}$ y $C_{P,m,k}$: Coeficientes de cálculo para corrección dados por el modelo.

x : Distancia desde la fuente puntual hasta la intersección más cercana.

Los coeficientes $C_{R,m,k}$ y $C_{P,m,k}$ dependen del tipo de cruce k ($k = 1$ para un cruce con semáforos, $k = 2$ para un redondel) y se indican en el Apéndice III-A para cada categoría de vehículo. En el Anexo 3 se adjunta tabla de valores definidos por el modelo para estos coeficientes. Los coeficientes son iguales para las categorías 2 y 3. Esta corrección incluye el efecto del cambio de velocidad cuando se aproxima o se aleja el vehículo de un cruce o de una rotonda.

Además, se estableció una condición dada por el modelo para esta corrección:

$$|x| \geq 100m, \Delta L_{WR,acc,i,m} = \Delta L_{WP,acc,i,m} = 0 \quad (\text{Ecuación 17})$$

Por lo que se implementó un mensaje de alerta en la calculadora que indique esta condición.

- **Coefficiente de corrección por temperatura (se aplica únicamente a ruido de rodadura)**

El modelo de predicción CNOSSOS-UE afirma que la temperatura del aire afecta al ruido de rodadura, por esta razón se implementó esta corrección. Las correcciones de la superficie de la carretera se evalúan generalmente a una temperatura del aire referencial $\tau_{ref}=20^{\circ}$ C. En el caso de una temperatura media anual del aire τ diferente a la de referencia, la corrección se la aplica mediante:

$$\Delta L_{W,temp}(\tau) = K * (20 - \tau) \quad (\text{Ecuación 18})$$

En donde:

τ : Temperatura media anual del aire

K : El coeficiente K depende de la superficie de la carretera y de las características del neumático y, en general, presenta cierta dependencia de la frecuencia.

Una vez implementada esta corrección se configuró avisos de alerta al usuario en la calculadora en donde se especifica que no se debe aplicar ninguna corrección para los vehículos de dos ruedas (categoría 4). El coeficiente de corrección K se lo aplica por igual en todas las bandas de octava de 125 a 4000 Hz y está definido por el modelo predictivo. Se adjunta en Anexo 3 los valores de este coeficiente.

- **Coefficiente de corrección por gradiente (se aplica únicamente a ruido de propulsión)**

La gradiente de la carretera afecta de dos maneras sobre la emisión de ruido. En primer lugar, afecta a la velocidad del vehículo, y en segundo lugar afecta tanto a la carga del motor como a la velocidad de funcionamiento del mismo. Para implementar la corrección de gradiente en la calculadora se necesita seguir las directrices que propone el modelo. Se diseñó en la calculadora un espacio de ingreso, para definir el valor de la pendiente de la vía s . Además se

añadió un comentario con el que se ayuda al usuario a definir si el valor de s es positivo o negativo.

Esta corrección se la implementó en función de la pendiente s (en %), de la velocidad del vehículo (en km/h) y de la clase de vehículo (m). La corrección viene dada por:

Para $m = 1$ (Ecuación 19)

$$\Delta L_{WP,grad,i,m=1}(V_m) = \begin{cases} \frac{\text{Min}(12\%; -s) - 6\%}{1\%} & \text{para } s < -6\% \\ 0 & \text{para } -6\% \leq s \leq 2\% \\ \frac{\text{Min}(12\%; s) - 2\%}{1,5\%} * \frac{V_m}{100} & \text{para } s > 2\% \end{cases}$$

Para $m = 2$ (Ecuación 20)

$$\Delta L_{WP,grad,i,m=2}(V_m) = \begin{cases} \frac{\text{Min}(12\%; -s) - 4\%}{0,7\%} * \frac{V_m - 20}{100} & \text{para } s < -4\% \\ 0 & \text{para } -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{\text{Min}(12\%; -s) - 4\%}{1\%} * \frac{V_m}{100} & \text{para } s > 0\% \end{cases}$$

Para $m = 3$ (Ecuación 21)

$$\Delta L_{WP,grad,i,m=3}(V_m) = \begin{cases} \frac{\text{Min}(12\%; -s) - 4\%}{0,5\%} * \frac{V_m - 10}{100} & \text{para } s < -4\% \\ 0 & \text{para } -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{\text{Min}(12\%; s)}{0,8\%} * \frac{V_m}{100} & \text{para } s > 0\% \end{cases}$$

Para $m = 4$ (Ecuación 22)

$$\Delta L_{WP,grad,i,m=4}(V_m) = 0$$

3.4.2 Predicción a través de la calculadora

Una vez implementados los algoritmos en la calculadora se realizaron pruebas de su funcionamiento para comprobar que no existe ningún tipo de problema en los algoritmos o en los cálculos. Los procesos que realiza la calculadora, no son visibles por parte del usuario, esta decisión se tomó para evitar que se manipule la calculadora y se genere alguna falla en el modelado. Se realizó la

verificación de la calculadora del modelo realizando una compilación del programa con éxito, ejecutando el modelo CNOSSOS-UE sin errores.

El resultado final de la calculadora e lo muestra en la Figura 21:

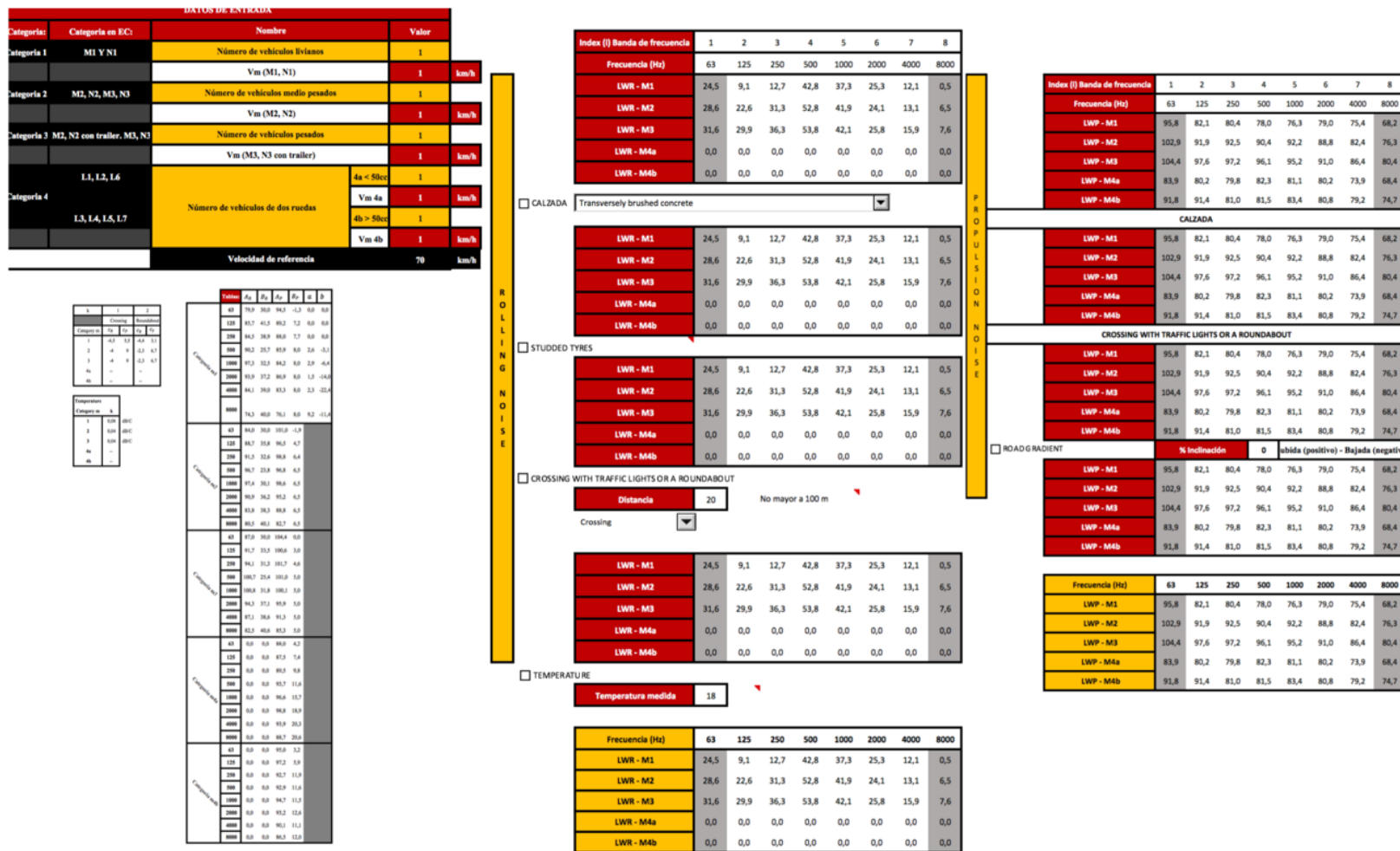


Figura 21. Interfaz de calculadora del modelo de predicción de ruido de tráfico CNOSSOS-UE terminada.

4. RESULTADOS

4.1 Presentación de los resultados obtenidos

Una vez culminada la etapa de diseño e implementación de la calculadora se procedió a modelar los niveles de ruido en los 16 puntos de medición. Se utilizó toda la información recolectada de forma manual y se la ingresó a la calculadora. Además se tomó en cuenta los factores meteorológicos y de velocidad registrados para aplicar las correcciones correspondientes en cada uno de los puntos de medición a modelar. Para el modelado se utilizaron los datos que se registraron en un periodo de tiempo previamente establecido en 20 minutos.

Para la revisión y análisis de los primeros resultados del estudio, la atención se centró en las diferencias existentes entre los datos modelados y medidos, que son los factores que determinan la proximidad del modelo a la realidad vehicular de la ciudad de Quito. Se tomó en cuenta que el modelo, como resultado final no arroja un dato único, el resultado que arroja está dado por bandas de octava, entre 125 y 4000 Hz.

Para asegurar la comparabilidad de los datos medidos versus los modelados se procedió a colocar ambos registros en una ponderación y rango frecuencial común. Para los datos modelados se procedió a aplicarles una ponderación frecuencial A y para los valores registrados con el sonómetro se procedió a calcular un valor Leq que integre los niveles únicamente del rango frecuencial que utiliza el modelo predictivo. De esta manera se aseguró que tanto los valores modelados como los medidos, tengan la misma ponderación frecuencial A y se manejen en un mismo rango frecuencial (de 125 a 4000 Hz).

4.1.1 Presentación de los resultados por punto de medición

Los resultados que se obtuvieron en el proceso de modelado a través del CNOSSOS-UE se los presenta a continuación:

Tabla 8.

Resultados del punto de medición "De Las Hiedras"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	46,9	53,9	59,5	65,4	61,7	55,0
MEDIDO	54,5	55,7	57,2	59,2	58,3	50,1
DIFERENCIA	7,6	1,8	2,2	6,2	3,4	4,9

Tabla 9.

Resultados del punto de medición "De Los Colimes"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	48,3	56,4	65,9	74,0	66,9	58,8
MEDIDO	53,5	56,3	60,9	62,3	58,8	52,5
DIFERENCIA	5,2	0,1	5,0	11,8	8,1	6,3

Tabla 10.

Resultados del punto de medición "Río Coca"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	52,7	59,9	63,6	68,7	65,7	59,7
MEDIDO	57,1	59,0	62,2	62,6	60,5	56,4
DIFERENCIA	4,5	1,0	1,4	6,1	5,2	3,3

Tabla 11.

Resultados del punto de medición "Isla Santa Fe"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	46,2	52,5	55,6	60,3	58,4	53,1
MEDIDO	52,1	55,5	58,5	60,2	58,1	54,2
DIFERENCIA	5,9	2,9	3,0	0,1	0,3	1,1

Tabla 12.

Resultados del punto de medición "Shyris"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	57,3	64,7	68,7	74,1	70,4	64,2
MEDIDO	60,4	63,0	66,3	68,0	63,8	58,3
DIFERENCIA	3,1	1,7	2,5	6,1	6,6	5,9

Tabla 13.

Resultados del punto de medición "Gaspar de Villarroel"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	55,0	61,3	66,5	71,3	67,1	61,4
MEDIDO	60,1	63,2	64,7	66,4	65,9	62,4
DIFERENCIA	5,0	1,9	1,8	4,9	1,2	1,0

Tabla 14.

Resultados del punto de medición "Naciones Unidas"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	56,6	63,5	68,9	75,1	70,9	64,3
MEDIDO	59,8	63,1	64,6	66,6	64,2	59,7
DIFERENCIA	3,2	0,4	4,3	8,5	6,7	4,6

Tabla 15.

Resultados del punto de medición "Eloy Alfaro y Capri"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	54,4	61,5	64,0	69,1	66,1	60,1
MEDIDO	58,4	62,7	65,6	67,0	64,2	58,5
DIFERENCIA	3,9	1,2	1,6	2,1	1,8	1,6

Tabla 16.

Resultados del punto de medición "El Inca"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	61,8	68,7	70,7	73,1	71,5	66,7
MEDIDO	61,5	65,4	68,7	69,2	68,0	64,0
DIFERENCIA	0,3	3,3	2,0	3,9	3,5	2,7

Tabla 17.

Resultados del punto de medición "Isaac Albéniz"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	50,2	56,6	63,8	70,2	69,1	61,4
MEDIDO	58,2	61,6	64,9	66,2	64,3	59,2
DIFERENCIA	8,1	5,0	1,2	4,0	4,8	2,2

Tabla 18.

Resultados del punto de medición "Panamericana Norte"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	58,2	65,8	70,0	75,3	71,4	64,9
MEDIDO	62,8	66,1	69,1	69,7	68,2	63,6
DIFERENCIA	4,6	0,3	0,8	5,6	3,2	1,3

Tabla 19.

Resultados del punto de medición "Simón Bolívar (Redondel)"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	62,3	70,1	71,6	75,5	73,3	67,7
MEDIDO	61,7	63,1	66,9	68,3	67,0	63,7
DIFERENCIA	0,6	6,9	4,7	7,2	6,3	4,0

Tabla 20.

Resultados del punto de medición "10 de Agosto"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	59,8	67,3	69,8	73,9	71,0	65,5
MEDIDO	59,4	63,8	67,7	67,9	66,1	61,0
DIFERENCIA	0,4	3,5	2,1	6,0	4,9	4,5

Tabla 21.

Resultados del punto de medición "Simón Bolívar"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	59,2	67,3	70,5	76,1	72,9	66,3
MEDIDO	64,3	71,3	73,8	75,1	72,4	66,7
DIFERENCIA	5,1	4,1	3,2	1,0	0,5	0,4

Tabla 22.

Resultados del punto de medición "Nogales (Bajada)"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	54,3	61,3	64,6	68,7	65,3	59,9
MEDIDO	57,9	60,0	63,0	63,9	62,7	58,3
DIFERENCIA	3,7	1,3	1,7	4,8	2,7	1,6

Tabla 23.

Resultados del punto de medición "Nogales (subida)"

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
MODELADO 20 MIN	55,6	62,6	65,2	68,5	65,9	60,9
MEDIDO	62,4	63,8	65,6	66,3	66,2	60,9
DIFERENCIA	6,8	1,2	0,4	2,3	0,3	0,1

4.2 Comparación de resultados modelados versus medidos

En la Tabla número 8 se presentan las diferencias calculadas entre los datos medidos y los datos modelados a través de la calculadora del modelo predictivo de ruido de tráfico CNOSSOS-UE.

Tabla 24.

Diferencias entre datos medidos versus modelados

LUGAR (VÍA)	TIPO DE FLUJO	LAeq MODELADO (dB)	LAeq MEDIDO (dB)	DIFERENCIA (dB)
DE LAS HIEDRAS	FLUJO INTERMITENTE	68,1	64,5	3,7
DE LOS COLIMES	FLUJO INTERMITENTE	75,5	66,6	8,9
RÍO COCA	FLUJO CONTINUO EN PULSOS	71,9	68,0	3,9
ISLA SANTA FE	FLUJO INTERMITENTE	64,1	65,0	1,0
AV. SHYRIS	FLUJO CONTINUO EN PULSOS	77,0	72,2	4,8
GASPAR DE VILLARROEL	FLUJO CONGESTIONADO	74,2	72,1	2,1
NACIONES UNIDAS	FLUJO CONGESTIONADO	77,6	71,5	6,2
ELOY ALFARO Y CAPRI	FLUJO ACELERADO EN PULSOS	72,4	71,6	0,8
EL INCA	FLUJO CONGESTIONADO	77,8	74,7	3,1
ISAAC ALBÉNIZ	FLUJO CONTINUO EN PULSOS	73,6	71,1	2,5
PANAMERICANA NORTE	FLUJO CONTINUO FLUIDO	78,1	75,1	3,0
SIMÓN BOLIVAR (REDONDEL)	FLUJO DECELERADO EN PULSOS	79,5	73,5	6,0
10 DE AGOSTO	FLUJO ACELERADO EN PULSOS	77,5	73,2	4,4
SIMÓN BOLIVAR	FLUJO CONTINUO FLUIDO	79,1	79,7	0,6
NOGALES (BAJADA)	FLUJO DECELERADO EN PULSOS	72,1	69,3	2,8
NOGALES (SUBIDA)	FLUJO ACELERADO EN PULSOS	72,5	72,4	0,1

Analizando estos datos obtenidos, específicamente las diferencias, se tiene una imagen global del escenario de la ciudad de Quito y cómo ésta es próxima al escenario modelado por el método común Europeo CNOSSOS-UE. El modelo de simulación de ruido de tráfico tiene el potencial trabajo de ofrecer un enfoque rentable, flexible y objetivo para evaluar el ruido emitido por una fuente (vía). Basando la investigación en este criterio y utilizando los datos obtenidos se pueden evaluar alternativas de diseño y gestión para el tráfico que presenta la ciudad de Quito.

Se evidenció que la mayor diferencia se tiene en la vía “De Los Colimes” con un valor de 8,9 dB, y la menor en la vía de “los Nogales” con un valor de 0,1 dB. Sin embargo el promedio de diferencias existente entre los datos modelados (20 minutos) y datos medidos (20 minutos) de las dieciséis localidades es 3,4 dB, un promedio que se puede considerar bajo, tomando en cuenta las diferencias que podrían existir entre las superficies de rodadura de las vías entre las ciudades de Europa y la ciudad de Quito.

Los resultados obtenidos en los distintos puntos de medición tienen factores similares en cuanto al comportamiento de las diferencias analizadas en forma espectral. Se identificó que las diferencias con los valores más altos se las encuentran en las bandas de frecuencia de 125 Hz y 1000 Hz. Lo que encamina la investigación a considerar que en estas bandas se podría modificar o calibrar los coeficientes de emisión para ruido de rodadura y de propulsión, con el fin de mejorar la proximidad del modelo predictivo a la realidad vehicular de la ciudad de Quito.

Se analizó en específico un punto de medición en forma minuciosa, la calle “De Los Colimes” por ser el punto de medición en el que se calculó la diferencia de mayor valor entre los datos medidos y modelados. Uno de los factores que se debe recalcar de esta vía es que su superficie de calzada presenta un desgaste considerable y se evidenció diferentes tipos de material utilizados para parchar fallas en la misma. Llama la atención que la mayor diferencia calculada entre los niveles modelados y los niveles medidos de este punto de medición se tiene en la banda de 1000 Hz con un valor de 11 dB de diferencia. Esto coincide con

la característica antes mencionada acerca de los resultados obtenidos de los dieciséis puntos de medición. Este fenómeno o tendencia en los datos puede dar paso a una posible calibración del modelo de predicción CNOSSOS-UE, ya que específicamente las bandas de 125 Hz y 1000 Hz se presentan las diferencias de mayor valor, esto permite al estudio identificar un posible caso de calibración del modelo para proporcionar un ajuste en los factores de emisión de ruido de propulsión y ruido de rodadura.

Sin embargo para los resultados obtenidos en este estudio se determinó que existen factores que pueden ser razón para que existan estas diferencias de valores altos, como es el caso de la topografía de la ciudad de Quito y la calidad del patio automotor que posee la misma. La ciudad de Quito se encuentra ubicada en un estrecho valle montañoso, factor que ha sido determinante para evidenciar un escenario vial con gran cantidad de pendientes en distintas zonas de la ciudad. Este factor influye de una manera directa en el nivel total de contaminación acústica emitida por una fuente, ya que el trabajo y emisión de ruido que tiene un motor al ser puesto en marcha en una cuesta o pendiente, tiende a ser mayor en relación a su funcionamiento en carreteras planas.

Se debe tener en cuenta un aspecto importante que es el que un modelo de predicción de ruido de tráfico modela a través de algoritmos que han sido diseñados en función de un escenario o datos ya existentes en materia de tránsito vehicular. Esto significa que el modelo basa su procesamiento en datos estadísticos y factores reales de una zona o lugar específico. Por esta razón el trabajo de investigación presentado trata en una forma global validar la funcionalidad, veracidad y cercanía del modelo predictivo de ruido de tráfico CNOSSOS-UE a la realidad vehicular de la ciudad de Quito. Existen ciertas diferencias entre los datos medidos y modelados que tienden a ser elevadas, esto no quiere decir que el modelo no es óptimo para su aplicación, ya que no se puede validar un modelo para todos los posibles casos de combinaciones en los datos de entrada del modelo. Por tales motivos el trabajo de investigación

ha centrado su análisis en escenarios que caracterizan la realidad vehicular de la ciudad de Quito.

4.3 Análisis de los resultados

Para cumplir con el objetivo principal de la investigación y confirmar o desmentir la hipótesis del proyecto, el procedimiento de análisis de resultados se enfoca en tres pasos claves que integran el proceso para garantizar la validez, la credibilidad y la fiabilidad de un modelo predictivo; estos procesos son los siguientes: verificación, validación y calibración (Fellendorf & Vortisch, 2001, p.2). El modelo de predicción de ruido de tráfico CNOSSOS-UE ha cumplido en sus distintas fases de desarrollo el proceso de verificación, es por esto que el objetivo de este estudio toma únicamente en cuenta el proceso de validación, específicamente en la realidad vehicular de la ciudad de Quito.

Se toma en cuenta la opinión de varios expertos como Fellendorf y Vortisch, (2001) que afirman que el proceso de validación debe ser realizada por el desarrollador del modelo e idealmente no debería ser repetida por el usuario del modelo predictivo; los usuarios del modelo sólo deben calibrar el modelo a su conjunto particular de condiciones locales y no necesitan repetir el ejercicio de validación para estimar el nivel esperado de error del modelo.

Existen dos causas que pueden llevar a un proceso de modelado a alejarse de forma considerable de la realidad vehicular de la zona de estudio. En primer lugar, es posible que los valores de las variables y parámetros de entrada del modelo no se hayan definido correctamente, algo que con seguridad es posible descartar en este estudio ya que el proceso de levantamiento de información se lo hizo de forma manual y detallada, garantizando la fiabilidad de los datos recolectados y definidos como variables de entrada del modelo. En segundo lugar, es posible que ciertos factores de emisión para ruido de rodadura y ruido de propulsión tengan una lógica de predicción inadecuada para lograr capturar los fenómenos de comportamiento del tráfico que se tiene en la ciudad de Quito. Este segundo punto es posible que se ajuste a la realidad de este

estudio, lo que propone una calibración del modelo para realizar una predicción más cercana a los niveles medidos.

En la comparación realizada se identificó ciertos aspectos del modelo que tienden a variar la cercanía de los datos modelados con los medidos. Como se mencionó anteriormente el tercer proceso que se lleva a cabo para garantizar la validez de un modelo de predicción consiste en la calibración del mismo; este proceso sería el adecuado para calibrar el modelo predictivo y lograr que se ajuste a la realidad de la ciudad de Quito. Se debe tener en cuenta que en el proceso de calibración se modificarían algunos de los coeficientes de emisión que el modelo CNOSSOS-UE propone, con el fin de mejorar la fiabilidad del modelo.

Este criterio de proceder a una calibración del modelo, resulta adecuado para este caso de estudio, sin embargo hay que destacar que es imposible demostrar de manera concluyente que un modelo es en un 100% válido, ya que es imposible ejecutar el modelo para cada combinación posible de datos de entrada. De todas maneras el estudio ha considerado los posibles casos que la ciudad de Quito posee, para de esta manera tratar de validar el modelo dependiendo las diferentes condiciones y características del lugar de estudio.

Para analizar los resultados de mejor manera se emplearon herramientas estadísticas que ayuden a tener una visión más exacta de la relación existente entre los datos modelados y los datos medidos. Una de las herramientas utilizada fue un gráfico de dispersión.

El gráfico de dispersión presenta un valor de R^2 que es el porcentaje de variación de una variable de respuesta que indica la relación existente con una o más variables predictivas. Para responder a la hipótesis planteada, mientras mayor sea el valor de R^2 , se puede asegurar que la relación existente entre los datos medidos y los datos modelados es óptima para la validación del modelo de predicción de ruido de tráfico CNOSSOS-UE en la realidad vehicular de la ciudad de Quito. El valor de R^2 maneja su valor de forma porcentual en un rango de 0% a 100%.

Una vez culminado el proceso comparativo, se presenta en la Figura 22 el gráfico de dispersión comparando los datos medidos versus los modelados a través del modelo de predicción CNOSSOS-UE.

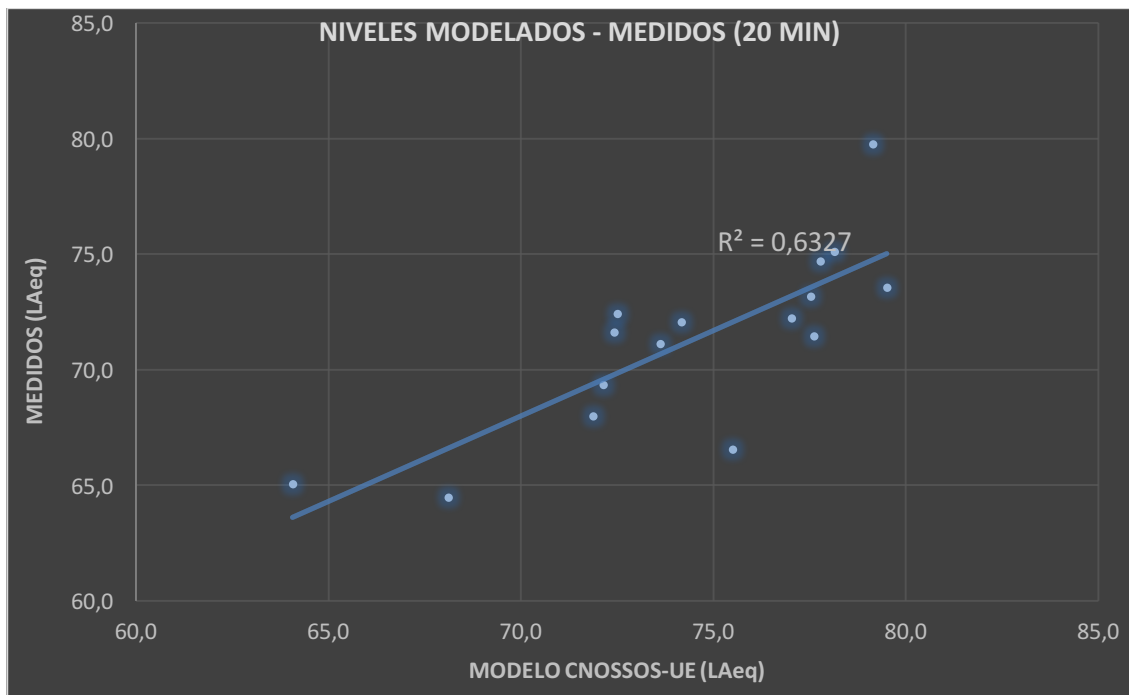


Figura 22. Gráfico de dispersión de valores medidos versus modelados.

En este estudio se obtuvo un valor de R^2 de 63,27% de relación entre los valores del L_{eq} medidos y los valores modelados través del CNOSSOS-UE. Un porcentaje ubicado en un rango medio alto, el cual podría ser tomado como razón para validar el modelo predictivo en aquellos puntos que tengan una realidad vehicular y condiciones de calzada similares a las de las ciudades dentro de la Unión Europea, además de ser válido para aquellos escenarios que cumplan con las condiciones de referencia dadas por el modelo.

Una vez obtenido el valor de R^2 se procedió a buscar la variable o parámetro del modelo que modifique significativamente el valor del nivel total de ruido (L_W) proporcionado por el modelo. Se llegó a identificar que el valor determinante para que los valores de nivel de ruido dados el modelo predictivo CNOSSOS-UE resulten alejados de los registros medidos, está dado en gran medida por el factor " Q_m ", que es el promedio de autos anual por período de tiempo (día-tarde-noche).

Al tener definido un tiempo de medición de 20 minutos, la proyección de los datos de este estudio se los hizo con un valor de Q_m igual a la cantidad de autos medidos en los 20 minutos establecidos para el periodo de medición. Esto con el objetivo de modelar el mismo escenario que se lo registró de forma manual.

Mediante este análisis se busca cuantificar de alguna manera el grado de similitud de los datos y encontrar cualquier tipo de discrepancia dentro del proceso de modelado. Se trata de identificar de forma precisa las capacidades y limitaciones tanto del modelo de simulación como del proceso de levantamiento de información. La comparación de resultados de los modelos y datos de campo suelen dar poca información sobre la exactitud y aplicabilidad del modelo predictivo. Por esta razón se procedió a realizar un análisis estadístico en busca de factores o variables que mejoren la exactitud del modelo. En este caso de estudio los resultados obtenidos encaminan la investigación a establecer que los coeficientes de emisión de ruido de rodadura y propulsión deben ser ajustados en base a una realidad vehicular que se asemeje de mejor manera a la ciudad de Quito. Sin embargo, existen casos en específico en donde los valores dados por el modelo y valores medidos se asemejan de forma muy cercana. Tal es el caso de los puntos de medición “Simón Bolívar”, “Isla Santa Fe”, “Eloy Alfaro y Capri” y “Nogales (Bajada)” en los que la diferencia obtenida no sobrepasa el valor de 1 dB. El promedio de diferencia de estos 4 puntos es de 0,6 dB. Un valor que se lo considera sumamente bajo y que daría paso a una validación del modelo de predicción de ruido de tráfico CNOSSOS-UE en puntos de medición que asemejen sus condiciones a las de estos 4 puntos mencionados. Estos puntos de medición representan el 25% del espacio muestral que se escogió para realizar la validación del modelo predictivo CNOSSOS-UE. Con este porcentaje, se puede afirmar que en un 25% de las localidades el modelo es totalmente óptimo para su ejecución, sin embargo para los 12 puntos de medición restantes se tienen diferencias con un promedio de 4,28 dB de diferencia entre los datos medidos y modelados, lo que podría imposibilitar que el modelo predictivo sea óptimo para su aplicación en escenarios con las características de estos puntos.

Para continuar con el análisis de los resultados se revisó el porcentaje correspondiente a cada tipo de vía con respecto a todos los puntos de medición seleccionados. En la Tabla 25 se indica los porcentajes calculados para cada tipo de vía.

Tabla 25.

Porcentaje de cada tipo de vía con respecto al total de los puntos de medición

	Recuento	% del N de columna
local	5	31,3%
colectora principal	4	25,0%
Tipo_vía colectora secundaria	1	6,3%
expresa	3	18,8%
arterial	3	18,8%

Se puede ver de qué forma está distribuido el espacio muestral que se seleccionó para el proceso de validación del modelo predictivo. La ciudad de Quito cuenta con gran cantidad de vías locales, por este motivo se decidió seleccionar un mayor número de puntos de medición que cuenten con esta característica. Sin embargo se tomó en cuenta un único punto de medición del tipo “colectora secundaria”, factor que se considera limitante al momento de realizar análisis estadísticos con este tipo de vía. Por otro lado, un factor que es sumamente importante e interesante de analizar es la velocidad de cada categoría de vehículo. El modelo predictivo de ruido de tráfico CNOSSOS-UE maneja una velocidad de referencia de 70 km/h, factor que se estableció en referencia a la realidad vehicular de los países miembros de la Unión Europea. Se realizó un análisis estadístico de las velocidades registradas en los diferentes tipos de vías, buscando un punto que relacione esta velocidad de referencia con los datos registrados en la ciudad de Quito. Se muestra en la Tabla 26 un análisis estadístico para las velocidades registradas en los diferentes tipos de vías:

Tabla 26.

Tabla de análisis de la velocidad por categoría de vehículo para cada tipo de vía

	Vel_livianos				Vel_semipesados				Vel_pesados				Vel_moto_4a				Vel_moto_4b			
	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
local	43,36	60,00	28,70	12,60	33,04	50,00	22,30	11,62	31,84	50,00	19,70	12,72	47,84	60,00	40,40	7,66	53,12	60,00	45,70	5,39
colectora principal	39,23	60,00	19,60	19,65	32,45	50,00	17,10	16,55	31,10	50,00	11,70	18,70	45,13	60,00	28,50	17,18	50,68	65,90	36,60	14,45
colectora secundaria	47,50	47,50	47,50	.	42,70	42,70	42,70	.	33,70	33,70	33,70	.	61,00	61,00	61,00	.	75,40	75,40	75,40	.
expresa	61,27	83,20	49,90	19,00	45,90	52,00	39,60	6,20	40,47	46,20	36,20	5,16	61,37	69,40	51,30	9,22	78,03	104,00	57,70	23,66
arterial	54,30	64,00	48,60	8,44	44,10	52,40	35,60	8,40	35,70	38,40	32,80	2,81	59,47	64,00	51,90	6,60	69,57	82,40	54,30	14,21

En la Tabla 26 se muestra para cada tipo de vía y cada categoría de vehículo, un análisis donde se establece la velocidad media, velocidad máxima, velocidad mínima y desviación estándar. El modelo de predicción de ruido de tráfico, maneja unas condiciones de referencia establecidas en base a la realidad vehicular de los países miembros de la Unión Europea.

Es interesante fijar la atención en los valores de velocidad media de cada categoría de vehículo ya que únicamente el valor correspondiente a la categoría 4b (motos >50cc) con un valor de 75,4 km/h en el tipo de vía colectora secundaria y un valor de 69,57 km/h en el tipo de vía arterial, son los dos únicos valores que se asemejan en cierto grado a los 70 km/h establecidos como una velocidad de referencia por el modelo predictivo CNOSSOS-UE.

Al analizar la desviación estándar de cada una de las velocidades registradas se puede establecer que las desviaciones individuales para cada caso con respecto al valor de velocidad son altas.

En un breve análisis de los valores de velocidad media obtenidos se establece que existe una diferencia considerable entre los datos obtenidos de forma manual y la velocidad de referencia que el modelo propone. Las condiciones de referencia propuestas por el modelo dan una guía para la aplicación del mismo, sin embargo no restringe ningún caso o escenario que se aleje de estas condiciones de referencia. Además el modelo predictivo en sus logaritmos toma en cuenta estas posibles variaciones, integrando a los logaritmos la influencia de la velocidad media V_m de cada categoría tanto para ruido de rodadura como de propulsión. De esta manera el proceso de validación no se ve afectado por tener diferentes condiciones que no son similares a las de referencia.

Se debe tener en cuenta que las características de las superficies de rodadura varían con la edad de la vía y el nivel de mantenimiento, con una tendencia a empeorar con el tiempo. Esto implica que la contaminación por ruido de rodadura y propulsión con el tiempo aumentará sino se corrige las condiciones de la vía. En la ciudad de Quito el mantenimiento de las vías y carreteras se considera deficiente, llegando a verse casos de calzadas en las que se encuentra hasta más de 3 tipos de material diferente en forma de parches en la vía. Se adjunta Figura 23 y 24 como evidencia de lo mencionado.



Figura 23. Calzada deteriorada del punto de medición “De Los Colimes”.



Figura 24. Calzada deteriorada del punto de medición “Panamericana Norte”.

Encaminando el análisis de resultados hacia el valor de emisión de ruido, se realizó un estadístico con los valores L_{eq} tanto modelados como medidos. En la Tabla 27 se presenta el análisis estadístico que se aplicó en los resultados modelados, medidos y los diferentes descriptores acústicos.

Tabla 27.

Tabla de estadísticos descriptivos de niveles modelados, medidos y los diferentes descriptores acústicos

Estadísticos descriptivos									
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Asimetría		Curtosis	
	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Error estándar	Estadístico	Error estándar
Leq_mod	16	64,10	79,50	74,4375	4,21709	-1,024	,564	,956	1,091
Leq_med_son	16	64,60	79,80	71,4125	3,93376	-,015	,564	,342	1,091
LCeq	16	73,80	87,20	82,2375	3,46658	-,860	,564	1,251	1,091
LAF10	16	63,20	80,80	73,6000	4,16637	-,833	,564	1,551	1,091
LAF90	16	49,90	69,90	59,8375	5,06318	-,368	,564	,623	1,091
N válido (por lista)	16								

Los resultados que proporciona la tabla de estadísticos descriptivos permite identificar un escenario favorable para el objetivo del trabajo de investigación. En los valores mínimos y máximos de L_{eq} medido y L_{eq} modelado se puede identificar que la diferencia que poseen es de 0,5 y 0,3 respectivamente. Este valor se considera bajo tomando en cuenta todos los factores, variables y correcciones que intervienen en el proceso de modelado. Entre los valores de la media de los valores modelados y valores medidos se tiene una diferencia de 3,025. Con las diferencias obtenidas se puede afirmar que el modelo predictivo de ruido de tráfico tiene una proximidad con la realidad vehicular de la ciudad de Quito. Sin embargo existen escenarios específicos que no cumplen con las condiciones de referencia establecidos por el modelo, en donde los valores modelados a través de la calculado se desajustan de los valores medidos.

Esto implica que ciertos factores de emisión para ruido de rodadura y ruido de propulsión además de algunos parámetros del modelo como: " Q_m ", que es el promedio de autos anual por período de tiempo (día-tarde-noche) y la velocidad media de cada categoría " V_m " necesitan ser ajustados a la realidad vehicular de la ciudad de Quito. Es posible que la realidad vehicular de Quito requiera datos de entrada más específicos al tener un escenario particular con factores que en las ciudades de la Unión Europea es difícil identificar. El proceso de validación del modelo predictivo CNOSSOS-UE se ha desarrollado en base a la comparación de los valores de ruido medidos de forma manual en cada uno de los puntos de medición con los datos obtenidos a través de la simulación con la calculadora. Un fallo en la validación requiere que se realicen algunas modificaciones al modelo, y por lo tanto, el proceso de verificación debe repetirse.

Es importante tener un criterio fundamentado el momento que se asegura que los escenarios estudiados sean representativos de los escenarios típicos para los que el modelo ha sido diseñado. Tomando en cuenta el objetivo principal del modelo predictivo CNOSSOS-UE que es desarrollar un método de evaluación coherente capaz de proporcionar resultados comparables de la cartografía estratégica del ruido realizada por los Estados Miembros. Se puede concluir que el modelo fue diseñado pensando en muchos de los casos posibles que las ciudades de Europa pueden tener, pero la realidad vehicular de la ciudad de Quito se diferencia notoriamente. De todas formas el modelo si se ajusta en ciertas localidades de los 16 puntos de medición, los cuales asemejan sus características a las condiciones de referencia del modelo.

De esta manera para establecer los escenarios en los cuales el modelo es aplicable en la ciudad de Quito es necesario analizar los puntos en los que las diferencias calculadas no superan el 1 dB. Tal es el caso de los puntos de medición "Simón Bolívar", "Isla Santa Fe", "Eloy Alfaro y Capri" y "Nogales (Bajada)" en donde el promedio de diferencia de estos 4 puntos es de 0,6 dB.

Se realizó un análisis para encontrar aspectos en común entre estos 4 puntos de medición establecidos. Se incluye la información de estos puntos en la Tabla 28:

Tabla 28.

Puntos de medición con menor diferencia entre el modelo y los datos medidos

LUGAR	CALZADA	TIPO DE FLUJO	PENDIENTE
ISLA SANTA FE	ASFALTO DOS CAPAS	FLUJO INTERMITENTE	0,0
ELOY ALFARO Y CAPRI	ASFALTO DOS CAPAS	FLUJO ACELERADO EN PULSOS	3,8
SIMÓN BOLÍVAR	ASFALTO POROSO	FLUJO CONTINUO FLUIDO	4,1
NOGALES B	ASFALTO POROSO	FLUJO DECELERADO EN PULSOS	6,3

El primer factor que llama la atención es el tipo de calzada. Dos puntos poseen asfalto de doble capa y los dos restantes poseen asfalto poroso. Es importante recalcar que el estado de las vías de estos 4 puntos de medición es excelente, y su promedio de antigüedad no supera los 3 años. Para poder afirmar que el modelo es óptimo para la ciudad de Quito en aquellos escenarios que cuenten con estos tipos de material, es necesario establecer que el modelo tiene diferentes variables y factores de entrada para el procesamiento de sus algoritmos por lo que sería apresurado afirmar que el modelo es óptimo en lugares que se tengan únicamente características de calzada similares a las descritas.

Por esta razón se buscó otros factores que relacionen estos 4 puntos de medición. Sin embargo se encontró que los tipos de flujo vehicular son totalmente distintos en los puntos descritos. Algo que permite asegurar que el modelo es válido para los diferentes tipos de flujo vehicular que estos puntos poseen y que es común evidenciarlos en la ciudad de Quito. Entre estos están los flujos “intermitente”, “acelerado en pulsos”, “continuo fluido” y “decelerado en pulsos”. En el caso de escenarios con características distintas es interesante ver que tres de los cuatro puntos descritos poseen pendiente.

Demostrando de esta manera que el modelo predictivo es válido para escenarios de la ciudad de Quito que tengan estas características.

Para asegurar la aceptabilidad del proceso de validación, los puntos de medición deben ser establecidos de forma estratégica. Cada uno de los puntos está pensado para probar una característica específica del modelo predictivo. Por esta razón los puntos establecidos fueron cuidadosamente pensados para probar factores y parámetros del modelo, con el fin de identificar las limitaciones del mismo.

En un breve análisis podemos de forma general en la Figura 23, que los valores del modelo predictivo son más altos que los valores medidos de forma manual.

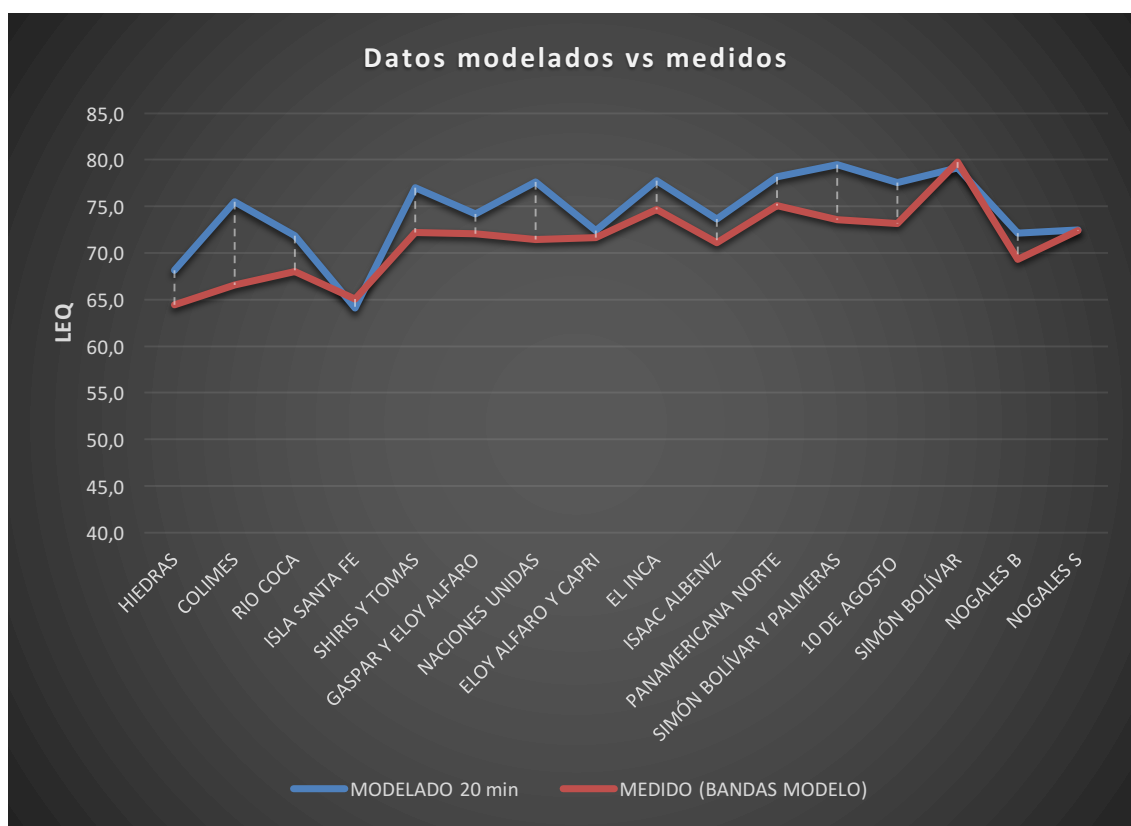


Figura 25. Gráfico de valores medidos versus modelados.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Los modelos de simulación de tráfico tienen el potencial de ofrecer un enfoque rentable, objetivo y flexible para evaluar las alternativas de diseño y gestión, sin embargo se concluye que es imposible demostrar que un modelo es en un 100% válido para todas las combinaciones posibles de los datos de entrada o para todos los escenarios que pueden presentarse en la localidad de estudio.

El uso de modelos de predicción ayuda a evaluar alternativas de diseño y gestión del tráfico. Ciertos modelos de simulación de tráfico son capaces de proporcionar medidas de rendimiento de tráfico, condiciones ambientales y de seguridad, incluyendo el tiempo medio de viaje, la distancia media de viaje, el número medio de paradas de vehículos, el consumo total de combustible, las emisiones de gases del vehículo y riesgo de accidente de los vehículos.

Analizando los resultados obtenidos es posible establecer que el modelo predictivo CNOSSOS-UE es un modelo rentable, objetivo y flexible para ser utilizado en la realidad vehicular de la ciudad de Quito, siempre y cuando los escenarios modelados cumplan con las condiciones de referencia o asemejen su realidad vial a la de las ciudades ubicadas en los países miembros de la Unión Europea.

Se encontró que el modelo predictivo CNOSSOS-EU, a través del proceso de validación, tiene un porcentaje óptimo de efectividad de sus logaritmos para el 25% de los puntos de medición establecidos para este estudio. Se obtuvo un promedio de las diferencias existentes entre los datos modelados versus los datos medidos de todos los puntos de medición establecidos de 3,4 dB. Este promedio se encuentra en un rango aceptable que permite concluir que la cercanía del modelo predictivo a la realidad vehicular de la ciudad de Quito es aceptable bajo condiciones específicas.

Se identificó que modelo de predicción de ruido de tráfico CNOSSOS-UE cuenta con una base de datos amplia para ejecutar sus algoritmos, utilizando algunas de las combinaciones posibles para los datos de entrada, sin embargo se evidenció que el modelo posee ciertas desviaciones en los resultados obtenidos en las bandas de 125 Hz y 1000 Hz. Se llegó a esta conclusión ya que en estas bandas se encontró las mayores diferencias entre los datos medidos y modelados obtenidas en el estudio. Siendo así en la gran mayoría de los puntos de medición. Se concluye que el modelo predictivo CNOSSOS-UE necesita una calibración de sus coeficientes de ruido de propulsión y ruido de rodadura para mejorar la cercanía del escenario modelado con el medido.

Se realizó un análisis profundo para encontrar los escenarios en los que el modelo de predicción de ruido de tráfico CNOSSOS-UE sea aplicable. Por tal motivo se seleccionó puntos de medición que prueben todos los aspectos del modelo y que pongan a prueba la capacidad de cálculo del mismo. Se llegó a identificar que el modelo de predicción mejora su porcentaje de efectividad y de cercanía al escenario medido en 4 tipos de flujo vehicular, entre estos están los flujos “intermitente”, “acelerado en pulsos”, “continuo fluido” y “decelerado en pulsos”, flujos que es común encontrarlos en la ciudad de Quito.

A través del proceso de validación es posible concluir que el modelo CNOSSOS-UE posee una lógica de predicción óptima para la realidad de la ciudad de Quito, siempre y cuando el escenario establecido para él estudió asemeje sus condiciones viales y condiciones de calzada a las establecidas por el modelo predictivo.

La aceleración y la desaceleración de los vehículos puede tener un efecto significativo sobre la emisión de ruido de los vehículos, especialmente al acercarse a cruces o semáforos. Sin embargo este efecto es mucho más difícil de estimar para un flujo de vehículos que para vehículos individuales, ya que depende del comportamiento de vehículos individuales, ubicación, tiempo, condiciones de tráfico, etc.

Ingresando los datos de entrada y sus posibles combinaciones de manera correcta aumenta el porcentaje de efectividad del modelo. Mientras más detallado sea el proceso de levantamiento de información aumenta la eficiencia del modelo.

Concluyendo el proceso de análisis se puede establecer que la armonización de los métodos de evaluación es necesaria, para asegurar la comparabilidad de resultados obtenidos en distintos estudios. Existen diferentes técnicas para migrar valores de otros modelos al modelo de predicción CNOSSOS-UE.

Las condiciones de la calzada son determinantes para la emisión de ruido de una vía. En la ciudad de Quito se identificó que el estado de las vías es malo, lo que aumenta la emisión de ruido y contaminación acústica en la ciudad.

La calculadora implementada con los algoritmos del modelo predictivo CNOSSOS-UE se compiló con éxito, además se ejecutó el modelo sin errores y sin una aproximación matemática excesiva, para todas las localidades establecidas en el estudio.

Los resultados obtenidos en el análisis estadístico permiten establecer que la aplicación del modelo predictivo de ruido de tráfico CNOSSOS-UE es posible bajo ciertas condiciones.

Los diferentes logaritmos que implementa el modelo de predicción de ruido de tráfico toman en cuenta las posibles correcciones que se pueden dar cuando un escenario se aleja de las condiciones de referencia dadas por el modelo.

5.2 Recomendaciones

Para una correcta validación de un modelo predictivo, la fase de levantamiento de información es uno de los factores que pueden garantizar el éxito del modelo. Se debe tomar en cuenta que todos los factores meteorológicos, físicos, vehiculares y características de la zona de estudio ya que estos pueden variar en gran medida la predicción del modelo.

Para realizar una validación de un modelo predictivo, se debe tener conocimiento de todos los factores que el modelo integra, sus variables de entrada, parámetros de cálculo, coeficientes de cálculo, etc. Para poder identificar en qué punto del procesamiento de los algoritmos varía de forma considerable la predicción, para un posible ajuste o calibración del modelo.

Sería recomendado utilizar el equipo adecuado y especializado en el registro de la velocidad de los vehículos, para asegurar la fiabilidad de los datos obtenidos en este proceso.

En el proceso de levantamiento de información es necesario utilizar el equipamiento de seguridad para salvaguardar la integridad de los técnicos encargados de esta tarea. Ya que se está expuesto a escenarios en donde los vehículos transitan a altas velocidades y existen factores de riesgo que se deben tomar en cuenta.

6. POSIBLES AMPLIACIONES DEL PROYECTO

Como posible ampliación del proyecto sería interesante el calibrar el modelo predictivo CNOSSOS-UE en los factores mencionados anteriormente, para ver como éste se ajusta a la realidad vehicular de la ciudad de Quito una vez calibrado. Además sería interesante validar este modelo predictivo en las principales ciudades del Ecuador, ya que cada ciudad varía su realidad y condiciones vehiculares. Este estudio abre la posibilidad de emplear modelos de predicción a gran escala. Esto sin duda tendría un coste menor en relación a estudios que se los ejecuta de forma manual.

Como posible ampliación del proyecto se propone la validación del modelo predictivo para ruido de trenes, ruido de industria y para emisión de ruido aéreo que propone el CNOSSOS-UE. Esto con el objetivo de aplicar un marco metodológico común a la de otros países para buscar comparabilidad de los datos obtenidos con otros ya existentes en el país.

6.1 Campos investigativos impulsados por el proyecto

Con la realización de este estudio se abre la posibilidad de diseñar un modelo de predicción de ruido de tráfico propio de la ciudad de Quito. Muchos de los países líderes en el campo acústico y medioambiental, han optado por diseñar su propio modelo predictivo que se ajuste a su realidad vehicular ya que es la única manera de asegurarse que las condiciones y variables que tome en cuenta el modelo sea las del lugar de estudio.

Se logra impulsar el campo investigativo de la acústica medioambiental ya que se abre la posibilidad de aplicar modelos de predicción para estudios a gran escala. No solo en zonas específicas sino en ciudades completas, algo que sin duda daría oportunidad a los profesionales del campo en el Ecuador de ejecutar proyectos de grandes magnitudes y con reconocimiento a nivel mundial. El campo principal impulsado por esta investigación se centra en la implementación de mapas de ruido o mapas estratégicos, que son la representación más importante del impacto acústico-ambiental de una ciudad o sector específico.

REFERENCIAS

- Alberts, A. (2012). *Anomalous Data of END Noise Mapping for Major Roads on the Website of the European Environment Agency*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Recuperado el 29 de Septiembre de 2016, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812028406>
- Babisch , W. (2006). *Transportation noise and cardiovascular risk: updated review and synthesis of epidemiological studies indicate that the evidence has increased*. Recuperado el 29 de Julio de 2016, de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17513892>
- Barregard, L., Bonde, E., & Öhrström, E. (2009). *Risk of hypertension from exposure to road traffic noise in a population-based sample*. Recuperado el 18 de Agosto de 2016, de <http://oem.bmj.com/content/66/6/410>
- Bengang , L., Dawson, R., Tao, S., & Lam, K. (Junio de 2002). *A GIS based road traffic noise prediction model*. Recuperado el 01 de Noviembre de 2016, de https://www.researchgate.net/publication/243350460_A_GIS_based_road_traffic_noise_prediction_model
- Beranek, L. (1986). *Acoustics*. New York, Estados Unidos: American Institute of Physics for the Acoustical Society of America, cop.
- Comisión Europea. (2002). *Directiva: 2002/49/CE*. Recuperado el 2015 de Septiembre de 6 , de <http://sicaweb.cedex.es/docs/leyes/Directiva-2002-49-CE-Evaluacion-gestion-ruido-ambiental.pdf>
- Comisión Europea. (2003). *Directiva: 2003/613/CE*. Recuperado el 4 de Septiembre de 2016, de <https://www.boe.es/doue/2003/212/L00049-00064.pdf>

- Cueto Ancela. (s.f.). *Guía para la realización de mapas estratégicos de ruido y planes de acción*. Laboratorio de Ingeniería Acústica de la Universidad de Cádiz (LAV).
- Fellendorf, M., & Vortisch, P. (2001). *Validation of the microscopic traffic flow model VISSIM in different real-world situations*. Washington, D.C., Estados Unidos .
- Fletcher, H., & Munson, W. (30 de Abril de 2014). *Loudness, its definition, measurement and calculation*. Recuperado el 15 de Junio de 2016, de <http://ieeexplore.ieee.org/document/6771028/?reload=true>
- Gulliver, J., Vienneau, D., Morley, D., & Fecht, D. (2015). *Development of an open-source road traffic noise model for exposure assessment*. Recuperado el 06 de Octubre de 2016, de https://www.researchgate.net/publication/270596020_Development_of_a_n_open-source_road_traffic_noise_model_for_exposure_assessment
- Kephalopoulos , S., Paviotti , M., Anfosso-Lédée , F., Van Maercke , D., Shilton , S., & Jones , N. (2014). *Advances in the development of common noise assessment methods in Europe: The CNOSSOS-EU framework for strategic environmental noise mapping*. Recuperado el 30 de Octubre de 2016, de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24582156>
- Maji, S., & Naveen, G. (2014). *A critical review of principal traffic noise models: Strategies and implications*. Recuperado el 20 de Agosto de 2016, de https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:46040434
- McGaughey, J., Dennison, E., & Ying , S. (Enero de 1979). *Practical Methods of Environmental Noise Assessment*. Recuperado el 19 de Octubre de 2016, de https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/STP/PAGES/STP35972S.htm
- Ministerio de Ambiente. (Mayo de 2015). *Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente. Libro VI Anexo 5*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2016, de

<http://suia.ambiente.gob.ec/documents/10179/185880/ACUERDO+061+REFORMA+LIBRO+VI+TULSMA+-+R.O.316+04+DE+MAYO+2015.pdf/3c02e9cb-0074-4fb0-afbe-0626370fa108>

Miyara, F. (1999). *Introducción a la Psicoacústica*. Recuperado el Octubre de 20 de 2016, de <http://www.analfatecnicos.net/archivos/04.IntroduccionPsicoacusticaFedericoMiyara.pdf>

Miyara, F. (2006). *Acústica y Sistemas de Sonido*. México: UNR Editora.

Morley, D., De Hoogh, K., Fecht, D., Fabbri, F., Belld, M., Goodman, P., . . . Gulliver, J. (Marzo de 2015). *International scale implementation of the CNOSSOS-EU road traffic noise prediction model for epidemiological studies*. Recuperado el 04 de Noviembre de 2016, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749115003644>

Romeu, J., Pàmies, T., Francitorra, M., & Jiménez, S. (2011). *Street categorization for the estimation of day levels using short-term measurements*. Recuperado el 06 de Noviembre de 2016, de https://www.researchgate.net/publication/251448273_Street_categorization_for_the_estimation_of_day_levels_using_short-term_measurements

Shilton, S., Lédée, F., & Leeuwe, H. V. (2015). *Conversion of existing road source data to use CNOSSOS-EU*. Recuperado el 01 de Septiembre de 2016, de <http://dgmr.nl/uploads/files/Euronoise%20Conversion%20of%20existing%20road%20source%20data%20to%20use%20CNOSSOS-EU%20-%20000564.pdf>

Steele, C. (2001). *A critical review of some traffic noise prediction models*. Recuperado el 07 de Noviembre de 2016, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X0000030X>

ANEXOS

ANEXO 1

COEFICIENTES DE EMISIÓN PARA RUIDO DE TRÁFICO DADOS POR EL MODELO DE PREDICCIÓN CNROSSOS-UE.

	Tablas:	A_R	B_R	A_P	B_P	a	b
Categoría m1	63	79,9	30,0	94,5	-1,3	0,0	0,0
	125	85,7	41,5	89,2	7,2	0,0	0,0
	250	84,5	38,9	88,0	7,7	0,0	0,0
	500	90,2	25,7	85,9	8,0	2,6	-3,1
	1000	97,3	32,5	84,2	8,0	2,9	-6,4
	2000	93,9	37,2	86,9	8,0	1,5	-14,0
	4000	84,1	39,0	83,3	8,0	2,3	-22,4
	8000	74,3	40,0	76,1	8,0	9,2	-11,4
Categoría m2	63	84,0	30,0	101,0	-1,9		
	125	88,7	35,8	96,5	4,7		
	250	91,5	32,6	98,8	6,4		
	500	96,7	23,8	96,8	6,5		
	1000	97,4	30,1	98,6	6,5		
	2000	90,9	36,2	95,2	6,5		
	4000	83,8	38,3	88,8	6,5		
	8000	80,5	40,1	82,7	6,5		
Categoría m3	63	87,0	30,0	104,4	0,0		
	125	91,7	33,5	100,6	3,0		
	250	94,1	31,3	101,7	4,6		
	500	100,7	25,4	101,0	5,0		
	1000	100,8	31,8	100,1	5,0		
	2000	94,3	37,1	95,9	5,0		
	4000	87,1	38,6	91,3	5,0		
	8000	82,5	40,6	85,3	5,0		
Categoría m4a	63	0,0	0,0	88,0	4,2		
	125	0,0	0,0	87,5	7,4		
	250	0,0	0,0	89,5	9,8		
	500	0,0	0,0	93,7	11,6		
	1000	0,0	0,0	96,6	15,7		
	2000	0,0	0,0	98,8	18,9		
	4000	0,0	0,0	93,9	20,3		
	8000	0,0	0,0	88,7	20,6		
Categoría m4b	63	0,0	0,0	95,0	3,2		
	125	0,0	0,0	97,2	5,9		
	250	0,0	0,0	92,7	11,9		
	500	0,0	0,0	92,9	11,6		
	1000	0,0	0,0	94,7	11,5		
	2000	0,0	0,0	93,2	12,6		
	4000	0,0	0,0	90,1	11,1		
	8000	0,0	0,0	86,5	12,0		

Tomado de Kephelopoulos, Paviotti, & Anfosso, 2012.

Elaborado por Edison Pacheco

ANEXO 2

COEFICIENTES PARA CORRECCIÓN POR SUPERFICIE PARA RUIDO DE RODADURA Y PROPULSIÓN DADOS POR EL MODELO DE PREDICCIÓN CNOSSOS-UE

		Tablas:	Transversely brushed concrete	Concrete with surface dressing 2/4	Exposed aggregate concrete	PAC(1) 6/16	2-layer PAC(1) 4/8-11/16	SMA(2) 0/6	Surface dressing 4/8
M1	α	63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		125	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		250	2,6	2,1	1,0	0,0	-1,6	0,0	5,1
		500	2,4	3,0	1,2	0,0	-3,3	0,0	5,6
		1000	1,2	3,5	1,9	-1,1	-4,3	-2,0	4,6
		2000	2,4	0,1	0,8	-4,5	-6,9	-2,9	-1,5
		4000	0,0	-0,8	0,0	-5,3	-6,7	-2,2	-2,5
		8000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	β	-	6,0	-5,0	0,0	-11,0	-6,0	-5,0	-4,0
M2 Y 3	α	63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		125	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		250	2,2	1,1	0,0	1,0	-0,3	0,0	2,5
		500	1,7	0,8	-0,2	-4,2	-5,7	-0,6	0,4
		1000	1,3	-0,9	-0,8	-4,5	-6,9	-1,6	-1
		2000	0,2	-2,0	-1,5	-3,3	-5,5	-1,2	-1,8
		4000	-1,3	-2,0	-1,9	-2,6	-4,4	-1,1	-2,1
		8000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	β	-	12,0	5,0	15,0	-6,0	-8,0	0,0	13,0

Elaborado por Edison Pacheco

ANEXO 3

COEFICIENTES K PARA CORRECCIÓN POR TEMPERATURA PARA RUIDO DE RODADURA DADOS POR EL MODELO DE PREDICCIÓN CNOSSOS-UE

K - Temperature	
Category m	k (dB/C)
1	0,08
2	0,04
3	0,04
4a	--
4b	--

ANEXO 4

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL LOS DIFERENTES TIPO DE VÍA

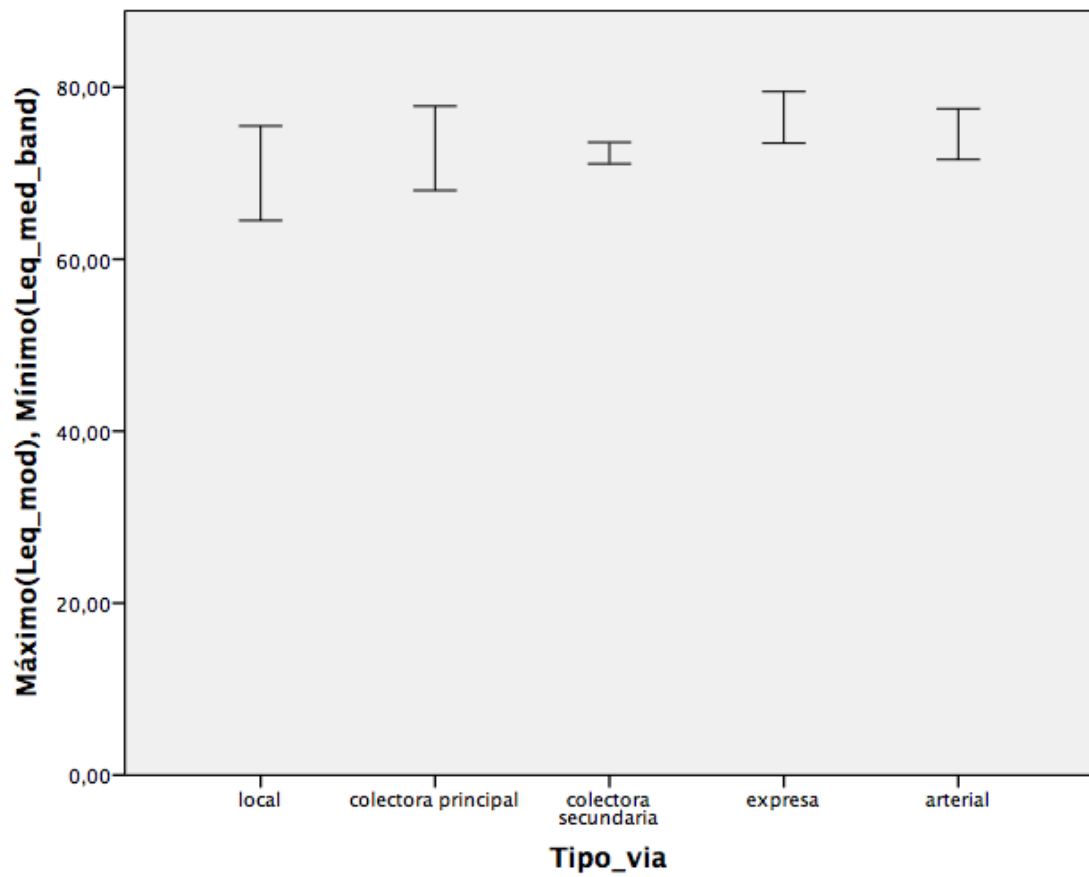
Descriptivos ^a			
	Tipo_via	Estadístico	Error estándar
Leq_mod	local	Media	70,4600
		95% de intervalo de confianza para la media	1,97828
		Límite inferior	64,9674
		Límite superior	75,9526
		Media recortada al 5%	70,5333
		Mediana	72,1000
		Varianza	19,568
		Desviación estándar	4,42357
		Mínimo	64,10
		Máximo	75,50
		Rango	11,40
		Rango intercuartil	7,90
		Asimetría	-,623
		Curtosis	-,371
		Error estándar	2,000
		Media	75,3750
		95% de intervalo de confianza para la media	1,42266
	Límite inferior	70,8475	
	Límite superior	79,9025	
	Media recortada al 5%	75,4333	
	Mediana	75,9000	
	Varianza	8,096	
	Desviación estándar	2,84532	
	Mínimo	71,90	
	Máximo	77,80	
	Rango	5,90	
	Rango intercuartil	5,27	
	Asimetría	-,530	
	Curtosis	-2,982	
	Error estándar	1,014	
	Media	78,9000	
	95% de intervalo de confianza para la media	,41633	
	Límite inferior	77,1087	
	Límite superior	80,6913	
	Media recortada al 5%	.	
	Mediana	79,1000	

		Varianza	,520	
		Desviación estándar	,72111	
		Mínimo	78,10	
		Máximo	79,50	
		Rango	1,40	
		Rango intercuartil	.	
		Asimetría	-1,152	1,225
		Curtosis	.	.
		Media	75,6333	1,62310
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior Límite superior	68,6497 82,6170
		Media recortada al 5%	.	
		Mediana	77,0000	
		Varianza	7,903	
	arterial	Desviación estándar	2,81129	
		Mínimo	72,40	
		Máximo	77,50	
		Rango	5,10	
		Rango intercuartil	.	
		Asimetría	-1,671	1,225
		Curtosis	.	.

a. Leq_mod es constante cuando Tipo_via = colectora secundaria. Se ha omitido.

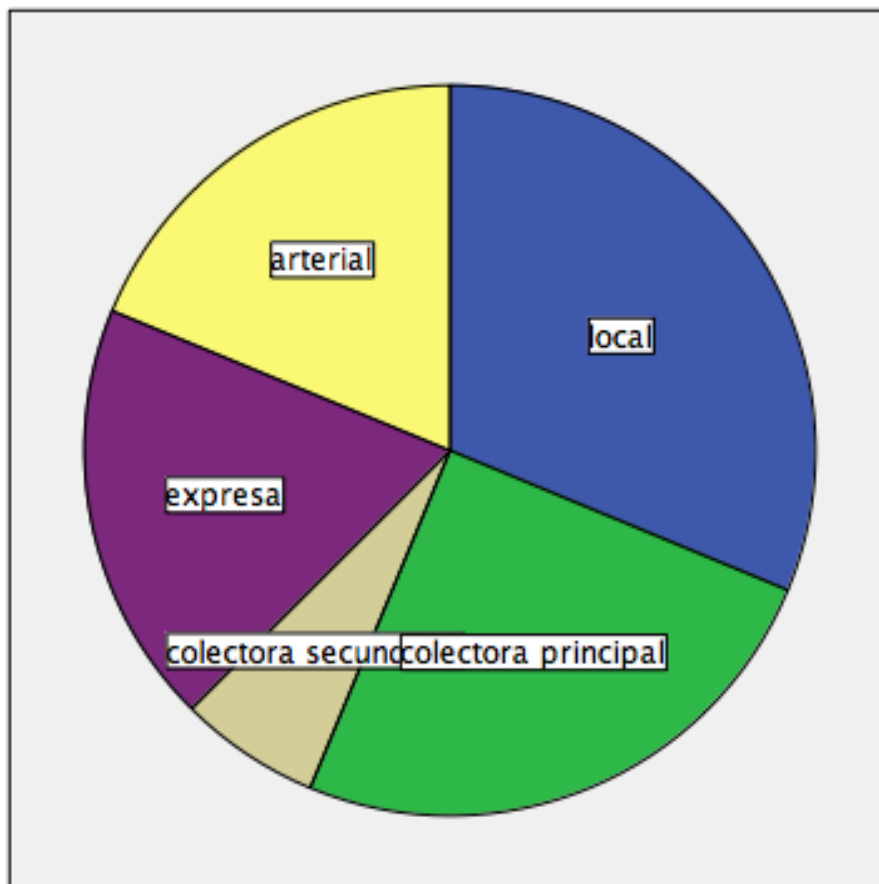
ANEXO 5

GRÁFICO DE VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE LEQ MODELADO PARA CADA TIPO DE VÍA



ANEXO 6

GRÁFICO DE LA DISTRIBUCIÓN DEL ESPACIO MUESTRAL ESTABLECIDO PARA LA INVESTIGACIÓN



ANEXO 7

GRÁFICO DE CAJAS Y BIGOTES QUE MUESTRA LA DISPERSIÓN DE LOS DATOS MODELADOS POR TIPO DE VÍA

