



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN,
ESPECIALIDAD EN SONIDO E IMAGEN

Título del proyecto:

CORRELACIÓN NIVELES SONOROS-VARIABLES DE
TRÁFICO Y AJUSTES CON MODELOS DE PREDICCIÓN
NMPB y CNOSSOS.

Mikel Redondo Corchón

Miguel Arana Burgui

Pamplona, 27/06/2013

Índice

1. Memoria	6
1.1 Objetivo	6
1.2 Introducción.....	6
1.3 Antecedentes.....	7
1.4 Directiva 2002/49/CE.....	8
1.4.1 Objetivo	8
1.4.2 Ámbito de aplicación.....	8
1.4.3 Definiciones.....	8
1.4.4 Aplicación y responsabilidades	9
1.4.5 Indicadores de ruido	10
1.4.6 Métodos de evaluación	10
1.4.7 Elaboración de mapas estratégicos de ruido.....	12
1.4.8 Planes de acción.....	12
1.4.9 Información a la población	12
1.4.10 Publicación de datos	13
1.5 Modelos anteriores	13
1.5.1 CoRTN. Modelo Gran Bretaña.....	13
1.5.2 NMPB. Modelo francés.....	13
1.5.3 RLS-90. Modelo alemán	14
1.5.4 Statens Planverk. Modelo Países Nórdicos	15
1.5.4.1 Statens Planverk 48	15
1.5.4.2 Statens Planverk 96	15
1.5.5 Comparación de los modelos.....	16
1.6 Estandarización de modelos	18
2 CNOSSOS	19
2.1 Introducción.....	19
2.2 Definiciones y símbolos de CNOSSOS-EU.....	22
2.2.1 Punto de origen.....	22
2.2.2 Fuente lineal / Segmentación fuentes lineales.....	22
2.2.3 Propagación del sector / ángulo de visión	22
2.2.4 Vehículo equivalente	23
2.2.5 Modelado del vehículo	23
2.2.6 Modelo de Tráfico	23
2.2.7 Receptor.....	23

2.2.8 Plano de propagación.....	24
2.2.9 Propagación	24
2.2.10 Camino del rayo	25
2.2.11 Potencia del sonido.....	26
2.2.12 Efectos Meteorológicos	26
2.2.13 Información Meteorológicos	26
2.2.14 Definición de banda y rangos de frecuencia.....	27
2.2.15 Indicadores de ruido	28
2.3 Emisión de ruido para tráfico rodado	30
2.3.1 Descripción de la fuente sonora.....	30
2.3.1.1 Clasificación de los vehículos	30
2.3.1.2 Número y localización de fuentes equivalentes de sonido.....	32
2.3.1.3 Descripción de los asfaltos	33
2.3.2 Emisión de la potencia sonora	35
2.3.2.1 Consideraciones generales (Vehículo individual)	35
2.3.2.2 Condiciones de referencia	36
2.3.2.3 Fuente inferior y fuente superior	36
2.3.2.4 Potencia acústica instantánea de la fuente	37
2.3.2.5 Flujo del tráfico	38
2.3.3 Rolling Noise.....	38
2.3.3.1 Corrección neumáticos de clavos	40
2.3.3.2 Corrección efecto de la temperatura del aire en el ruido de rodadura.....	41
2.3.4 Propulsion Noise	42
2.3.4.1 Efecto del gradiente de la carretera	43
2.3.5 Efecto de la aceleración y deceleración de los vehículos.....	45
2.3.6 Efecto del tipo de superficie de la carretera	45
2.3.6.1 Principios generales.....	45
2.3.6.2 Efecto de la edad sobre las propiedades del ruido de rodadura.....	47
2.3.7 Nivel de Presión Sonora en el receptor	47
3 PROPAGACIÓN DEL SONIDO	48
3.1 Ámbito y aplicación del método.....	48
3.2 Configuración del modelo	49
3.2.1 Definiciones.....	49
3.2.2 Consideraciones geométricas	49
3.2.2.a Segmentación de la fuente	49
3.2.2.b Trayectorias de propagación.....	50
3.2.2.c Cálculo del plano medio	50

3.2.2.d Reflexiones en fachadas de edificios y otros obstáculos verticales.....	51
3.2.3 Modelo de propagación del sonido.....	51
3.2.3.a Cálculo aproximado.....	51
3.2.3.b Proceso de cálculo.....	52
3.2.3.c Nivel de sonoro en condiciones favorables (LF) para una camino (S,R) ...	52
3.2.3.d Nivel de sonoro en condiciones homogéneas (LH) para una camino (S,R)	52
3.2.3.e Nivel de sonoro a largo plazo para una camino (S,R).....	53
3.2.3.f Nivel de sonido “a largo plazo” en el punto R para todas los caminos.....	53
3.2.3.g Nivel de sonido “a largo plazo” en el punto R en decibelios A (dBA).....	54
3.3 Análisis Propagación.....	54
3.3.1 Receptor.....	54
3.3.2 Trayectorias elementales de propagación.....	55
3.3.2.a Trayectoria Tipo 1.....	55
3.3.2.b Trayectoria Tipo 2.....	55
3.3.2.c Trayectoria Tipo 3.....	57
3.3.2.d Trayectoria Tipo 4.....	58
3.4 Cálculo de una trayectoria elemental.....	58
3.4.1 Divergencia geométrica.....	58
3.4.2 Absorción atmosférica.....	59
3.4.3 Efecto del suelo.....	59
3.4.3.a Altura representativa sobre el suelo.....	59
3.4.3.b Caracterización acústica de suelo.....	60
3.4.3.c Cálculos en condiciones homogéneas.....	62
3.4.3.d Cálculos en condiciones favorables.....	63
3.4.4 Difracción.....	64
3.4.4.a Principios generales.....	65
3.4.4.b Difracción pura.....	67
3.4.4.c Calculo de las diferentes trayectorias.....	67
3.4.4.d Calculo de la atenuación A_{dif}	70
3.4.4.e Escenarios bordes verticales.....	71
3.4.5 Reflexiones sobre los obstáculos verticales.....	72
3.4.5.a Atenuación a través de la absorción.....	72
3.4.5.b Atenuación a través de la retro difracción.....	73
4. Dispositivo experimental y toma de datos.....	75
4.1 Dispositivo Experimental.....	75
4.1.2 Sonómetro.....	75
4.1.2 Micrófono.....	75

4.1.3	Calibrador sonoro	75
4.1.4	Software.....	75
4.1.5	Trípode	75
4.2	Descripción general. Toma de medidas.....	76
4.2.1	Puntos de medida.....	76
4.2.2	Aforación.....	77
4.2.3	Exportación de medidas.....	78
4.3	Descripción de caso práctico	78
4.3.1	Calculo del $L_{Aeq,T}$ medido/real	79
4.3.2	Calculo del $L_{Aeq,T}$ predicho por CNOSSOS	80
5.	Resultados y Análisis	94
5.1	L_w , eq, line (1h) por categoría y velocidad.....	94
5.1.1	Categoría 1.....	94
5.1.2	Categoría 3.....	101
5.1.3	Categoría 4a y 4b.....	102
5.2	L_w , eq, line (1h) vs tiempo de medida.....	104
6.	Aplicación informática para el cálculo de CNOSSOS.....	106
7.	Conclusiones.....	109
	Anexo	110
	Referencias	114

1. Memoria

1.1 Objetivo

En este proyecto se pretende estudiar el nuevo modelo armonizado europeo de predicción del ruido ambiental CNOSSOS (Common Noise aSSessment methOdS, CNOSSOS-EU). Se comparará con algunos modelos nacionales previos. Se mostrarán los resultados de múltiples medidas acústicas tendentes a caracterizar la potencia acústica de las fuentes del tráfico rodado y su ajuste con las predicciones, tanto del CNOSSOS como del modelo francés NMPB. Finalmente, se estudiará, la viabilidad de la extrapolación de Intensidades Medias Horarias (IMH) a Intensidades Medias Diarias (IMD) según la tipología de las vías, así como los ajustes de niveles sonoros ambientales y predicciones de CNOSSOS y NMPB.

1.2 Introducción

La sensibilización de la sociedad por la contaminación acústica ha motivado la aparición de normativas que regulan los efectos nocivos del ruido sobre el bienestar de las personas. La más importante, sin duda, fue la Directiva Europea sobre Ruido Ambiental del 25 de Junio de 2002 [1]. Tras ella y como transposición de la misma nos encontramos con la Ley del Ruido del 17 de Noviembre de 2003 [2] y sus reglamentos de aplicación: RD 1513/2005 [3] y RD 1367/2007 [4].

La multiplicidad de modelos de cálculo existentes en los diferentes países europeos (por ejemplo: NMPB [5], RLS [6], Nordic [7], CoRTN [8], etc. para el ruido de tráfico rodado) dificultaba la puesta en común de los mapas de ruido elaborados y la consiguiente intercomparación. Puesto que uno de los principios de la Directiva era el armonizar los estudios en todos los países miembros, la Dirección General de Medioambiente de la Unión Europea encargó al Joint Research Centre (a través del programa NOISE II) la preparación de un método (modelo) común para la predicción del ruido, tanto de tráfico rodado como ferroviario, aéreo e industrial. Actualmente, este modelo (Common Noise aSSessment methOdS, CNOSSOS-EU [9]) es un draft y está en discusión y análisis previo a su aprobación como modelo oficial europeo. Sin embargo, su implementación en los programas de cálculo no será ya posible antes de la elaboración de la tercera fase de los mapas de ruido (julio de 2017).

En el presente trabajo se ha llevado a cabo una amplia campaña de medidas del ruido ambiental, tanto en espacios urbanos como interurbanos. Las medidas implican no solo niveles globales de banda ancha sino también en bandas de tercio de octava desde 25 Hz a 10 KHz, con la finalidad de analizar el ajuste del nuevo modelo CNOSSOS. Se analizará también la viabilidad de la extrapolación de niveles de corta duración (30-60 minutos) a valores diarios, en función de la tipología de las vías. El análisis se llevará a cabo para el modelo de fuente, no involucrando (salvo su incidencia más simple) al modelo de propagación.

1.3 Antecedentes

Los antecedentes a CNOSSOS se encuentran en la Directiva Europea sobre evaluación y gestión del ruido ambiental (2002/49/CE) la cual define las acciones obligatorias para los Estados miembros de la UE relativas a la creación de mapas estratégicos de ruido (MER), de las principales carreteras, vías férreas, y principales aeropuertos. La Directiva Europea se traduce a nivel legislativo nacional en la Ley del ruido 37/2003.

La Ley del ruido y la Directiva Europea establecieron la elaboración de estos mapas estratégicos de ruido, en aglomeraciones, que superen los 250.000 habitantes (primera fase) y los 100.000 habitantes (segunda fase y sucesivas). Los mapas estratégicos de ruido, en su primera fase, debieron concluirse para junio de 2007. Los resultados de la segunda fase se presentaron a la UE en el año 2012. Respecto a grandes ejes viarios (GEV), se consideraron como tales los que tenían un aforo superior a 6 millones de vehículos al año (primera fase) y los que tienen un aforo superior a 3 millones de vehículos al año (segunda fase y sucesivas).

La finalidad de los mapas estratégicos de ruido definidos por la Directiva Europea y la Ley del Ruido (en el estado Español) es homogeneizar los resultados de toda Europa, utilizando los mismos métodos de cálculo y análisis, siendo mínimos los condicionantes para calcularlos. Deben representarse con los indicadores comunes L_{den} , L_d , L_e , L_n .

Un mapa estratégico es un mapa diseñado para poder evaluar globalmente la exposición al ruido en una zona determinada o para poder realizar predicciones globales para dicha zona. Constan de dos partes diferenciadas:

- Mapas de niveles sonoros: son mapas de líneas isófonas realizados a partir del cálculo de niveles sonoros en puntos receptores que abarcan toda la zona de estudio.
- Mapas de exposición al ruido en el que figuran los datos relativos a edificios, viviendas y población expuestos a determinados niveles de ruido en fachada de edificios, y otros datos exigidos por la Directiva 2002/49/CE y la Ley del Ruido.

Con esto se pretende evaluar la exposición al ruido de las personas que viven en las zonas o vía próximas a las principales carreteras, vías férreas, zonas industriales y aeropuertos. Informar de los niveles de ruido a los cuales está expuesta la población, potenciar planes de acción adecuados así como evaluar la eficacia de las medidas correctoras tomadas para la reducción del ruido ambiental.

1.4 Directiva 2002/49/CE

El propósito de estas normativas es obtener mapas estratégicos que sirvan potenciar planes de acción contra el ruido. Para ello deben redactarse y publicarse en toda la Unión Europea, además de informar a la población sobre los niveles de ruido a los cuales están expuestos.

1.4.1 Objetivo

Tiene por objeto establecer un enfoque común destinado a evitar, prevenir o reducir con carácter prioritario los efectos nocivos, incluyendo las molestias de la exposición al ruido ambiental. Con este fin, se aplicarán progresivamente las medidas siguientes:

- a) Determinar la exposición al ruido ambiental, mediante la elaboración de mapas de ruido, mediante métodos de evaluación comunes a los Estados miembros.
- b) Poner a disposición de la población la información sobre el ruido ambiental y sus efectos.
- c) Adopción de planes de acción por los Estados con vistas a prevenir y reducir el ruido ambiental y mantener la calidad acústica del entorno.

Asimismo, la directiva tiene por objeto sentar unas bases que permitan elaborar medidas comunitarias para reducir los ruidos emitidos por las principales fuentes, en particular vehículos, carreteras, infraestructuras de ferrocarril, aeronaves.

1.4.2 Ámbito de aplicación

La directiva 2002/49/CE se aplicara al ruido ambiental al que estén expuestos los seres humanos, en particular en zonas urbanizadas, parques públicos u otras aglomeraciones, zonas tranquilas, en campo abierto, en las proximidades de centros escolares y hospitales, y en otros edificios y lugares vulnerables al ruido.

No se aplicará la directiva al ruido al cual están expuestas personas, por actividades domésticas, vecinos, en el lugar de trabajo ni en el interior de medios de transporte, así como tampoco a los ruidos debidos a actividades militares.

1.4.3 Definiciones

En la directiva europea se definen una serie de parámetros, los más significativos se muestran a continuación.

- a) Ruido ambiental: El sonido exterior no deseado o nocivo generado por las actividades humanas, incluido el ruido emitido por los medios de transporte, por el tráfico rodado, ferroviario y aéreo y por emplazamientos de actividades industriales.

- b) Efectos Nocivos: Los efectos negativos sobre la salud humana.
- c) Indicador de ruido: Una magnitud física para describir el ruido ambiental, que tiene una relación con un efecto nocivo.
- d) Evaluación: Cualquier método que permita calcular, predecir, estimar o medir el valor de un indicador de ruido o el efecto o efectos nocivos correspondientes.
- e) L_{den} (Indicador de ruido día –tarde-noche): Indicador de ruido asociado a la molestia global.
- f) L_{day} (Indicador de ruido diurno): Indicador de ruido asociado a la molestia durante el período diurno.
- g) $L_{evening}$ (Indicador de ruido vespertino): Indicador de ruido asociado a la molestia durante el período vespertino.
- h) L_{night} (Indicador de ruido nocturno): Indicador de ruido correspondiente a la alteración del sueño.
- i) Mapa de ruido: Presentación de datos sobre una situación acústica existente o pronosticada en función de un indicador de ruido, en la que se indicará el rebasamiento de cualquier valor límite vigente, el número de personas afectadas en una zona específica o el número de viviendas expuestas a determinados valores de un indicador de ruido en una zona específica.
- j) Mapa estratégico de ruido: Mapa diseñado para poder evaluar globalmente la exposición al ruido en una zona determinada, debido a la existencia de distintas fuentes de ruido, o para poder realizar predicciones globales para dicha zona.
- k) Planes de acción: Los planes encaminados a afrontar las cuestiones relativas al ruido y a sus efectos, incluida la reducción del ruido si fuese necesario.

1.4.4 Aplicación y responsabilidades

Los Estados miembro designarán las autoridades y entidades competentes, en los niveles adecuados, responsables de la aplicación de la Directiva 2002/49/CE, en particular las autoridades responsables de:

- a) La elaboración y, en su caso, aprobación de los mapas de ruido y planes de acción para aglomeraciones urbanas, grandes ejes viarios y ferroviarios así como grandes aeropuertos.
- b) La recopilación de los mapas de ruido y planes de acción.

1.4.5 Indicadores de ruido

Los estados miembros aplicarán el indicador promedio de ruido a largo plazo especificado en la Directiva 2002/49/CE Europea; este es el indicador día-tarde-noche, L_{DEN} definido por:

$$L_{DEN} = 10 \log \frac{1}{24} (12 \times 10^{L_{day}/10} + 4 \times 10^{L_{evening}/10} + 8 \times 10^{L_{night}/10}) \quad (I-1)$$

donde:

- L_{day} : Es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996-2:1987, determinado a lo largo de todos los períodos diurnos de un año
- L_{tarde} : Es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996-2:1987, determinado a lo largo de todos los períodos vespertinos de un año
- L_{night} : Es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996-2:1987, determinado a lo largo de todos los períodos nocturnos de un año.

Al día le corresponden 12 horas, a la tarde 4 horas y a la noche 8 horas. Los Estados miembros pueden optar por reducir el período vespertino en una o dos horas y alargar los períodos diurno y/o nocturno en consecuencia, siempre que dicha decisión se aplique a todas las fuentes, y que faciliten a la Comisión información sobre la diferencia sistemática con respecto a la opción por defecto.

Por lo tanto los Estados miembros decidirán cuándo empieza el día (y, por consiguiente, cuándo empiezan la tarde y la noche) y esa decisión deberá aplicarse a todas las fuentes de ruido; los valores por defecto son 7.00-19.00, 19.00-23.00 y 23.00-7.00 (hora local),

Un año corresponde al año considerado para la emisión de sonido y a un año medio por lo que se refiere a las circunstancias meteorológicas.

1.4.6 Métodos de evaluación

El método de evaluación se realizara mediante el uso de los valores L_{den} , L_{night} , pueden determinarse bien mediante cálculos o mediante mediciones (en el punto de evaluación). Las predicciones solo pueden obtenerse mediante cálculos.

- Si un Estado miembro dispone de métodos de cálculo o medición para la determinación de indicadores a largo plazo, podrá aplicarlos siempre y cuando los adapte a las definiciones de los indicadores, vistos en el punto anterior.

- Los métodos recomendados para los Estados miembros que no cuentan con métodos nacionales de cálculo y medición o para los que quieren cambiar a otros métodos son los siguientes:
 - Métodos de cálculo:
 - Los métodos recomendados, para los Estados miembros que no cuentan con métodos nacionales de cálculo o para los que quieren cambiar a otro método de cálculo, son los siguientes:
 - RUIDO INDUSTRIAL: ISO 9613-2: «Acoustics — Attenuation of sound propagation outdoors, Part 2: General method of calculation».
 - Para este método pueden obtenerse datos adecuados sobre emisión de ruido (datos de entrada) mediante mediciones realizadas según alguno de los métodos siguientes:
 - — ISO 8297: 1994 «Acoustics — Determination of sound power levels of multisource industrial plants for evaluation of sound pressure levels in the environment — Engineering method»,
 - — EN ISO 3744: 1995 «Acústica — Determinación de los niveles de potencia sonora de fuentes de ruido utilizando presión sonora. Método de ingeniería para condiciones de campo libre sobre un plano reflectante»,
 - — EN ISO 3746: 1995 «Acústica — Determinación de los niveles de potencia acústica de fuentes de ruido a partir de presión sonora. Método de control en una superficie de medida envolvente sobre un plano reflectante
 - ».
 - RUIDO DE AERONAVES: ECAC.CEAC Doc. 29 «Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports», 1997. Entre los distintos métodos de modelización de trayectorias de vuelo, se utilizará la técnica de segmentación mencionada en la sección 7.5 del documento 29 de ECAC.CEAC.
 - RUIDO DEL TRÁFICO RODADO: el método nacional de cálculo francés «NMPB-Routes-96 (SETRA-CERTULCPC-CSTB)», mencionado en el «Arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières, Journal officiel du 10 mai 1995, article 6» y en la norma francesa «XPS 31-133». Por lo que se refiere a los datos de entrada sobre la emisión, esos documentos se remiten al «Guide du bruit des transports terrestres, fascicule prévision des niveaux sonores, CETUR 1980».
 - RUIDO DE TRENES: el método nacional de cálculo de los Países Bajos, publicado en «Reken — en Meetvoorschrift Railverkeerslawaaai '96, Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 20 November 1996».
 - Métodos de medición:
 - ISO 1996-2: 1987
 - ISO 1996-1: 1982

1.4.7 Elaboración de mapas estratégicos de ruido

Los Estados miembros garantizarán mediante esta Directiva que para julio de 2007 se hayan elaborado y, en su caso aprobado por las autoridades competentes mapas estratégicos de ruido, correspondiente a todas las aglomeraciones con más de 250.000 habitantes y a todos los grandes ejes viarios cuyo tráfico supere los seis millones de vehículos al año, grandes ejes ferroviarios cuyo tráfico supere los 60.000 trenes al año, y grandes aeropuertos presentes en su territorio.

Se adoptaran las medidas necesarias por los Estados miembro para garantizar que a partir de Julio de 2012, y después cada cinco años, se hayan elaborado y aprobado por las autoridades competentes mapas estratégicos de ruido sobre la situación del año civil anterior, correspondiente a todas las aglomeraciones urbanas (con más de 100.000 habitantes) y a todos los grandes ejes viarios (con más de 3 millones de vehículos/año) y grandes ejes ferroviarios.

Los mapas estratégicos de ruido se revisarán, y en caso necesario se modificarán al menos cada cinco años a partir de la fecha de la elaboración.

1.4.8 Planes de acción

Los Estados miembros garantizarán que para julio de 2008, las autoridades competentes hayan elaborado planes de acción encaminados a afrontar, en su territorio, las cuestiones relativas al ruido y a sus efectos, incluida la reducción del ruido, si fuese necesaria en lugares próximos a:

- Ejes viarios con más de seis millones de vehículos al año.
- Ejes ferroviarios con un tráfico superior 60.000 trenes al año
- Aglomeraciones urbanas con más de 250.000 habitantes.

Así mismo los Estados miembro garantizan que para julio de 2013, las autoridades competentes hayan elaborado planes de acción, particulares para afrontar las prioridades que puedan ocasionarse como consecuencia de la superación de determinados valores límite.

1.4.9 Información a la población

Los Estados miembros velarán por que los mapas estratégicos de ruido que hayan realizado, y en su caso aprobado, y los planes de acción que hayan elaborado se pongan a disposición y se divulguen entre la población de acuerdo con la legislación comunitaria pertinente, en particular la Directiva 90/313/CEE, sobre la libertad al acceso de información.

Esta información deberá ser clara, inteligible y fácilmente accesible y deberá incluir un resumen en el que se recogerán los puntos principales.

1.4.10 Publicación de datos

La comisión creará una base de datos con la información relativa a los mapas estratégicos de ruido con el fin de facilitar la compilación de informes.

1.5 Modelos anteriores

1.5.1 CoRTN. Modelo Gran Bretaña

En el Reino Unido el método CoRTN (Calculation of Road Traffic Noise) es el modelo oficial para estimar los niveles de ruido producidos por una vía de tráfico rodado, el cual está contenido en el estándar “Noise Insulation Regulation” de 1988. En este modelo, el índice descriptor del nivel sonoro corresponde al descriptor estadístico percentil 10% L10. La distancia de referencia del modelo de emisión está a 10 metros de distancia del punto más cercano de una vía de dos carriles, asumiendo una fuente lineal que recibe todo el volumen de tráfico y está a 3,5 metros de este extremo, situado 0,5 metros de altura

$$LRE = 42,2 + 10 \times \log(q_1) + C_{vel} + C_{low} \quad (I-2)$$

donde:

- LRE : Nivel de emisión sonora a 10 metros (dBA)
- q_1 : Número de vehículos ligeros por hora.

La corrección para otras velocidades y tráfico compuesto viene dada por:

$$C_{vel} = 33 \times V + 40 + \frac{500}{V} + 10 \times \log \left(1 + 5 \times \frac{P}{V} \right) - 68,8 \quad (I-3)$$

siendo:

- C_{vel} : Corrección de la velocidad para vehículos ligeros y pesados (dBA)
- V : Velocidad media de los vehículos ligeros y pesados (Km/h)
- P : Porcentaje de vehículos pesados (%)

1.5.2 NMPB. Modelo francés

Este modelo determina el nivel de potencia acústica en función de la frecuencia L_{AWi} la densidad del tráfico, velocidad y tipo de vía, de una fuente puntual para vehículos ligeros y pesados. Posteriormente se introduce una serie de correcciones debido a factores que afectan a la propagación del sonido. El nivel sonoro se da para un solo vehículo, E_{lv} (ligero), E_{hv} (pesado) por hora mediante la ecuación:

$$L_{AWi} = L_{AW m} + 10 \times \log l_i + R_j + \Phi \quad (I-4)$$

donde:

- Φ : es la corrección del nivel sonoro.

- l_i : Longitud del tramo a medir, en metros.
- $L_{AW/m}$: Es el nivel total de potencia acústica por metro de vía en dB(A), asignado para fuentes sonoras puntuales mediante la ecuación:

$$L_{AW\ m} = 10 \times \log 10^{E_{lv}+10 \times \log Q_{lv}} + 10^{E_{hv}+10 \times \log Q_{hv}} + 20 \text{ (dBA)} \quad (I-5)$$

siendo:

- E_{lv} : Nivel sonoro de vehículos ligeros.
- E_{hv} : Nivel sonoro de vehículos pesados.
- Q_{lv} : Volumen de tráfico ligero durante el periodo de referencia.
- Q_{hv} : Volumen de tráfico pesado durante el periodo de referencia

1.5.3 RLS-90. Modelo alemán

Método para predecir los niveles de ruido producidos por el tráfico rodado. El nivel de presión sonora que se predice es un nivel de referencia, llamado LME (Level Mean Emission) que se obtiene aplicando correcciones al nivel básico definido a una distancia de 25 metros del centro de la vía y a 4 metros de altura. Además el método se modela con una vía de dos carriles, donde cada uno de ellos recibe la mitad del volumen de tráfico y asume una fuente lineal ubicada en el centro de los dos carriles a 0,5 metros de altura [RLS90/DIN18005]. Las características del modelo de emisión en su versión simplificada se definen.

$$LME = L_{25} + C_{vel} + C_{pav} \quad (I-6)$$

$$L_{25} = 37,3 + 10 \times \log Q \times 1 + 0,082 \times P \quad (I-7)$$

donde:

- L_{25} : Nivel Sonoro Base a 25 metros (dBA)
- Q : Densidad del tráfico (Vehículos/hora)
- P : Porcentaje de vehículos pesados (%)

La corrección para una velocidad (C_{vel}) distinta de la asumida por defecto (100 Km/h para ligeros y 80 Km/h para pesados), es la siguiente:

$$C_{vel} = L_{ligeros} - 37,3 + 10 \times \log \frac{100 + 10^{0,1 \times C} \times P}{100 + 8,23 \times P} \quad (I-8)$$

donde:

$$L_{ligeros} = 27,8 + 10 \times \log 1 + 0,02 \times V_{ligeros}^3 \quad (I-9)$$

$$L_{pesados} = 23,1 + 12,5 \times \log V_{pesados} \quad (I-10)$$

$$C = L_{pesados} - L_{ligeros} \quad (I-11)$$

donde:

- $V_{ligeros}$: Velocidad vehículos ligeros
- $V_{pesados}$: Velocidad vehículos pesados

1.5.4 Statens Planverk. Modelo Países Nórdicos

1.5.4.1 Statens Planverk 48

Statens Planverk 48 es el método oficial de predicción de ruido del tráfico rodado para los países nórdicos: Dinamarca, Finlandia, Noruega y Suecia. Su versión inicial data de 1989 y ha sido actualizado en 1992. El nivel de emisión básico $L_{básico}$ ha sido estimado a una distancia de 10 metros del centro de una vía de dos carriles, con una altura de 1,5 metros sobre el terreno para un plano horizontal, con una carretera recta e infinitamente larga, con asfalto normal y tráfico fluido y sin presencia de obstáculos o reflexiones, exceptuando las del suelo. La fuente lineal se ubica a 0,5 metros sobre el pavimento. El nivel de emisión de referencia LRE se obtendrá por la adición de las correcciones que se apliquen a $L_{básico}$ según la intensidad real horaria, velocidad de los vehículos y porcentaje de vehículos pesados [12].

La situación básica específica, además de las consideraciones anteriormente expuestas, una circulación media de 24.000 vehículos por 24 horas, sin la presencia de vehículos pesados, tráfico fluido y una velocidad de 50 Km/hora. Para estas condiciones, $L_{básico}$ corresponde a:

$$LRE = L_{básico} + C_{vel} + C_{tráfico} + C_{pesados} \quad (I-12)$$

donde:

- LRE : Nivel de emisión de referencia (dBA)
- $L_{básico}$: Nivel sonoro base a 10 metros = 68 dBA
- C_{vel} : Corrección por velocidad de los vehículos ligeros (dBA)
- $C_{tráfico}$: Corrección de la intensidad de circulación del tráfico rodado (dBA)
- $C_{pesados}$: Corrección para vehículos pesados (dBA)

1.5.4.2 Statens Planverk 96

Este método es una actualización del modelo anteriormente descrito por lo que obedece a las mismas variables y condiciones de evaluación, donde el rango de velocidad permitido para vehículos ligeros comienza a partir de los 30 (Km/h) y para los vehículos pesados está comprendido entre 30 – 90 (Km/h). El descriptor es el nivel sonoro continuo equivalente L_{Aeq} , evaluado a una distancia de 10 metros y una altura de 1,5 metros para un periodo de 24 horas, aunque puede ser evaluado para cualquier intervalo de tiempo.[12]

$$L_{Aeq} = 10 \times \log 10^{\frac{L_{Aeq,10m} \text{ ligeros}}{10}} + 10^{\frac{L_{Aeq,10m} \text{ pesados}}{10}} \quad (I-13)$$

donde:

$$L_{Aeq,10m} \text{ ligeros} = L_{AE,10m} \text{ ligeros} + 10 \times \log \frac{Q_l}{T} \quad (I-14)$$

$$L_{Aeq,10m} \text{ pesados} = L_{AE,10m} \text{ pesados} + 10 \times \log \frac{Q_p}{T} \quad (I-15)$$

siendo:

Q_l y Q_p : Número de vehículos ligeros y pesados respectivamente durante un intervalo de tiempo T (1 hora) en segundos.

Mediante la siguiente ecuación se obtiene el nivel de presión sonora para los vehículos que circulan a una velocidad de 40 km/h o superior.

$$L_{AE,10m} \text{ ligeros} = 73,5 + 20 \times \log \frac{V_l}{50} \quad (I-16)$$

Y para velocidades inferiores a 40 Km/h se utiliza la expresión

$$L_{AE,10m} \text{ ligeros} = 71 \quad (I-17)$$

En cuanto a los vehículos pesados para velocidades entre 50 Km/h y 90 Km/h

$$L_{AE,10m} \text{ pesados} = 81 + 30 \times \log \frac{V_p}{50} \quad (I-18)$$

Y para vehículos pesados a velocidades inferiores de 50 km/h

$$L_{AE,10} \text{ pesados} = 81 \quad (I-19)$$

1.5.5 Comparación de los modelos

La Figura 1 muestra el Nivel Sonoro Base ($L_{Aeq, 1h}$) normalizado a 10 metros de la vía para el paso de un vehículo ligero (L) o pesado (P) para tres de los modelos comentados, en función de la velocidad. El cálculo para un tráfico de Q vehículos hora requiere, únicamente, añadir el valor de $10 \cdot \log(Q)$.

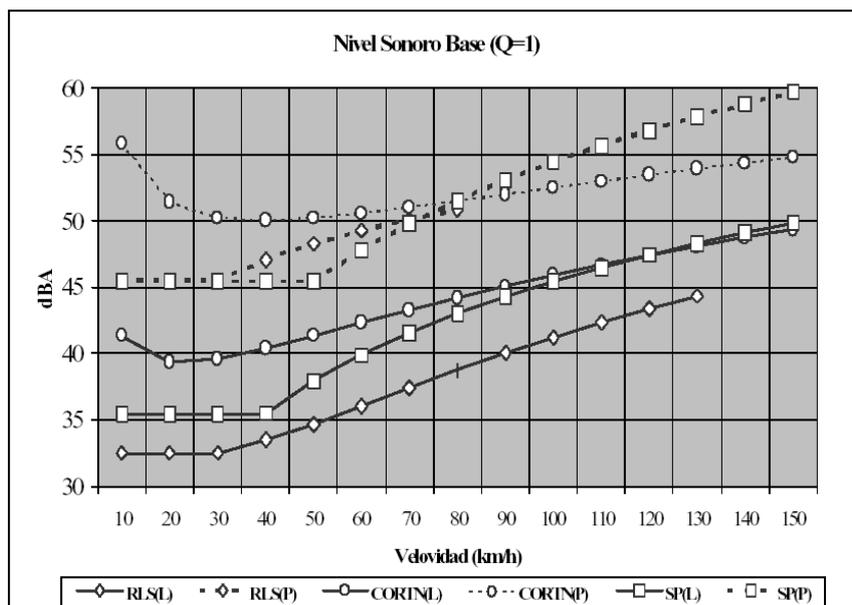


Figura 1. L_{eq} tráfico según modelos RL S90 – CoRTN - SP96.

En la siguiente tabla se muestran los diferentes modelos de fuente para los estándares descritos anterior mente. También se indican los descriptores de ruido, rango de velocidades, distancias de medida, horarios, (entre otros) considerados en cada modelo.

	CoRTN (Modelo Inglés)	RLS90 (Modelo Alemán)	SP96 (Modelo Nórdico)
Índice	L10 (1h), L10 (18h)	L_{Aeq} (Día) L_{Aeq} (Noche)	L_{aeq} , L_{AFqmax}
Velocidad (Km/h)	Máxima permitida	Máxima permitida. Rango permitido ligeros: 30 – 130 Rango permitido pesados : 30 – 80	Velocidad promedio. Rango permitido ligeros: > 30 Rango permitido pesados: 30 – 90
Distancia (m)	10	25	10
Altura (m)	0,5	4	1,5
Horario	1h (la hora más ruidosa), 18h	Día: 06 – 22 Noche: 22 - 06	24h (se puede realizar el cálculo para cualquier intervalo de t)
Vehículos pesados (T)		2,8	3,5
Correcciones	Velocidad superficie gradiente	Velocidad Superficie Gradiente Reflexiones	Velocidad Superficie Gradiente
Condiciones por defecto	Velocidad asumida 75 Km/h No pesados	Ligeros 100 Km/h Pesados 80 Km/h Asfalto liso $G < 5 \%$	Asfalto denso, liso, con más de 1 año de antigüedad, con máximo tamaño de lámina de 12-16mm, con temperatura entre 10° y 20°. Variación de 0,1 dB/°C

Tabla 1. Comparación de los distintos modelos de fuente Europeos

1.6 Estandarización de modelos

El JRC ha elaborado el Draft Report para la definición del marco metodológico de evaluación común CNOSSOS-EU dentro de los Estados Miembros de la Unión Europea. La definición del método CNOSSOS-EU es el resultado, entre otras acciones, del análisis de los principales métodos de evaluación de niveles sonoros. Dicho informe, además de describir los aspectos metodológicos del CNOSSOS-EU, incluye sugerencias sobre la aplicación de los métodos en dos niveles, simplificado y detallado para todos los Estados Miembros de la Unión Europea. Con el método de evaluación común CNOSSOS-EU el JRC pretende estandarizar y unificar los diferentes métodos para el cálculo y evaluación del ruido en los países Miembros de la Unión Europea.

El informe del JRC es el resultado de las discusiones y consensos alcanzados entre la DG ENV el JRC y un numeroso grupos de expertos sobre métodos de predicción de ruido ambiental y sobre la metodología de elaboración de mapas de ruido y planes de acción, en el marco de la aplicación de la Directiva 2002/49/EC (END). El objetivo fundamental de este proceso ha sido, y es, el establecimiento de una metodología común para el cálculo de niveles de ruido y la evaluación de la exposición de la población al ruido ambiental, de manera que los resultados obtenidos en cada Estado Miembro sean fiables y comparables entre sí, y permitan a las autoridades competentes establecer los planes de acción de lucha contra el ruido.

La vocación del CNOSSOS-EU debe ser la de convertirse en el método europeo de cálculo de niveles de ruido ambiental. En este sentido, el planteamiento general y el desarrollo realizado de la formulación de cálculo de niveles sonoros permiten realizar evaluaciones muy precisas de los mismos, contemplando todos los aspectos relevantes que intervienen en la caracterización de las fuentes de ruido (tráfico viario, tráfico ferroviario, tráfico aéreo y ruido industrial) y en la propagación del sonido entre fuentes y receptores.

2 CNOSSOS

2.1 Introducción

De conformidad con el artículo 6 del END (Directiva sobre el Ruido Ambiental. Castellano DRA, Ingles END), la Comisión estableció un método común de evaluación (CNOSSOS-EU), para determinar los indicadores de ruido. Hasta que no se dispongan de métodos armonizados, la Directiva propuso la utilización de métodos provisionales, pero los Estados miembros pueden emplear asimismo sus propios métodos.

La Comisión llevó a cabo una evaluación del grado de comparabilidad de los resultados generados por los diferentes métodos durante la primera ronda de mapas estratégicos de ruido (2006-2007). Según ese análisis, se estableció que los métodos nacionales de evaluación diferían significativamente de los métodos provisionales. Por tanto, la Comisión empezó a elaborar en 2008 métodos de evaluación armonizados (CNOSSOS-EU).

Las evaluaciones muestran que sigue siendo difícil presentar cifras comparables sobre el número de personas expuestas a niveles de ruido excesivos. Entre otras dificultades cabe señalar las diferentes formas existentes en relación con la recogida, la calidad y la disponibilidad de los datos, así como con los métodos de evaluación utilizados.

Por tanto, los resultados obtenidos por los Estados miembros de la UE son muy variables. En un marco armonizado el método o métodos, que tengan en cuenta las especificaciones sectoriales, conducirá finalmente al nivel de comparabilidad necesario.

En 2008, la Comisión empezó a elaborar métodos armonizados para evaluar la exposición al ruido (de conformidad con el artículo 6, apartado 2 de la END). El proyecto titulado CNOSSOS-EU (métodos comunes de evaluación del ruido en Europa), dirigido por el Centro Común de Investigación, proporcionará la base técnica para la preparación de una decisión de ejecución de la Comisión.

CNOSSOS-EU está siendo desarrollado por la Dirección General del Centro Común de Investigación (DG JRC) en estrecha colaboración con el Comité Técnico de CNOSSOS-EU. Este Comité se constituyó de acuerdo con el Regulatory Noise Committee de la DG ENV, está compuesto por personas expertas nominadas por los EM, e incluye, además, expertos que participaron durante la fase preparatoria de desarrollo de CNOSSOS-EU.

La elección del modelo de propagación de CNOSSOS-EU para realizar los Mapas Estratégicos de Ruido se basó en un número de test de casos ideales. En general se evaluaron tres métodos (HARMONOISE, NMPB 2008 e ISO 9613-2) frente a cinco indicadores:

- Precisión
- Velocidad de cálculo
- Flexibilidad
- Sencillez
- Número de parámetros

Objetivo del CNOSSOS-EU es desarrollar e implementar un método consistente de evaluación, capaz de proporcionar resultados comparables de los Mapas Estratégicos de Ruido realizados por los Estados Miembros al cumplir con sus obligaciones de la END.

Requisitos del CNOSSOS-EU:

1. El método debe ser diseñado para producir mapas de ruido verosímiles que muestren resultados fiables.
2. Se deben definir con precisión los focos / el alcance que deben considerarse en los MER.
3. Se reconoce que algunos parámetros de entrada son esenciales para la realización de los mapas, pero que hay otros parámetros de entrada que sólo son significativos en situaciones locales específicas. Para dar coherencia al proceso, los grupos de trabajo deberán identificar cuáles son los parámetros de entrada esenciales. A efectos de este método, un parámetro se considera esencial si el rango de valores del parámetro que puede tomar en toda Europa presenta variaciones, en un año promedio de L_{den} o L_{night} en una posición de receptor particular, de más de ± 2.0 dB (A) 95% C.I. (si todos los demás parámetros no se modifican). Los parámetros que no se consideran esenciales deben tener un valor de entrada por defecto definido.
4. En la aplicación del método, los datos de entrada para los parámetros esenciales deben reflejar la situación real y no se debe confiar en los valores de entrada por defecto o en supuestos del tipo de los que se encuentran en la Guidelines for Competent Application de CNOSSOS-EU.
5. Teniendo en cuenta el requisito anterior (3), se debe definir la precisión requerida para los datos de entrada esenciales.
6. Se deben definir las condiciones para considerar en el modelo la información de los obstáculos en el camino de propagación.
7. Se debe dar una definición precisa sobre cómo realizar las evaluaciones de la exposición al ruido ambiental, para cumplir con el requisito (1). Esto se aplica tanto a la exposición en viviendas, como a la de territorio y a las de población
8. Los grupos de trabajo de focos deberían tener en cuenta en todas sus decisiones los costes que suponen a los EM la obtención de los datos de entrada reales requeridos y el proceso de realización periódica de los MER.

Esto se aplica especialmente a:

- La definición de los focos de ruido de que deberán ser considerados según el punto (2) anterior.
- La definición de los parámetros de entrada esenciales mencionados anteriormente (3)
- La especificación de los requisitos de calidad de los datos de entrada mencionados en el punto (5) anterior.

Próximos pasos de CNOSSOS-EU

- El 31 de octubre de 2011 los estados miembros de la UE, ofrecieron sus comentarios por escrito al borrador de CNOSSOS-EU.
- En diciembre de 2011 se finaliza la descripción de la parte central de CNOSSOS-EU que servirá de base para el texto legal de modificación del Anexo II de la END.
- Para el primer trimestre de 2012 se espera que la Implementing ACT, modifique el Anexo II de la END.
- Una vez concluido esto se iniciara la Fase II de CNOSSOS-EU 2012-2015 con el objetivo final de tener CNOSSOS-EU en pleno funcionamiento en los Estados Miembros de la UE para la 3ª ronda de Mapas Estratégicos de Ruido, es decir, en 2017.



Figura 2. Cronología de la END

2.2 Definiciones y símbolos de CNOSSOS-EU

2.2.1 Punto de origen

Una fuente puntual es una representación adimensional elemental de una fuente de ruido, situada en un lugar específico en el espacio. La intensidad en el punto de origen se expresa exclusivamente por la direccionalidad del nivel de potencia sonora $L_{w, 0, dir}$ en bandas de frecuencia en una dirección específica del espacio. Todos los parámetros relevantes que definen la intensidad de la fuente se incorporan, incluyendo la directividad horizontal y vertical.

2.2.2 Fuente lineal / Segmentación fuentes lineales

La trayectoria de una fuente lineal, se aproxima al movimiento de una fuente puntual. A efectos prácticos, una fuente lineal se puede aproximar por una serie de segmentos. Sin embargo, idealmente, podría ser representado por una curva en el espacio.

Una fuente lineal se caracteriza por una distribución continua de fuentes puntuales.

En la práctica, la distribución continua de fuentes puntuales se sustituye por una distribución discreta, es decir, fuentes equivalentes a lo largo de una línea de origen.

El proceso de segmentación consiste en:

- 1) La división de la fuente lineal en pequeños segmentos lineales de fuente y
- 2) La sustitución de los segmentos por fuentes puntuales equivalentes.

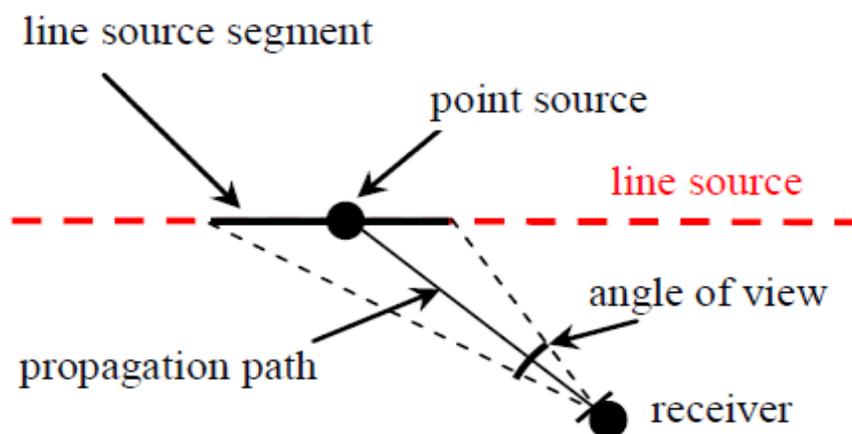


Figura 3. Fuente lineal, segmento fuente lineal, trayecto de propagación y el ángulo de visión.

2.2.3 Propagación del sector / ángulo de visión

El ángulo entre el receptor y los extremos del segmento de la fuente lineal, se conoce con el nombre de ángulo de visión. (Figura 3).

Sector de la propagación homogénea

Un sector de propagación se considera homogéneo si:

- 1) La potencia de la fuente es casi constante a lo largo del trayecto de la fuente lineal
- 2) La propagación se atenúa dentro del sector, variando lentamente con la posición, a lo largo de la posición lineal de la fuente.

Dentro de un sector de propagación homogéneo, el segmento de fuente lineal puede ser reemplazado por una sola fuente en un punto equivalente.

2.2.4 Vehículo equivalente

Un vehículo equivalente es un vehículo ideal en cuanto a propiedades acústicas, correspondiente a la media de un conjunto de vehículos reales que se desplazan a lo largo de una vía.

2.2.5 Modelado del vehículo

Descripción acústica de un solo vehículo, moviéndose a una velocidad y aceleración específicas. Un solo vehículo puede estar compuesto por varios subsistemas, con fuentes de diferente fuerza, posición, las cual se definen en términos de nivel de potencia acústica y directividad.

2.2.6 Modelo de Tráfico

Descripción acústica del flujo de tráfico, basado en los niveles equivalentes de potencia sonora de un solo vehículo en movimiento. En el modelo de tráfico, la potencia acústica específica se combina con datos estadísticos, produciendo una emisión de ruido equivalente para cada sub-fuente, con el fin de producir la intensidad de la fuente.

Nota: Como un solo vehículo puede ser representado por un conjunto de fuentes puntuales a diferentes alturas, el modelo resultante de tráfico consistirá en una serie de líneas de las fuentes superpuestas

2.2.7 Receptor

Se calculara el nivel de intensidad sonora en un solo punto. Se debe distinguir entre campo libre, donde las vías de propagación en los receptores se dan en todas las direcciones (360°) y los receptores que evalúan la energía acústica entre edificios, estos últimos tendrá un ángulo de visión total de 180° y una bisectriz perpendicular a la fachada.

2.2.8 Plano de propagación

Un plano de propagación, es un plano vertical que pasa a través de la fuente y del receptor. La intersección del plano de propagación con la superficie, está representada por una serie de elementos que simulan el terreno, edificios y barreras. El efecto de las reflexiones de la tierra, de las difracciones sobre los obstáculos y refracciones meteorológicas se puede predecir con suficiente exactitud.

2.2.9 Propagación

El trayecto de propagación se define como la proyección de un plano de propagación en el plano horizontal. Los trayectos de propagación son esencialmente una vista proyectada en dos dimensiones.

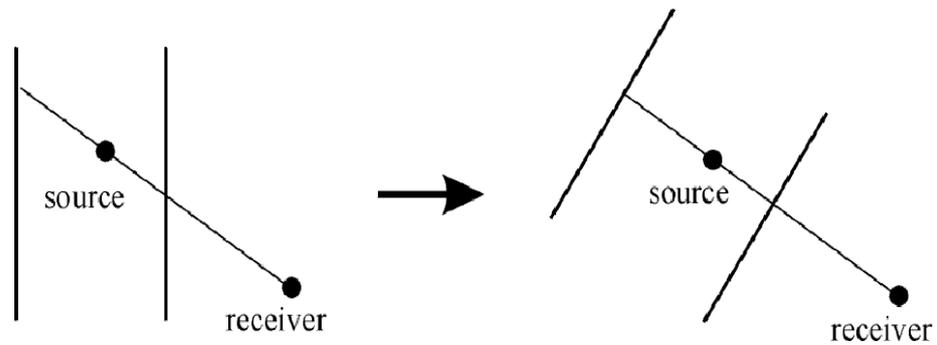


Figura 4. Ilustración aproximada en 2d: La situación de las barreras con un ángulo respecto a la línea de fuente-receptor (Izquierda), se sustituye por barreras perpendiculares a la línea de fuente-receptor (Derecha).

Los caminos de propagación se pueden clasificar de acuerdo a sus características geométricas:

- **Propagación directa** son líneas rectas que unen la fuente con el receptor directamente. Esto no implica necesariamente que la fuente está a la vista del receptor: la trayectoria de propagación del sonido pueden pasar por encima de los obstáculos que no se encuentran en nuestra línea de visión.
- **Propagación mediante reflexiones** son producidas por los obstáculos verticales. Se supone que tales caminos obedecer las leyes de la reflexión especular en el plano horizontal. Nótese que las reflexiones del suelo se tienen en cuenta por el modelo de punto a punto y no debe considerarse como trayectos de propagación independientes.
- **Propagación lateral difractada** es generada por los bordes verticales de obstáculos, para fuentes extensas (carreteras, ferrocarriles y aviones) está propagación suelen tener una contribución insignificante sobre los niveles sonoros totales y por lo tanto, se puede omitir.
- **Propagación por combinación** son rutas que contienen combinaciones de reflexiones y difracciones debido a obstáculos verticales.

2.2.10 Camino del rayo

El camino de propagación consiste en el conjunto de trayectorias que toman los rayos sonoros. La más corta de estas trayectorias es llamada "trayectoria del rayo principal"; esta puede ser directa (visión de la fuente por parte del receptor), reflejada, difractada o incluir cualquier combinación de éstas.

La principal diferencia entre trayectoria de los rayos y las trayectoria de propagación es la forma en que se suman las diferentes contribuciones: la trayectoria de propagación, se llevan a cabo mediante la adición de las energías del sonido $|p|^2$, mientras que la trayectoria de los rayos, es la adición de presiones del sonido p .

Crossos-UE es básicamente un método en 2.5D, en el sentido de que:

- 1) Se opera en un modelo geométrico 2.5D, que consiste en un conjunto conectado de superficies que son o bien casi horizontales o casi verticales. Las superficies casi horizontales incluyen terreno, azoteas de los edificios y pavimentos. Las superficies casi verticales, son las barreras y fachadas de los edificios.
- 2) Los trayectos de propagación están contruidos en 2D, en el plano horizontal e incluyen rutas directas, reflejadas y difractadas. Los caminos directos incluyen los rayos difractados sobre los obstáculos. Las trayectorias reflejadas provienen de las superficies casi verticales. Los caminos difractados vienen de los bordes verticales.
- 3) Cada uno de los caminos de propagación encontrados, se convierte en un plano de propagación, que se deriva en la intersección de un plano vertical a través de la trayectoria de propagación con el modelo geométrico. El resultado es una sección transversal vertical que se utiliza como la entrada del módulo de punto-a-punto.

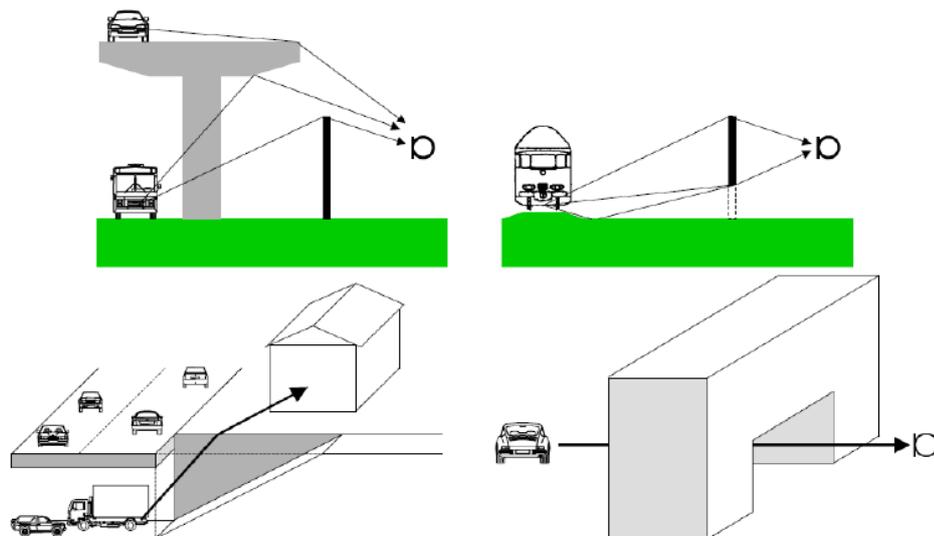


Figura 5. Ejemplos de trayectorias de rayos en geometrías complejas.

2.2.11 Potencia del sonido

En el modelo de Cnossos-UE, la emisión acústica de todas las fuentes se expresa como la potencia sonora emitida en condiciones de campo libre, es decir, excluyendo los efectos de todos los obstáculos cercanos. En general, y particularmente para las fuentes cerca del suelo.

2.2.12 Efectos Meteorológicos

La velocidad del viento y los gradientes de temperatura del aire causan la refracción de la trayectoria de los rayos. Para un cálculo preciso de los efectos de propagación, como la atenuación y reflexión de tierra, la definición de la trayectoria del rayo deben cumplir con las condiciones meteorológicas, que son representativas de cada lugar. Por lo tanto, se hace una distinción entre la propagación a favor del viento (refracción hacia abajo), la propagación en condiciones neutras (camino recto de propagación) y propagación en contra del viento (refracción hacia arriba). Gradientes de temperatura positivos ("inversión") tienen efectos similares a las condiciones a favor del viento.

2.2.13 Información Meteorológicos

Dado que la definición de la trayectoria del rayo depende de las condiciones meteorológicas, valores estadísticos sobre los gradientes de temperatura, velocidades y direcciones del viento en relación con la fuente. El receptor debe recoger todos estos valores. Además, las condiciones meteorológicas, tales como nieve, temperatura y precipitaciones influyen en la potencia acústica de las fuentes. Estos datos de entrada puede resultar demasiado difícil de obtener, en cuyo caso los parámetros asociados se pueden simplificar.

En la práctica, ya que las condiciones meteorológicas, velocidad y dirección del viento, pueden variar rápidamente con el tiempo, es necesaria una clasificación estadística de estas condiciones meteorológicas para su modelado.

Definiciones de los términos utilizados para las condiciones atmosféricas:

- Condiciones atmosféricas homogéneas ("Condiciones homogéneas"):

Condiciones atmosféricas donde la velocidad efectiva de las ondas de sonido se puede considerar como constante en todas las direcciones y en cualquier punto de la propagación en el espacio. En estas condiciones, los rayos de sonido son segmentos rectos.

- Condiciones atmosféricas de refracción hacia abajo ("Condiciones favorables"):

Condiciones atmosféricas donde la velocidad efectiva de las ondas sonoras aumenta con la altura, en la dirección de propagación. Estas condiciones dan lugar generalmente a niveles sonoros superiores en el receptor, a los observados en condiciones atmosféricas homogéneas para una fuente de sonido idéntica. Los rayos de sonido se curvan hacia el

suelo.

- Condiciones atmosféricas de refracción hacia arriba ("Condiciones desfavorables"):

Condiciones atmosféricas donde la velocidad efectiva de las ondas sonoras disminuye con la altura en la dirección de propagación. Estas condiciones dan lugar generalmente a niveles sonoros inferiores en el receptor, a los observados en condiciones atmosféricas homogéneas para una fuente de sonido idéntica. Los rayos de sonido se curvan hacia el cielo.

Nota: El CNOSSOS-UE no propone fórmulas de cálculo de las condiciones desfavorables.

- Condiciones a largo plazo incidencia de la refracción baja (u ocurrencia de condiciones favorables).

Probabilidad de ocurrencia de condiciones atmosféricas favorables durante un período largo, en una dirección dada y para el intervalo de referencia considerado. Este valor es adimensional y varía entre 0 y 1.

2.2.14 Definición de banda y rangos de frecuencia

El método de Cnossos-UE es válido en el rango de frecuencia entre 125 Hz y 4 kHz para el tráfico rodado.

Los resultados se proporcionan en 1/3-octava. Como las que aparecen en la tabla 2.

Basándose en estos resultados banda 1/3-octava, El nivel de presión acústica $L_{eq, T}$ ponderado A se calcula mediante el sumatorio siguiente:

$$L_{eq,T} = 10 \times \log \left(\sum_i 10^{L_{eq,T,i} + A_i} \right) - 10 \quad (II - 1)$$

donde

- A_i denota la corrección de la ponderación A de acuerdo con IEC 61672-1. Coincidente con la tabla 2.
- i = índice banda de frecuencia.

Index (i)	Frec (Hz)	Af,i (dB)	Index (i)	Frec (Hz)	Af,i (dB)	Index (i)	Frec (Hz)	Af,i (dB)
1	25	-44,7	10	200	-10,9	19	1600	+1,0
2	31,5	-39,4	11	250	-8,6	20	2000	+1,2
3	40	-34,6	12	315	-6,6	21	2500	+1,3
4	50	-30,2	13	400	-4,8	22	3150	+1,2
5	63	-26,2	14	500	-3,2	23	4000	+1,0
6	80	-22,5	15	630	-1,9	24	5000	+0,5
7	100	-19,1	16	800	-0,8	25	6300	-0,1
8	125	-16,1	17	1000	0,0	26	8000	-1,1
9	160	-13,4	18	1250	+0,6	27	10000	-2,5

Tabla 2. Rango de frecuencias con ponderación A para A_f

2.2.15 Indicadores de ruido

El indicador promedio de ruido de largo plazo es especificado en la Directiva 2002/49/CE Europea; es el indicador día-tarde-noche, L_{DEN} definido por:

$$L_{DEN} = 10 \log \left(\frac{12}{24} 10^{L_{day}/10} + \frac{4}{24} 10^{L_{evening}+5/10} + \frac{8}{24} 10^{L_{night}+10/10} \right) \quad (II-2)$$

donde:

- L_{day} : Es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996-2:2007, determinado a lo largo de todos los períodos diurnos de un año
- L_{tarde} : es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996-2: 2007, determinado a lo largo de todos los períodos vespertinos de un año
- L_{night} : es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996-2: 2007, determinado a lo largo de todos los períodos nocturnos de un año

Al día le corresponden 12 horas, a la tarde 4 horas y a la noche 8 horas y un año corresponde al año considerado para la emisión de sonido y a un año medio por lo que se refiere a las circunstancias meteorológicas.

Los Estados miembros pueden optar por reducir el período vespertino en una o dos horas y alargar los períodos diurno y/o nocturno en consecuencia, siempre que dicha decisión se aplique a todas las fuentes, y que faciliten a la Comisión información sobre la diferencia sistemática con respecto a la opción por defecto.

Los parámetros utilizados en las diferentes fórmulas se definen generalmente por las administraciones nacionales o locales. Sin embargo, como algunos parámetros son comunes, quedan resumidos en las siguientes dos tablas.

Parámetros de ruido

L_p	Nivel de Presión Sonora	[dB] (re. $2 \cdot 10^{-5}$ Pa)
$L_{eq,Tp}$	Nivel de Presión Sonora equivalente durante el periodo de tiempo T_p	[dB] (re. $2 \cdot 10^{-5}$ Pa)
$L_{Aeq,Tp}$	Nivel de Presión Sonora equivalente, ponderado A durante el periodo de tiempo T_p	[dB(A)] (re. $2 \cdot 10^{-5}$ Pa)
$L_{eq,passby}$	Nivel de Presión Sonora equivalente para el paso de un solo vehículo	[dB] (re. $2 \cdot 10^{-5}$ Pa)
L_W	Nivel de potencia Sonora de una fuente puntual (móvil o fija)	[dB] (re. 10^{-12} W)
$L_{W,0}$	Nivel de potencia instantánea de un vehículo individual	[dB] (re. 10^{-12} W)
$L_{W,0,dir}$	Nivel de potencia de un sonido direccional	[dB] (re. 10^{-12} W)
$L_{W'}$	Nivel de potencia sonora promedio por metro en fuentes puntuales	[dB] (re. 10^{-12} W)
$L_{W',eq,line}$	Nivel de potencia sonora direccional promedio por unidad de longitud	[dB] (re. 10^{-12} W)
$L_{W',tot,dir}$	Nivel de potencia sonora direccional promedio por unidad de longitud de la fuente de sonido equivalente (Para todas las contribuciones de los diferentes $L_{W',eq,line}$)	[dB] (re. 10^{-12} W)
$L_{W,dir,low}$	Nivel de potencia sonora direccional de la fuente inferior	[dB] (re. 10^{-12} W)
$L_{W,dir,high}$	Nivel de potencia sonora direccional de la fuente superior	[dB] (re. 10^{-12} W)
$\Delta L_{W,dir}$	Corrección de la directividad de la fuente en un solo punto en movimiento	[dB] (re. 10^{-12} W)
$\Delta L_{W,tot,dir}$	Corrección de la directividad total	[dB] (re. 10^{-12} W)
$\Delta L_{W,dir,vert}$	Corrección de la directividad vertical	[dB] (re. 10^{-12} W)
$\Delta L_{W,dir,hor}$	Corrección de la directividad horizontal	[dB] (re. 10^{-12} W)
$\Delta L_{W,dir,i}$	Corrección de la directividad para un único punto de origen en la línea equivalente de fuentes puntuales	[dB] (re. 10^{-12} W)

Tabla 3. Parámetros de ruido.

Otros parámetros físicos

p	r.m.s de la presión acústica instantánea	[Pa]
p_0	Referencia presión acústica = $2 \cdot 10^{-5}$ Pa	[Pa]
W_0	Referencia potencia acústica = 10^{-12} W	[watt]

Tabla 4. Parámetros de físicos.

2.3 Emisión de ruido para tráfico rodado

2.3.1 Descripción de la fuente sonora

2.3.1.1 Clasificación de los vehículos

El ruido del tráfico rodado resulta de la adición de las emisiones de ruido de cada vehículo que conforman el flujo de tráfico. Estos vehículos se pueden agrupar en cuatro categorías respecto a sus características de emisión de ruido:

- Categoría 1: Vehículos ligeros.
- Categoría 2: Vehículos de peso medio.
- Categoría 3: Vehículos pesados.
- Categoría 4: Vehículos de dos ruedas.

En algunos casos, los datos de ruido de tráfico para las categorías 2 y 3 no están disponibles por separado o la proporción de vehículos de esta categoría es baja. En este caso, se recomienda, una descomposición de niveles según recomendación nacional. Alternativamente, si una de las dos categorías domina el flujo de tráfico, esta será utilizada para el cálculo del ruido de tráfico en conjunto (Recomendación) para esta categoría dominante. En algunos casos, es una simplificación aceptable el omitir la categoría 4, si los datos del tráfico de esta no están disponibles o si la flota de vehículos no es significativa.

Categoría	Nombre	Descripción
1	Vehículos ligeros	Coches de pasajeros, furgonetas, caravanas y tráilers con pesos inferiores a 3500 kg.
2	Vehículos de peso medio	Furgonetas caravanas, tráilers, autobuses, etc. Con pesos superiores a 3500 kg, dos ejes y doble montaje de neumático en el eje trasero.
3	Vehículos pesados	Caravanas, camiones, autobuses, etc. Con tres ejes como mínimo.
4 a	Vehículos de dos ruedas	Ciclomotores, triciclos o quads con cilindrada inferiores a 50cc.
4 b		Motocicletas, triciclos o quads con cilindrada superiores a 50cc.

Tabla 5. Categoría, nombre y descripción de los tipos de vehículos

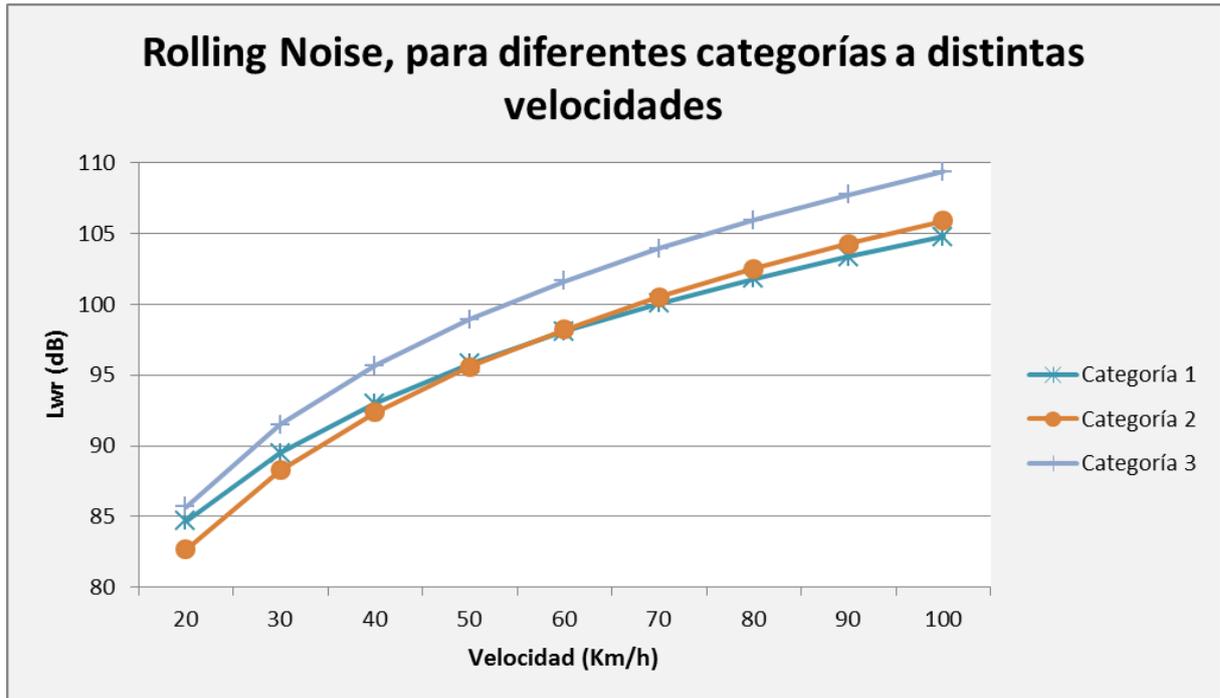


Figura 6. Rolling Noise, para diferentes categorías a distintas velocidades.

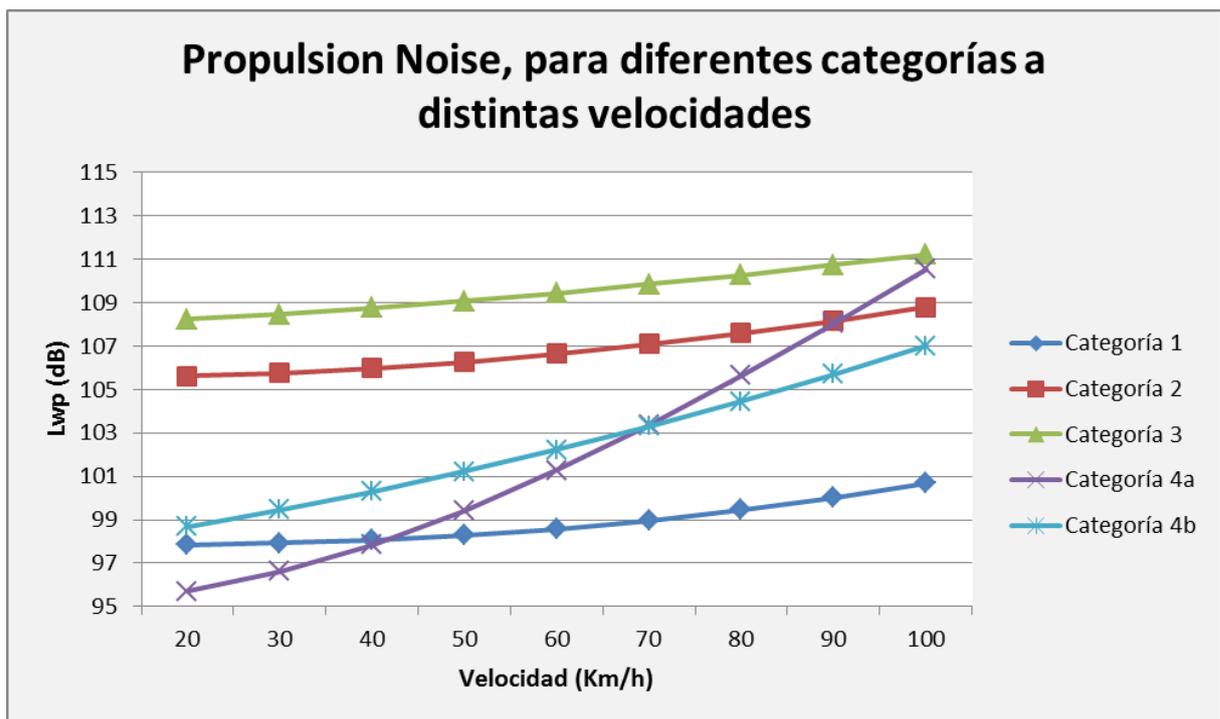


Figura 7. Propulsion Noise, para diferentes categorías a distintas velocidades.

El ruido de rodadura ofrece variaciones de niveles de presión sonora más altos que el ruido de propulsión conforme aumenta la velocidad, del orden de 20 dB para el rolling noise y de unos 3 dB para propulsión noise (Excluyendo categoría 4 a y 4 b).

Los niveles para las distintas categorías se asemejan más. Con 5 dB de diferencia para el rolling noise, siendo el mayor de ellos el de categoría 3. El del ruido de rodadura aumenta asemejándose a una función logarítmica en las tres categorías.

Las variaciones de nivel en función de las categorías son más notables en propulsión noise para las diferentes velocidades unos 10 - 11 dB. El del ruido de propulsión aumenta asemejándose funciones lineales en las tres categorías. La categoría 4 a (ciclomotores) experimenta un crecimiento exponencial, variando 15 dB con forme aumenta la velocidad. La categoría 4 b denota un crecimiento exponencial no tan pronunciado como la categoría 4 a, con una variación de 8 dB con forme aumenta la velocidad.

2.3.1.2 Número y localización de fuentes equivalentes de sonido

Para calcular la propagación del ruido y determinar la emisión de potencia acústica, es necesario describir el origen, con una o varias fuentes puntuales.

En este método, cada vehículo (Cat. 1, 2 y 3) está representado por una fuente puntual en un solo punto.

Como se representa en la figura 8, las posiciones de las fuentes puntuales son:

- Los vehículos de motor ligero (Cat. 1) están representados por una fuente puntual. La cual se encuentra a 0,05 m de altura por encima de la carretera.
- Los vehículos de motor pesado (Cat. 2 y 3) están representados por una fuente puntual. La cual se encuentra a 0,05 m de altura por encima de la carretera.
- Los vehículos de dos ruedas (Cat. 4) están representados por un solo punto de origen, situado a 0,05 m de altura.

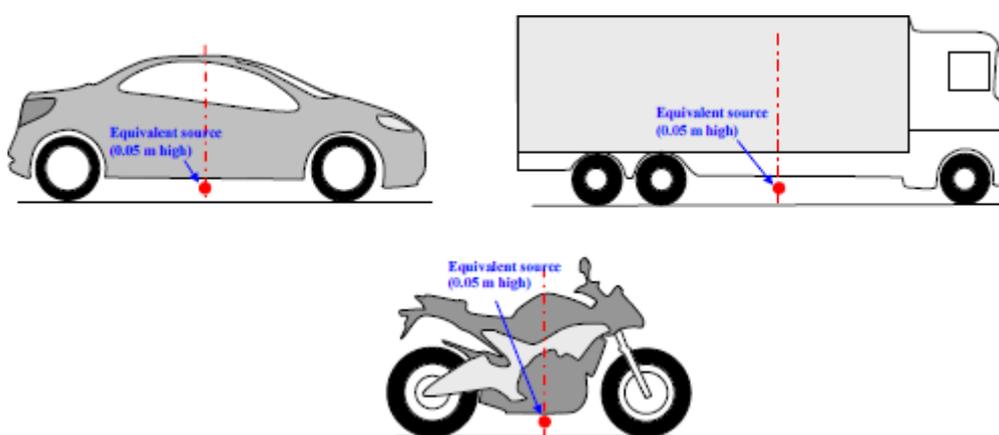


Figura 8. Localización de las fuentes puntuales equivalentes para vehículos ligeros (Cat. 1), vehículos pesados (Cat. 2 y 3) y vehículos de dos ruedas (Cat. 4).

La resolución vertical de las fuentes es acertada tanto para el cálculo del sonido de propagación, como para determinar la emisión de potencia acústica.

En general, la emisión de potencia acústica de los vehículos se deriva de un mejor ajuste entre las mediciones de la presión acústica en el lado de la carretera y los cálculos teóricos de propagación del sonido. Así, con este corto alcance, la resolución vertical de las fuentes equivalentes es importante, especialmente porque afecta considerablemente la interferencia entre los componentes directos y reflejados del suelo.

El método para derivar los niveles de potencia acústica de las mediciones de presión sonora en carretera, se describe en la guía para el uso competente de CNOSSOS–UE

La fuente lineal se encuentra asociada al plano vertical del centro de la calzada. La potencia sonora de la fuente se define como la potencia sonora total en campo abierto, sin ningún tipo de objeto, es decir, sin ningún tipo de reflexión sobre la superficie de la carretera.

2.3.1.3 Descripción de los asfaltos

La gran variedad de materiales utilizados para la construcción de carreteras en los diferentes países de los estados miembros, debido a que cada país ha implementado sus propios métodos para la construcción de vías de transporte produce que se den variaciones del nivel sonoro por un mismo vehículo a la misma velocidad en carreteras construidas con diferentes materiales.

Por ello CNOSSOS distingue entre siete tipos de vías diferentes dependiendo de su comportamiento en la emisión de rolling noise:

- TBC: Hormigón pulido transversalmente
- CSD 2/4: Hormigón con superficie revestida 2/4
- EAC: Hormigón lavado
- PA 6/16: Asfalto poroso 6/16
- 2PA 4/8-11/16: 2 capas porosas de asfalto 4/8 – 11/16
- SMA 0/6: Asfalto de piedra 0/6
- SD 4/8: Superficie vestida 4/8

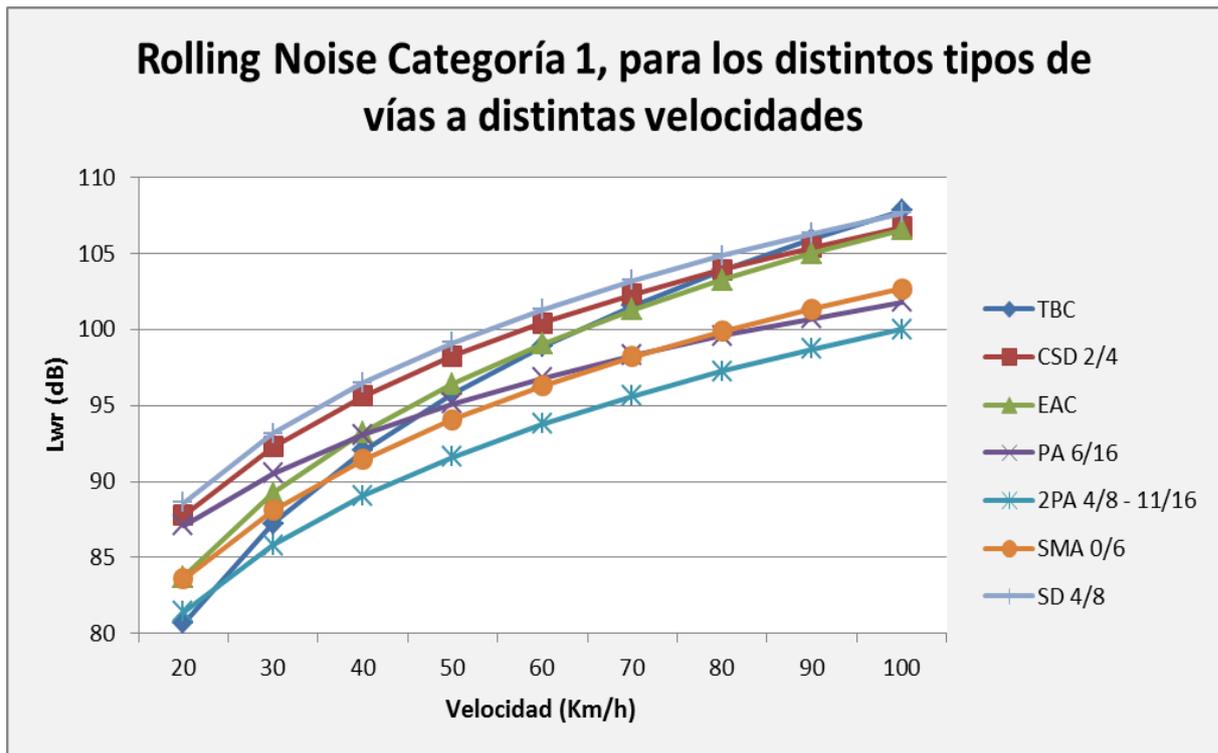


Figura 9. Rolling Noise para vehículos de Categoría 1 en función de la velocidad y los distintos tipos de vía.

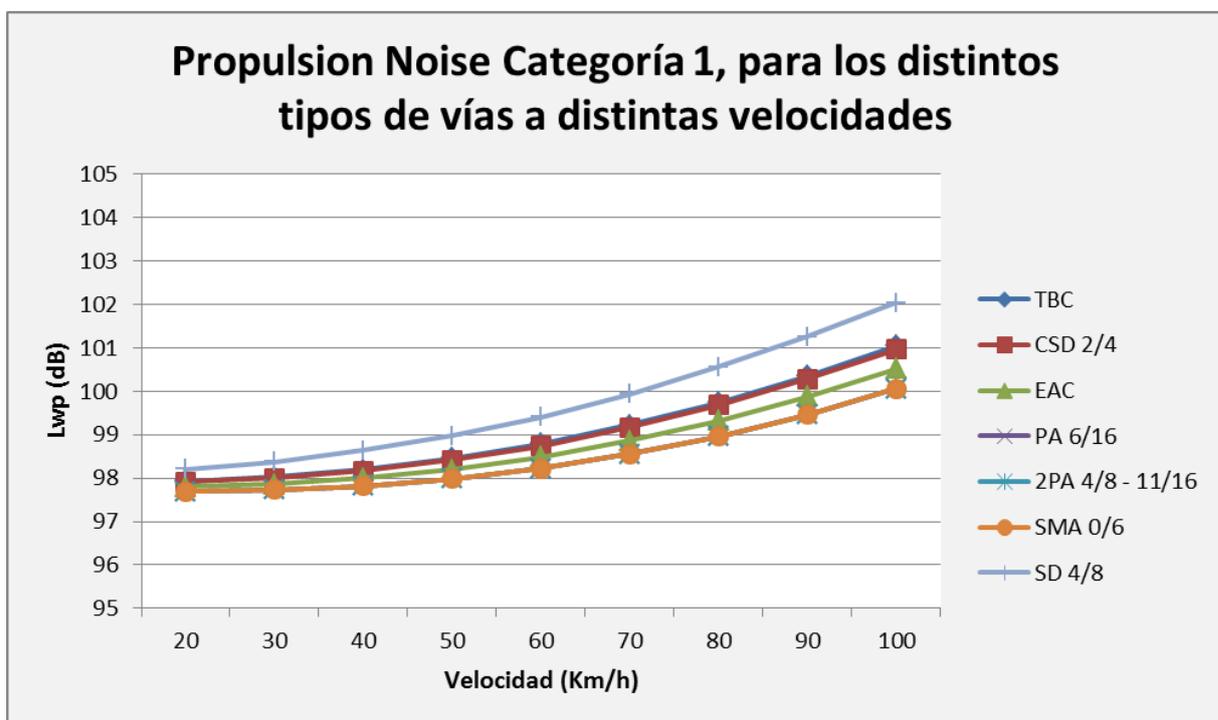


Figura 10. Propulsion Noise para vehículos de Categoría 1 en función de la velocidad y los distintos tipos de vía.

El tipo de asfalto tiene una influencia considerable, sobre todo en el cálculo rolling noise y por lo tanto en el resultado final de la predicción. Como podemos observar en la figura Figura 9 dependiendo del tipo de calzada puede haber variaciones de más de 10 dB en función de unas vías u otras. Esto es debido a los materiales empleados para su

construcción, los cuales aportan características diferentes a la emisión y absorción de sonido. El tipo de vía que menos ruido emite es la 2PA 4/8 – 11/16 con niveles entre 81 y 100 dB en rolling noise para diferentes velocidades. Por el contrario la vía más que más ruido emite es la SD 4/8 con valores entre 88 y 107 dB en rolling noise para diferentes velocidades

En el caso de propulsión noise, la influencia es menor, adquiriendo un patrón similar para los diferentes tipos de vías.

2.3.2 Emisión de la potencia sonora

2.3.2.1 Consideraciones generales (Vehículo individual)

El modelo de ruido de tráfico describe la emisión de ruido "promedio" de un vehículo circulando por una carretera europea en términos de nivel de potencia acústica. Se define el nivel de ruido instantáneo de un vehículo mediante dos parámetros principales:

- La categoría
- Velocidad

Los cálculos se realizan con diferentes velocidades para cada categoría (1 Cat. 2 Cat. , 3 Cat. y 4 Cat.) Por lo general las velocidades de estos vehículos son dependientes de la velocidad máxima permitida en esa vía, para esa categoría.

El modelo de emisión se compone de un conjunto de ecuaciones matemáticas que representan las dos principales fuentes de ruido:

1. El ruido de rodadura debido a la interacción neumático / carretera.
2. Ruido de propulsión producido por la línea de impulsión (motor, escape, etc) del vehículo.

La forma general de la expresión matemática para calcular el nivel de potencia acústica emitido por una fuente (rodadura o propulsión) se calcula en función de la velocidad del vehículo v ($20 \text{ km/h} \leq v \leq 130 \text{ km/h}$) es

$$L_{w,im} v = A_{i,m} + B_{i,m} \times f v \quad (II-3)$$

siendo

$f(v)$: una función logarítmica de la velocidad v del vehículo en el caso del ruido de rodadura y ruido aerodinámico. Es una función lineal de v en el caso de ruido de propulsión. El nivel de potencia sonora $L_{w,i,m}$ se calcula en 1/3- octavas de 25 Hz a 10 kHz, en donde el subíndice i indica la banda de frecuencia espectral. El índice m representa la categoría del vehículo con $m = 1, 2$ o 3 definido por:

$$L_{w,i,m} v_m = 10 \times \log 10^{L_{WR,i,m} v_m} + 10^{L_{WP,i,m} v_m} \quad (II-4)$$

donde

- $L_{WR, i, m}$: Es el nivel de potencia acústica para ruido de rodadura.
- $L_{WP, i, m}$: Es el nivel de potencia acústica para ruido de la propulsión.

Para vehículos de dos ruedas (Cat. 4), se considera la fuente equivalente en un solo punto para el ruido de propulsión.

$$L_{W, i, m-4} v_{m-4} = L_{WP, i, m-4} v_{m-4} \quad (II-4.1)$$

2.3.2.2 Condiciones de referencia

Las ecuaciones de origen y los coeficientes se derivan al ser válidas las condiciones de referencia para la climatología y la situación del tráfico. Estas condiciones de referencia son:

- Velocidad constante de los vehículos
- Carretera sin pendiente, es decir, con una pendiente 's' (en %), con $|s| \leq 2\%$
- Temperatura del aire $T_{ref} = 20^\circ \text{C}$
- Superficie de la carretera, formada de una mezcla de DAC 0/11 y SMA 0/11 con una antigüedad de entre 2 y 7 años y un estado de mantenimiento representativo. En esta superficie de referencia se obtendrán las propiedades de reflexión del sonido
- Superficie de la carretera seca
- La flota de vehículos que representa el promedio de vehículos en el conjunto de Europa es:
 - 187 mm de ancho para los neumáticos de la categoría 1
 - 19% motores diésel para la categoría 1
 - 10,5 % de furgonetas de reparto para la categoría 1
 - No hay neumáticos de clavos
 - 4 ejes para la categoría 3

Para situaciones que se desvíen de estas condiciones de referencia, se introdujeron los factores de corrección.

2.3.2.3 Fuente inferior y fuente superior

Para los vehículos ligeros y pesados (Cat. 1, 2 y 3), la potencia del sonido se distribuye generalmente entre dos fuentes puntuales.

En realidad, el ruido producido por rodadura y el ruido de propulsión se distribuyen con una proporción de distribución del 80% - 20%. De este modo, el nivel aparente de la dirección de potencia acústica de la fuente inferior ($L_{W, dir, bajo, i, m}$) y el nivel aparente de la dirección de potencia acústica de la fuente superior ($L_{W, dir, alta, i, m}$) para $m = 1, 2$ o 3 se

definen por:

2.3.2.3.a Fuente inferior:

$$L_{W,dir,low,i,m} \ v = 10 \times 0,8 \times 10^{L_{WR,i,m} / 10} + 0,2 \times 10^{L_{WP,i,m} / 10} + \Delta L_{W,dir,i,m} \quad (II-5)$$

2.3.2.3.b Fuente superior:

$$L_{W,dir,high,i,m} \ v = 10 \times 0,2 \times 10^{L_{WR,i,m} / 10} + 0,8 \times 10^{L_{WP,i,m} / 10} + \Delta L_{W,dir,i,m} \quad (II-6)$$

donde

- $L_{WR,i,m}$: Es el nivel de potencia acústica producido por el ruido de rodadura (Rolling Noise) definido en el apartado 2.3.3
- $L_{WP,i,m}$: Es el nivel de potencia acústica correspondiente al ruido de la propulsión (Propulsion Noise) determinado en el apartado 2.3.4

Método Simplificado

Los datos de la directividad rara vez están disponibles. Además, se observó que, excepto a bajas velocidades, la fuente de ruido del vehículo se aproxima a una fuente omni-direccional. Por lo tanto, se recomienda omitir las correcciones para la directividad. Esta simplificación se considera aceptable.

En el resto de esta memoria, todos los niveles de potencia sonora y los coeficientes de corrección se expresan para cada categoría de m (m = 1 a 4) y para cada banda de 1/3-octava i (i = 1 a 27) en el rango [25 Hz - 10 kHz]. De forma predeterminada, los subíndices "i" y "m" están implícitos en todos los indicadores, pero se omite para mejorar la legibilidad del texto.

2.3.2.4 Potencia acústica instantánea de la fuente

Nivel de potencia acústica instantánea y direccional de la fuente inferior (II-5) y la fuente superior (II-6). Se obtiene de acuerdo con la ecuación (II-7) para un solo vehículo. La expresión, una vez ponderadas todas las bandas, se da en dBA. Para vehículos de categoría 4 este apartado no será de aplicación, ya que la única fuente considerada es la superior (propulsión).

$$L_{W,0} = 10 \times \log \left[0,5 \times 10^{\frac{L_{W,dir,low,i,m}}{10}} + 0,5 \times 10^{\frac{L_{W,dir,high,i,m}}{10}} \right] \quad (II-7)$$

donde

- $L_{W,dir,low,i,m}$ y $L_{W,dir,high,i,m}$ son los valores de la fuente inferior y fuente superior de acuerdo a las ecuaciones (II-5 y II-6) respectivamente.

2.3.2.5 Flujo del tráfico

La emisión de ruido producida por el tráfico de circulación está representada por una fuente lineal, la cual se caracteriza por su potencia acústica por unidad de longitud. Esto corresponde a la suma de las emisiones sonoras de cada vehículo individualmente contenidos en el tráfico rodado, teniendo en cuenta el tiempo empleado por los vehículos en el tramo de carretera considerado. La implementación para un vehículo individual, contenido en flujo circulatorio requiere la aplicación de un modelo para el flujo del tráfico.

Si un flujo constante de vehículos N durante el período T (*en segundos*) que se supone, con una velocidad media V en m/s , la emisión de ruido del flujo de vehículos en términos de fuerza, de la fuente lineal equivalente (nivel medio de potencia sonora por unidad de longitud) $L_{W',eq,line}$ corresponde a la ecuación, definida por:

$$L_{W',eq,line} = L_{W,0} + 10 \log \frac{N}{T \times V} \quad (II-8)$$

donde

- $L_{W,0}$: Es el nivel de potencia acústica instantánea de la fuente, ecuación (II-7) para un solo vehículo. En la ecuación (II-8), la unidad de longitud es el metro.
- $L_{W',eq,line}$: Se expresa en dB / m (Ref. 10^{-12} W)

En el caso de utilizar una unidad de longitud en kilómetros, la conversión es:

$$L_{W',eq,line} = L_{W,0} + 10 \log \frac{Q}{1000 \times v} \quad (II-9)$$

donde

- Q : Es el flujo de vehículo por hora y V la velocidad media en km/h .

Utilizando esta fórmula, las contribuciones L_{WR} y L_{WP} para el ruido de rodadura y el ruido de propulsión deben ser calculadas por separado como se describe en las ecuaciones (II-5) y (II-6). El resultado es entonces el $L_{W',eq,line}$

2.3.3 Rolling Noise

Para el cálculo del rolling noise, es aceptada y está validada la relación logarítmica entre las emisiones de ruido del tráfico rodado y las velocidades de rodadura (donde v es la velocidad). Mediante las siguientes formulas obtendremos los niveles de potencia sonora que genera un vehículo.

$$L_{WR,i,m} = A_{R,i,m} + B_{R,i,m} \times \log \frac{v_m}{v_{ref}} + \Delta L_{WR,i,m} v_m \quad (II-10)$$

Los coeficientes $A_{R,i,m}$ y $B_{R,i,m}$ se dan en bandas de octava para cada vehículo, se muestran en el apéndice I del documento. La velocidad de referencia es $V_{ref} = 70$ km/h. Se definen las condiciones de referencia en la subsección 2.3.2.2

$\Delta L_{WR,i,m}$ corresponde a la suma de los coeficientes de corrección aplicados a la emisión de ruido de rodadura, para condiciones específicas de referencia.

$$\Delta L_{WR,i,m} v_m = \Delta L_{WR,road,i,m} v_m + \Delta L_{studded\ tyres,i,m=1} v_m + \Delta L_{WR,acc,i,m} + \Delta L_{W,temp} \tau \quad (II-11)$$

donde,

- $\Delta L_{WR, road, i, m}$ representa el efecto del ruido de rodadura producido por la superficie de la vía con diferentes propiedades acústicas para condiciones específicas de carretera o vehículos que se desvían de las condiciones de referencia descritas en la subsección 2.3.2.2. Incluye tanto el efecto sobre la propagación y como la generación. El cálculo se detalla en la Sección 2.3.6.
- $\Delta L_{studded\ tyres, i, m=1}$ es un coeficiente de corrección a aplicar a la proporción de vehículos ligeros equipados con neumáticos con clavos. Esto se describe en la subsección 2.3.3.1
- $\Delta L_{WR,acc,i,m}$ representa el efecto del ruido de rodadura en un cruce con semáforos o una rotonda. Se describe en la sección 2.3.5
- $\Delta L_{W,temp(\tau)}$ es una corrección para la temperatura media τ diferente a la de referencia $\tau_{ref} = 20$ °C. Descrito en la subsección 2.3.3.2

Para un flujo de tráfico sin vehículos ligeros equipados con neumáticos de clavos $\Delta L_{studded\ tyres,i,m=1} = 0$

El ruido aerodinámico del vehículo está incluido en la ecuación de ruido de rodadura.

La variación con la velocidad de la potencia del sonido de rodadura en general para vehículos ligeros, medios y pesados (categorías 1, 2 y 3) en las condiciones de referencia se presentan a continuación.

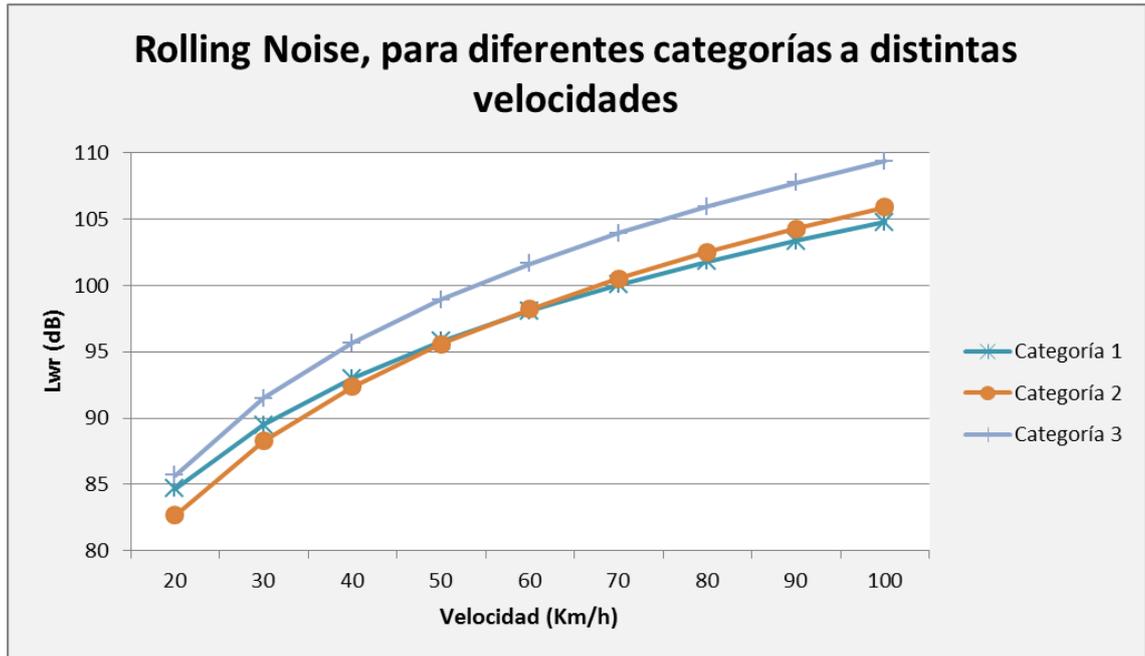


Figura 11. Niveles de potencia acústica de Rolling en dB para las tres primeras categorías de vehículos, en las condiciones de referencia.

2.3.3.1 Corrección neumáticos de clavos

Durante varios meses al año numerosos vehículos ligeros utilizan neumáticos de clavos en las zonas alpinas o nórdicas. Si estos son significativos en el flujo de tráfico debemos tener en cuenta el efecto inducido sobre el ruido de rodadura.

Para cada vehículo de categoría $m = 1$ equipado con neumáticos de clavos, se observa un aumento en la emisión de ruido de rodadura ($\Delta L_{stud}(v)$) dependiente de la velocidad y se puede evaluar por:

$$\Delta_{stud,i,m=1} v_{m=1} = \begin{cases} a_i + b_i \times \log v_{m=1} - 70 & \text{para } 50 \leq v_{m=1} \leq 90 \text{ km/h} \\ a_i + b_i \times \log 90 - 70 & \text{para } v_{m=1} > 90 \text{ km/h} \\ a_i + b_i \times \log 50 - 70 & \text{para } v_{m=1} < 50 \text{ km/h} \end{cases} \quad (II-12)$$

Donde los coeficientes a_i y b_i están en bandas de octavas basadas en la Tabla II.A.1 del apéndice I del documento.

El aumento en la emisión de ruido de rodadura sólo debe ser atribuido a la proporción de vehículos ligeros con neumáticos de clavos y durante un período limitado T_s (en meses) durante el año. Si Q_{stud} es el volumen promedio de los vehículos ligeros por hora equipados con neumáticos de clavos durante el período T_s (en meses), y Q_1 el volumen total de tráfico de vehículos ligeros por hora, entonces la proporción anual media de los vehículos equipados con neumáticos de clavos p_s se expresa por:

$$P_s = \frac{Q_{stud}}{Q_1} \times \frac{T_s}{12} \quad (II-13)$$

La corrección resultante que se aplica a la emisión de ruido de rodadura de potencia debido a la utilización de los neumáticos con clavos para vehículos de la categoría $m = 1$ viene dada por:

$$\Delta L_{studded\ tyres, i, m=1} v_{m=1} = 10 \times \log \left(1 - p_s + p_s^{10^{\frac{\Delta_{stud, i, m-1} v_{m-1}}{10}}} \right) \quad (II-14)$$

El procedimiento para establecer el factor de corrección se explica en las "Directrices para el uso competente de Cnossos-UE", junto con el valor por defecto que se utilizará para p_s .

Neumáticos de clavos para camiones existen pero no son muy comunes, por lo tanto no se introduce corrección para las categorías 2 y 3

2.3.3.2 Corrección efecto de la temperatura del aire en el ruido de rodadura

En general se acepta que la temperatura del aire afecta a la emisión de ruido de rodadura. El nivel de potencia sonora producido por el ruido de rodadura disminuye cuando aumenta la temperatura del aire. Este efecto puede ser introducido en la corrección de la superficie de la carretera. La corrección del pavimentos se evalúa con una temperatura del aire de $\tau_{ref} = 20$ °C. En el caso de una temperatura anual media del aire diferente a la media, la superficie de la vía se debe corregir por:

$$\Delta L_{W, temp} \tau = K \times 20 - \tau \quad (II-15)$$

El término de corrección es positiva (es decir, aumentos de ruido) para temperaturas inferiores a 20 ° C y negativo (disminuye el ruido) para temperaturas más altas. El coeficiente K depende de la superficie de la carretera y las características de los neumáticos y exposiciones generales dependientes de alguna frecuencia. Por razones de simplificación de cálculos para los mapas de ruido, se toma como un coeficiente genérico $K = 0,08$ dB / ° C para los vehículos ligeros (categoría 1) y 0,04 dB / ° C para los vehículos pesados (categorías 2 y 3). Se debe aplicar para todas las superficies de carretera. La corrección por efecto de la temperatura no debe aplicarse para los vehículos de dos ruedas (categoría 4). El coeficiente de corrección debe aplicarse por igual en todas las bandas de octava de 125 a 4000 Hz.

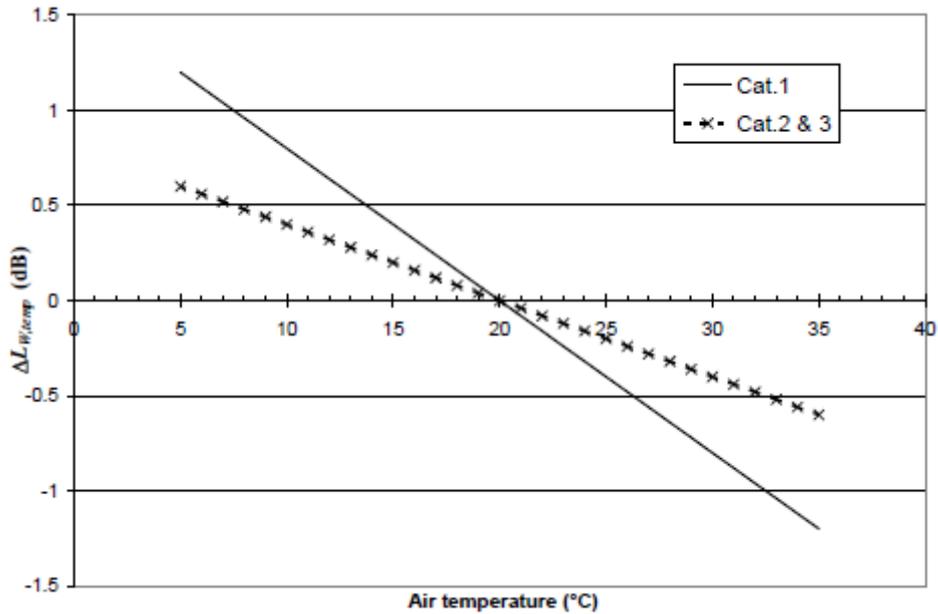


Figura 12. Corrección de la temperatura semi-genérica.

2.3.4 Propulsion Noise

Propulsion noise incluye todas las contribuciones del motor, el escape, las marchas, tomas de aire, etc. El valor L_{WP} del propulsion noise, se calcula de la siguiente manera:

$$L_{WP,i,m} = A_{P,i,m} + B_{P,i,m} \times \frac{v_m - v_{ref}}{v_{ref}} + \Delta L_{WP,i,m} v_m \quad (II-16)$$

donde,

Los coeficientes:

- $A_{P,i,m}$ y $B_{P,i,m}$ corresponde a la emisión de potencia sonora en bandas de octava para cada categoría de vehículos y para una velocidad de referencia $V_{ref} = 70$ km/h. Se definen las condiciones de referencia en la subsección 2.3.2.2 y figuran en el apéndice I del documento, en bandas de octava para cada vehículo.
- $\Delta L_{WP,i,m}$ corresponde a la suma de los coeficientes de corrección aplicados a la emisión de ruido de propulsión, para condiciones específicas de carretera o vehículos que se desvían de las condiciones de referencia.

$$\Delta L_{WP,i,m} v_m = \Delta L_{WP,road,i,m} v_m + \Delta L_{WP,acc,i,m} + \Delta L_{WP,grad,i,m} v_m \quad (II-17)$$

- $\Delta L_{WP,road,i,m}$ representa el efecto de la superficie de la carretera sobre el ruido de propulsión. Incluye el efecto de una superficie porosa sobre la propagación local de ruido de la propulsión. El cálculo se detalla en la Sección 2.3.6.
- $\Delta L_{WP,acc,i,m}$ y $\Delta L_{WP,grad,i,m}$ cuenta las desviaciones relativas a las condiciones de conducción. Se detallan en la sección 2.3.5 y subsección 2.3.4.1 respectivamente.

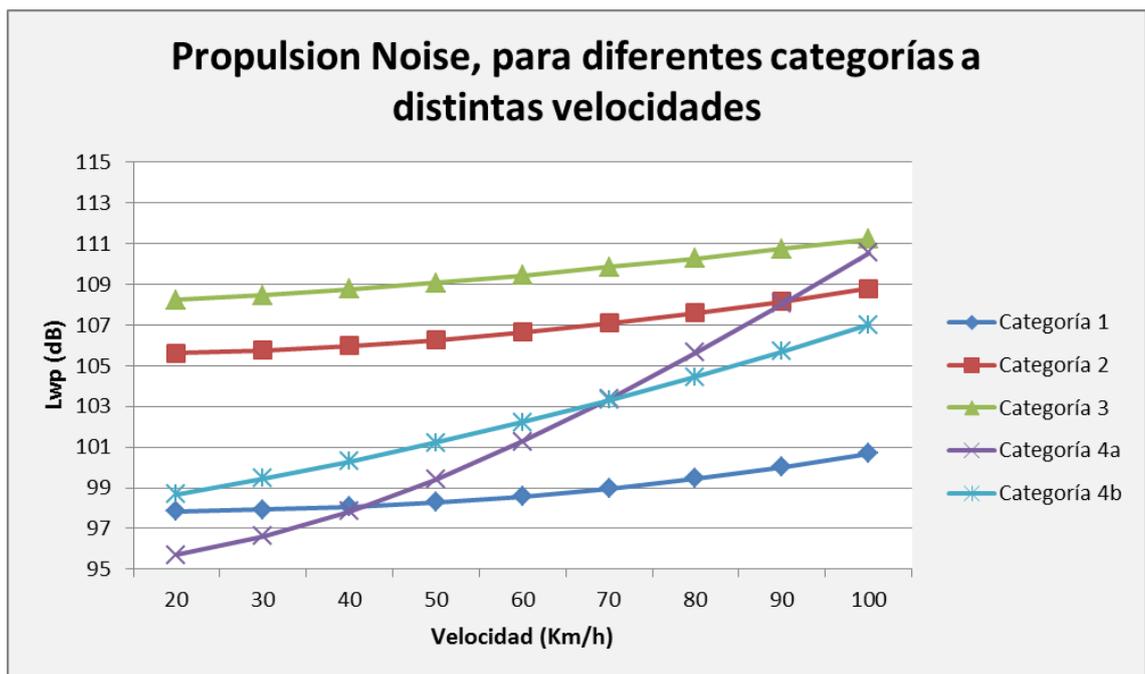


Figura 13. Nivel de potencia sonora en dB de los elementos de propulsión, para los diferentes vehículos de las categorías en las condiciones de referencia.

Nota: La ecuación (II-16) se basa en una combinación de la relación entre la velocidad del vehículo, la velocidad del motor y la relación entre la velocidad del motor y el ruido.

Para la categoría 4, existen variaciones regionales significativas que pueden variar las emisiones de ruido debido a los diferentes tipos de vehículos de dos ruedas, sistemas de escape y comportamientos de conducción. Por lo tanto los estados miembro de la UE, si lo desean, pueden introducir sus propios datos de emisiones siempre y cuando sean justificados y documentados claramente en el marco de CNOSSOS, dentro de la base de datos de la UE. Las indicaciones sobre la justificación y la documentación que debe facilitarse se dan en las "Directrices para el uso competente de CNOSSOS-UE".

2.3.4.1 Efecto del gradiente de la carretera

La pendiente de la carretera tiene dos efectos en la emisión de ruido del vehículo:

1. Afecta a la velocidad del vehículo y por lo tanto a la emisión de ruido de rodadura y propulsión del vehículo.
2. Afecta tanto a la carga del motor como a la velocidad del motor a través del engranaje (marcha) seleccionado y por lo tanto la emisión de ruido de propulsión del vehículo. Sólo el efecto del ruido de propulsión se considera en esta sección.

El efecto de la pendiente de la carretera se tiene en cuenta en el ruido de propulsión por $\Delta L_{WP,grad}$, término de corrección que es una función de la pendiente s (en%), la

velocidad del vehículo v_m (en km/h) y la clase de vehículo m . El término de corrección se aplica a todas las bandas de octava por igual:

Para $m = 1$

$$\Delta L_{WP,grad,i,m-1} v_m = \begin{cases} \frac{\text{Min } 12\% ; -s -6\%}{1\%} & \text{para } s < -6\% \\ 0 & \text{para } -6\% \leq s \leq 2\% \\ \frac{\text{Min } 12\% ; s -2\%}{1.5\%} \times \frac{v_m}{100} & \text{para } s > 2\% \end{cases} \quad (II-18)$$

Para $m = 2$

$$\Delta L_{WP,grad,i,m-2} v_m = \begin{cases} \frac{\text{Min } 12\% ; -s -4\%}{0.7\%} \times \frac{v_m - 20}{100} & \text{para } s < -4\% \\ 0 & \text{para } -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{\text{Min } 12\% ; s}{1\%} \times \frac{v_m}{100} & \text{para } s > 0\% \end{cases} \quad (II-19)$$

Para $m = 3$

$$\Delta L_{WP,grad,i,m-3} v_m = \begin{cases} \frac{\text{Min } 12\% ; -s -4\%}{0.5\%} \times \frac{v_m - 10}{100} & \text{para } s < -4\% \\ 0 & \text{para } -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{\text{Min } 12\% ; s}{0.8\%} \times \frac{v_m}{100} & \text{para } s > 0\% \end{cases} \quad (II-20)$$

Para $m = 4$

$$\Delta L_{WP,grad,i,m-4} = 0 \quad (II-21)$$

La corrección $\Delta L_{WP,grad}$ incluye implícitamente el efecto de la velocidad respecto de la pendiente. Por lo tanto, no se requiere corrección por separado (en particular en el ruido de rodadura) para otros efectos debido al cambio en la velocidad cuando se conduce cuesta arriba o cuesta abajo.

Para mantener la coherencia del modelo de emisión de ruido de tráfico, la línea de la fuente debe estar dividida en segmentos lineales, con una variación limitada en la emisión de ruido. En consecuencia, la pendiente de la carretera, gradiente s no debe variar en más de un 2% dentro de un segmento. La entrada de la pendiente s , valor que se utilizará en el modelado de fuente de ruido es la pendiente media a lo largo del segmento de línea.

2.3.5 Efecto de la aceleración y deceleración de los vehículos

La aceleración y desaceleración de los vehículos pueden tener un efecto significativo en la emisión de ruido de los vehículos, especialmente cuando se aproximan o salen de un cruce de carreteras. Sin embargo, en un flujo de tráfico, este efecto es mucho más difícil de calcular que para un vehículo individual, ya que depende de la conducción, lugar, tiempo, condiciones de tráfico, etc. La incertidumbre en la estimación de la aceleración del tráfico puede ser mayor que el efecto sobre el ruido. Por lo tanto, en la mayoría de situaciones, el efecto de la aceleración y la deceleración se puede despreciar a efectos de elaboración de mapas estratégicos de ruido: $\Delta L_{WR,acc,i,m} = 0$ y $\Delta L_{WP,acc,i,m} = 0$

Sin embargo, los Estados miembro de la Unión Europea podría considerar la aceleración/deceleración como efectos, con el fin de integrar medidas específicas para la reducción del ruido en los mapas estratégicos, como las ondas verdes o transformaciones de cruce. En este caso, la corrección puede ser aplicada antes y después de cruces con semáforos y rotondas como se describe a continuación.

Para el ruido de rodadura y el ruido de propulsión en la aceleración y desaceleración de vehículos en una carretera plana, correcciones $\Delta L_{WR,acc,i,m}$ y $\Delta L_{WP,acc,i,m}$ se desarrollan a partir de cálculos, basados en la distancia x (en m) desde el punto de origen hasta la intersección más cercana de la línea fuente. El término de corrección se atribuye a todas las bandas de octava por igual:

$$\Delta L_{WR,acc,i,m} = C_{R,m,k} \times \text{Max} \left(1 - \frac{x}{100}; 0 \right) \quad (II-22)$$

$$\Delta L_{WP,acc,i,m} = C_{P,m,k} \times \text{Max} \left(1 - \frac{x}{100}; 0 \right) \quad (II-23)$$

Los coeficientes $C_{R,m,k}$ y $C_{P,m,k}$ dependen del tipo de cruce k ($k = 1$ para cruce con semáforo, $k = 2$ para rotonda) y se encuentran descritos en el apéndice I del documento, para cada categoría de vehículo. Los coeficientes son iguales para las categorías 2 y 3. La corrección incluye el efecto de la variación de la velocidad al acercarse o alejarse de un cruce o rotonda.

Nótese que para distancias superiores a 100 m, $\Delta L_{WR,acc,i,m} = \Delta L_{WP,acc,i,m} = 0$

2.3.6 Efecto del tipo de superficie de la carretera

2.3.6.1 Principios generales

El tipo de superficie de la carretera influye significativamente en la emisión de ruido de un vehículo. En el paso de un vehículo se pueden observar diferencias de hasta 15 dBA para el mismo vehículo a la misma velocidad en condiciones donde el ruido de rodadura es predominante.

La variedad de tipos de superficie y las condiciones de las carreteras europeas, dan lugar a significativas diferencias en las propiedades relacionadas con el ruido. En la

actualidad no existe un procedimiento común para la evaluación de las propiedades del ruido procedente de superficie, a pesar de las sugerencias colectivas para la clasificación acústica, control y seguimiento de las calzadas se han hecho.

Las características de la superficie de carretera afectan principalmente a la emisión de ruido de rodadura, pero las superficies porosas absorben el sonido afectando también a la propagación del ruido de rodadura y propulsión. En la práctica, el efecto de la superficie de la carretera se evalúa de acuerdo con los procedimientos estándar internacionales mediante la comparación de los niveles de presión sonora medida en el en carretera incluyendo tanto la fuente como los efectos de propagación. Por lo tanto, los factores de corrección deben aplicarse tanto al ruido de rodadura como al de propulsión. El cambio en la impedancia de la superficie no debe ser incluido en los cálculos de propagación. Sin embargo, los efectos producidos por calzadas densas o semi-densas en el ruido de propulsión son pequeños y pueden ser despreciados para las diferentes categorías de vehículos. Por lo tanto, el factor de corrección de ruido de la propulsión solamente se debe aplicar en el caso de una carretera con superficie porosa.

La emisión de los coeficientes $A_{R,i,m}$ $B_{R,i,m}$ $A_{P,i,m}$ $B_{P,i,m}$ utilizados en las ecuaciones (II-10) y (II-16) y en el Apéndice I del documento, son válidos para la superficies de las carreteras de referencia definidas en la subsección 2.3.2.2, es decir, una superficie de carretera correspondiente a un promedio de hormigón asfáltico denso 0/11 y asfalto mastico 0/11, de entre 2 y 7 años, con un estado de mantenimiento correcto. Para superficies de carretera con otras propiedades acústicas, la recomendación es aplicar un factor de corrección espectral del ruido de rodadura, y en el caso de una superficie de carácter poroso, aplicar factores de corrección espectrales tanto al ruido de rodadura como al de propulsión.

El factor de corrección de la emisión de ruido de rodadura producido por la superficie de la carretera está definido por:

$$\Delta L_{WR,road,i,m} = \alpha_{i,m} + \beta_m \times \log \frac{v_m}{v_{ref}} \quad (II-24)$$

donde

- $\alpha_{i,m}$ es la corrección espectral en dB a la velocidad de referencia v_{ref} para la categoría m (1, 2 o 3) y la banda espectral i (banda de octava de 125 a 4000 Hz).
- β_m es el efecto de la velocidad en la reducción del ruido de rodadura. Aunque este coeficiente es dependiente en principio de la frecuencia, no hay datos espectrales disponibles en la bibliografía y en este método se asume un valor constante.

En el caso de una carretera con superficie porosa, el factor de corrección del ruido de propulsión está dado por:

$$\Delta L_{WP,road,i,m} = \min \alpha_{i,m} ; 0 \quad (II-25)$$

Esta corrección es idéntica a la velocidad de referencia del ruido de rodadura, pero con un máximo de cero. Por lo tanto, en las superficies porosas disminuirá el ruido de propulsión, y en las superficies densas no aumentará.

A los estados miembro de la Unión Europea se les permite usar sus propios métodos para la corrección de calzadas nacionales / o regionales, siempre que los datos utilizados y la documentación básica sobre las superficies de la carretera (tipo, descripción del material básico, obtención de datos, etc.) sean compatibles y reportados. Un procedimiento sobre la forma de establecer los coeficientes $\alpha_{i,m}$ y β_m así como traducir los datos existentes, se describe en la "Guía para el uso competente de CNOSSOS-UE", junto con algunos ejemplos de correcciones de calzada.

Cabe señalar que correcciones de pavimento pueden variar de un lugar a otro debido a las diferentes composiciones o características de las materias primas.

2.3.6.2 Efecto de la edad sobre las propiedades del ruido de rodadura

Las características del ruido de superficie de las carreteras varían con la edad y el estado de mantenimiento, con tendencia a volverse más fuerte con el tiempo. En particular, la vida útil acústica de una superficie de bajo ruido es normalmente más corta, especialmente para superficies de hormigón. Por lo tanto, la corrección de la superficie de la carretera debe basarse en el efecto promedio durante el tiempo de vida representativo de la vía. Un procedimiento sobre el modo de tratar este efecto se describe en la "Guía para el uso competente de CNOSSOS-UE" donde se establecen los coeficientes de superficie de la carretera.

2.3.7 Nivel de Presión Sonora en el receptor

Representado por el parámetro L_{Aeq} , el cual predice el nivel de presión sonora en el receptor. Se expresa en dBA. Este valor queda definido para las variables anteriores (categoría del vehículo, tipo de calzada, velocidad, periodo de medida y número de vehículos en el transcurso de la medida, en nuestro caso $N = 1$) ya que estos parámetros están contenidos en el $L_{W',eq,line}$ (Nivel de Potencia sonora medida por unidad de longitud). A esta ecuación se le aporta la distancia h en metros que corresponde a la línea que separa el tráfico rodado del receptor, es decir la distancia de medida.

$$NPS = L_{W',eq,line} - 3 - 10 \times \log h \quad (II-26)$$

La reducción de 3 dB se debe a la consideración de que el suelo es un elemento reflectante. La reducción por la distancia es debida a la atenuación por divergencia para fuentes lineales.

3 PROPAGACIÓN DEL SONIDO

3.1 Ámbito y aplicación del método

En este proyecto se especifica un método para el cálculo de la atenuación de ruido durante su propagación en aire libre. Conociendo las características de la fuente, este método ayuda a determinar el nivel continuo equivalente de presión acústica en el punto del receptor correspondiente a dos tipos particulares de condiciones atmosféricas:

- Condiciones de refracción descendente de propagación (celeridad de sonido eficaz con gradiente positivo vertical) de la fuente al receptor.
- Condiciones atmosféricas homogéneas (celeridad de sonido eficaz con gradiente nulo vertical) en todo el área de propagación.

El método de cálculo descrito en este documento se aplica a las infraestructuras industriales y al transporte terrestre. Por lo tanto, se aplica especialmente a las infraestructuras viarias y ferroviarias. Los aviones de transporte están incluidos en el método de alcance y sólo para el ruido producido durante las operaciones en tierra, excluyendo el despegue y el aterrizaje.

Infraestructuras industriales que emiten ruidos tonales impulsivos o fuertes no están incluidas dentro del ámbito de aplicación de este método.

El método de cálculo no da resultados en las condiciones de propagación de refracción ascendente (celeridad de sonido eficaz con gradiente vertical negativo).

Para calcular la atenuación debida a la absorción atmosférica en el las infraestructuras de transporte, las condiciones de temperatura y humedad se definen de un modo convencional.

El método proporciona resultados para las bandas de octava, de 63 Hz a 4000 Hz. Los cálculos se realizan para cada una de las frecuencias centrales.

El método se basa en una descomposición de las infraestructuras en fuentes puntuales.

El límite de validez de los cálculos, en términos de distancia es de 800 m para una distancia normal a la carretera. El receptor se debe situar al menos a 2 m de altura en relación con el suelo.

El método de cálculo no se aplica a escenarios de propagación que transcurran por encima de agua (lago, río ancho, etc.).

El método de cálculo se aplica a cualquier tipo de entorno: entorno rural, ambiente urbano, incluida calles en 'U'.

Cubiertas parciales y obstáculos que descienden más de 15 ° en relación a la vertical se tratan solamente mediante este método cuando se aplique en tres dimensiones.

Los efectos de las bocas de túneles no están tratados en este método.

Este método considera los obstáculos como superficies planas. No trata los sucesivos cálculos de difracción, sino que los trata como difracciones múltiples.

La aplicación de este documento asume un conocimiento detallado de:

- La topografía del lugar
- La geometría de la fuente y obstáculos
- La naturaleza del terreno
- La potencia acústica de la fuente
- Las condiciones meteorológicas.

3.2 Configuración del modelo

3.2.1 Definiciones

Las distancias, alturas, dimensiones utilizadas en este proyecto están expresadas en metros (m).

La notación MN representa la distancia entre los puntos M y N , medida de acuerdo con la línea recta que une estos dos puntos.

La notación M^N representa la longitud de la trayectoria curvada entre los puntos M y N , en condiciones favorables.

Las medidas de alturas verticales en relación con el suelo se denotan por la letra h ; las alturas equivalentes medidas ortogonalmente en relación con el plano de tierra están marcadas con la letra z .

Los niveles de sonido, señalados por la letra L mayúscula, se expresan en decibelios (dB) por banda de frecuencia omitiendo el índice A . Los niveles de sonido en decibelios dB (A) se indican con el índice A .

La suma de los niveles de ruido se expresa mediante el signo \oplus de conformidad con la siguiente definición:

$$L_1 \oplus L_2 = 10 \times \log \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} \right) \quad (III-1)$$

3.2.2 Consideraciones geométricas

3.2.2.a Segmentación de la fuente

Las fuentes reales se describen mediante un conjunto de fuentes puntuales o, en el caso de tráfico ferroviario o el tráfico por carretera, por fuentes lineales incoherentes. Una

fuente lineal se divide en segmentos lineales, que están representados por las fuentes puntuales situadas en su centro.

3.2.2.b Trayectorias de propagación

La trayectoria de propagación es un plano vertical entre el receptor y la fuente puntual. El cálculo de la contribución de la fuente en el nivel de sonido del receptor es un proceso de dos pasos:

- Primero, se realiza una búsqueda en dos dimensiones en el plano horizontal para construir las trayectorias de propagación. Este proceso se refiere a la parte “path finder” del método. El resultado de este proceso es un plano vertical que conecta el receptor y la fuente.
- A continuación, se realiza un análisis geométrico en el plano vertical de la trayectoria de propagación con el fin de estimar los efectos de las reflexiones del terreno, la difracción sobre obstáculos y la refracción meteorológica.

3.2.2.c Cálculo del plano medio

En el plano de trayectoria, la topografía puede ser descrita como un conjunto de puntos discretos $(x_k, z_k); k \in \{1, \dots, n\}$

La determinación del plano medio de acuerdo con la regresión lineal de los mínimos cuadrados significa que (x_k, z_k) están linealmente espaciados. En el caso contrario, el plano medio sería erróneo.

La separación recomendada es de 1 m entre la abscisa (x_k, z_k) y (x_{k+1}, z_{k+1}) . La elección de un espacio más amplio debe ser justificada.

Se supone que la x aumenta desde la fuente al receptor. Cuando el conjunto de puntos disponible no está espaciado regularmente, se debe determinar un nuevo conjunto de puntos de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} x_j &= \frac{x_{k+1} - x_k}{x_{k+1} - x_k + z_{k+1} - z_k} j - 1 s + x_k \\ z_j &= \frac{z_{k+1} - z_k}{x_{k+1} - x_k + z_{k+1} - z_k} j - 1 s + z_k \end{aligned} \quad (III-2)$$

donde

- s es el paso en metros

Una característica principal de la serie de puntos producidos por la Ecuación (III-2) es que contiene los puntos de la dispersión original. Puesto que, en general, un conjunto de puntos perfectamente regulares no se pueden crear a partir de un conjunto de puntos que no son regulares, el conjunto de puntos producidos por la Ecuación (III-2) coincide 'a la izquierda' con la dispersión original.

Un conjunto de puntos espaciados irregularmente también puede ser considerado y definido como una poli línea de segmentos rectos $z_k = a_k x + b_k$, $x \in [x_k, x_{k+1}]$; $k \in \{1, \dots, n\}$, y por lo tanto la línea recta $z = ax + b$; $x \in [x_1, x_n]$, que se ajusta a la poli línea, puede ser expresado analíticamente de acuerdo con los mínimos cuadrados.

A continuación se escriben

$$\begin{aligned} A &= \frac{2}{3} \sum_{k=1}^{n-1} a_k (x_{k+1}^3 - x_k^3) + \sum_{k=1}^{n-1} b_k (x_{k+1}^2 - x_k^2) \\ B &= \sum_{k=1}^{n-1} a_k (x_{k+1}^2 - x_k^2) + 2 \sum_{k=1}^{n-1} b_k (x_{k+1} - x_k) \end{aligned} \quad (III-3)$$

Con estas notaciones, la línea recta tiene los siguientes coeficientes.

$$\begin{aligned} a &= \frac{3 \sum_{k=1}^{n-1} (2a_k - b_k) (x_{k+1} - x_k)}{(x_n - x_1)^3} \\ b &= \frac{2 \sum_{k=1}^{n-1} (x_{k+1}^3 - x_k^3)}{(x_n - x_1)^4} B - \frac{3 \sum_{k=1}^{n-1} (x_{k+1} - x_k)}{(x_n - x_1)^3} A \end{aligned} \quad (III-4)$$

3.2.2.d Reflexiones en fachadas de edificios y otros obstáculos verticales

Las contribuciones de las reflexiones se tienen en cuenta por la introducción de fuentes o receptores imaginarios. Se tendrán en cuenta las reflexiones posteriores hasta una profundidad máxima de 3 reflexiones.

3.2.3 Modelo de propagación del sonido

3.2.3.a Cálculo aproximado

Para un receptor R se realizan los cálculos de acuerdo con los siguientes pasos:

1. Desglose de las fuentes de ruido en las fuentes puntuales, si no se han expresado como fuentes puntuales.
2. Determinar por bandas de frecuencia la potencia del sonido de cada fuente direccional.
3. Calcular la ocurrencia de probabilidad en condiciones favorables para cada fuente de dirección S_i al receptor $R (S_i, R)$.
4. Búsqueda de los caminos de propagación entre la fuente y el receptor: reflejada directa, y / o difractados.
5. En cada trayectoria de propagación
 - Cálculo de la atenuación en condiciones favorables.
 - Cálculo de la atenuación en condiciones homogéneas.
 - Cálculo de la presencia de condiciones favorables.
 - Cálculo del nivel de ruido a largo plazo para cada trayectoria.

6. Acumulación de los niveles sonoros a largo plazo para cada vía, por lo tanto permitiendo que el nivel de sonido total se calcule en el punto del receptor.

Cabe señalar que sólo la atenuación debido al efecto suelo (A_{ground}) y difracción (A_{dif}) se ven afectadas por las condiciones meteorológicas.

3.2.3.b Proceso de cálculo

Para una fuente puntual S de potencia de sonora direccional $L_{w,0,dir}$ y para una banda de frecuencia dada, el nivel de presión acústica continua equivalente en un punto R del receptor en determinadas condiciones atmosféricas se obtiene de acuerdo con las siguientes ecuaciones descritas a continuación.

3.2.3.c Nivel de sonoro en condiciones favorables (LF) para un camino (S, R)

$$L_F = L_{w,0,dir} - A_F \quad (III-5)$$

El término A_F representa la atenuación total a lo largo de la trayectoria de propagación en condiciones favorables, y se desglosa de la siguiente manera:

$$A_F = A_{div} + A_{atm} + A_{boundary,F} \quad (III-6)$$

donde

- A_{div} : Es la atenuación debida a la divergencia geométrica.
- A_{atm} : Es la atenuación debido a la absorción atmosférica.
- $A_{boundary,F}$: Es la atenuación debida al límite del medio de propagación en condiciones favorables. Puede contener los siguientes términos:
- $A_{ground,F}$: Atenuación debida a la tierra en condiciones favorables.
- $A_{dif,F}$: Atenuación debida a la difracción en condiciones favorables.

Para un camino y una banda de frecuencia determinada, se pueden dar los dos escenarios posibles siguientes:

- Ya sea $A_{ground,F}$ ($A_{dif,F} = 0$ dB) calculado sin difracción y $A_{boundary,F} = A_{ground,F}$
- O $A_{dif,F}$ ($A_{ground,F} = 0$ dB) calculado. El efecto del suelo se tiene en cuenta $A_{dif,F}$ en la misma ecuación. Por lo tanto $A_{boundary,F} = A_{dif,F}$

3.2.3.d Nivel de sonoro en condiciones homogéneas (LH) para un camino (S, R)

El procedimiento es estrictamente idéntico al caso de condiciones favorables presentadas en la sección anterior 3.2.3.c

$$L_H = L_{w,0,dir} - A_H \quad (III-7)$$

El término A_H representa la atenuación total a lo largo de la trayectoria de propagación en condiciones homogéneas y se desglosa de la siguiente manera:

$$A_H = A_{div} + A_{atm} + A_{boundary,H} \quad (III-8)$$

donde

- A_{div} : Es la atenuación debida a la divergencia geométrica.
- A_{atm} : Es la atenuación debido a la absorción atmosférica.
- $A_{boundary,H}$: Es la atenuación debida a al límite del medio de propagación en condiciones homogéneas.

Puede contener los siguientes términos:

- $A_{ground,H}$: Atenuación debida a la tierra en condiciones homogéneas.
- $A_{dif,H}$: Atenuación debida a la difracción en condiciones homogéneas.

Para un camino y una banda de frecuencia determinada, se pueden dar los dos escenarios posibles siguientes:

- Ya sea $A_{ground,H}$ ($A_{dif,H} = 0$ dB) calculado sin difracción y $A_{boundary,H} = A_{ground,H}$
- O $A_{dif,H}$ ($A_{ground,H} = 0$ dB) calculado. El efecto del suelo se tiene en cuenta $A_{dif,H}$ en la misma ecuación. Por lo tanto $A_{boundary,H} = A_{dif,H}$

3.2.3.e Nivel de sonoro a largo plazo para una camino (S,R)

El "largo plazo", nivel sonoro a lo largo de una trayectoria a partir de una fuente puntual dada se obtiene sumando la energía del nivel sonoro L_H en condiciones homogéneas y el nivel de ruido en condiciones favorables L_F

Estos niveles de sonido se ponderan por la presencia media p en condiciones favorables y en la dirección de la trayectoria(S, R).

$$L_{LT} = 10 \times \log \left[p \cdot 10^{\frac{L_F}{10}} + (1 - p) \cdot 10^{\frac{L_H}{10}} \right] \quad (III-9)$$

Nota: Los valores de ocurrencia de p se expresa en porcentajes. Así por ejemplo, si el valor de ocurrencia es 82%, la ecuación (III-9) tendría $p = 0,82$.

3.2.3.f Nivel de sonido “a largo plazo” en el punto R para todas los caminos

El nivel sonoro total a largo plazo en el receptor para una banda de una sola frecuencia se obtiene mediante la suma de las contribuciones de energía de todas las rutas N, todos los tipos incluidos

$$L_{tot,LT} = 10 \times \log \sum_n 10^{\frac{L_{n,LT}}{10}} \quad (III-10)$$

donde

- n : Es el índice entre los caminos S y R .

Teniendo en cuenta las reflexiones por medio de imágenes de fuentes que se describe en la Sección 3.4.5. El porcentaje de apariciones de las condiciones favorables en el caso de una trayectoria reflejada en un obstáculo vertical se toma para ser igual a la ocurrencia de la trayectoria directa.

Si S' es la imagen de la fuente de S , entonces la ocurrencia p' de la trayectoria (S', R) se toma p igual a la ocurrencia de la ruta (S, R).

3.2.3.g Nivel de sonido “a largo plazo” en el punto R en decibelios A (dBA)

El nivel de sonido total en decibelios A (dBA) se obtiene sumando los niveles en cada banda de frecuencia.

$$L_{Aeq,LT} = 10 \times \log \sum_i 10^{L_{tot,LT,i} + AWC_{f,i}} \quad (III-11)$$

donde

- i : Es el índice de la banda de frecuencia. AWC es la corrección de ponderación A de acuerdo con la norma internacional IEC 61672:2003.

Este nivel $L_{Aeq,LT}$ constituye el resultado final, es decir, a largo plazo del nivel de presión sonora ponderado A en el punto del receptor en un intervalo de tiempo de referencia específico (por ejemplo, día, tarde o noche o un tiempo más corto durante el día, la tarde o la noche, cuando las condiciones de origen sean constantes).

3.3 Análisis Propagación

3.3.1 Receptor

La altura del receptor no debe estar situada a menos de 2 m del suelo. Con una variación permitida de 0,10 m, para limitar cualquier incertidumbre en los resultados, en particular si está presente la difracción.

Por defecto, el método calcula los niveles de sonido sin tener en cuenta la última reflexión en la fachada del edificio, para un receptor cerca de la fachada.

Para cumplir con los requisitos de la normativa vigente así como con su aplicación en cuanto a los límites acústicos, los receptores generalmente se deben colocar 2 m por delante de las fachadas de edificios. Si se requiere tener en cuenta el efecto de fachada, se puede aproximar mediante:

- Añadiendo una corrección predefinida de + 3 dB(A) a $L_{Aeq, LT}$ calculado.
- Añadiendo una corrección más precisa en función de la frecuencia y las características del sitio.
- Calcular la reflexión de acuerdo con el método descrito en la Sección 3.4.5

3.3.2 Trayectorias elementales de propagación

En general, los cuatro tipos de Trayectorias a considerar, quedan descritas en las siguientes subsecciones.

3.3.2.a Trayectoria Tipo 1

La ruta desde la fuente hasta el receptor es “directa”, las trayectorias de propagación son rectas en vista plana. Pueden incluir difracciones en los bordes horizontales de los obstáculos (ver Figura 14). Este escenario es el más fácil de tratar.

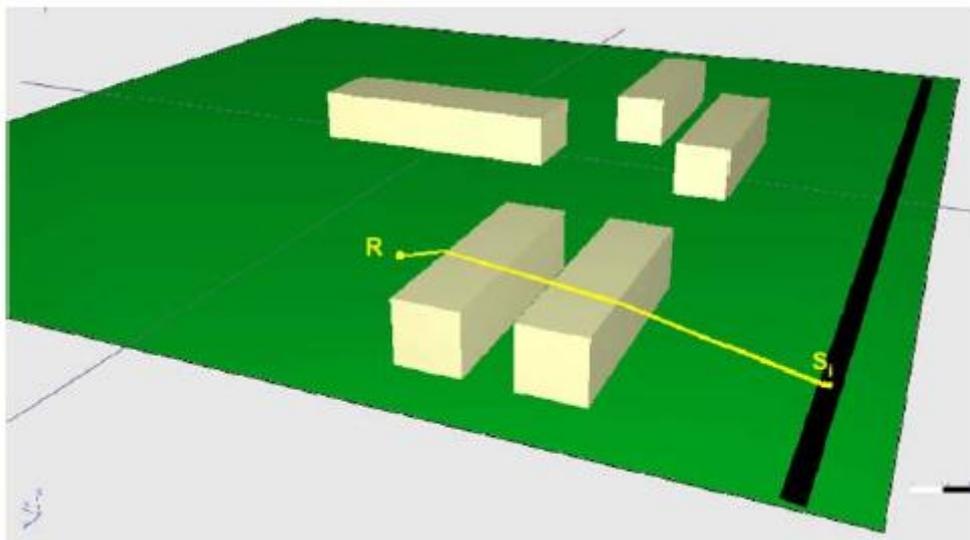


Figura 14. Trayectoria Tipo 1.

La sección 2D de la geometría se crea en un plano vertical que pasa a través de la ruta identificada.

3.3.2.b Trayectoria Tipo 2

Estas son trayectorias reflejadas por obstáculos en vertical o inclinadas ligeramente (<15 °), como se muestra en la Figura 10, también pueden incluir difracciones en los bordes horizontales de los obstáculos (véase la figura 16).

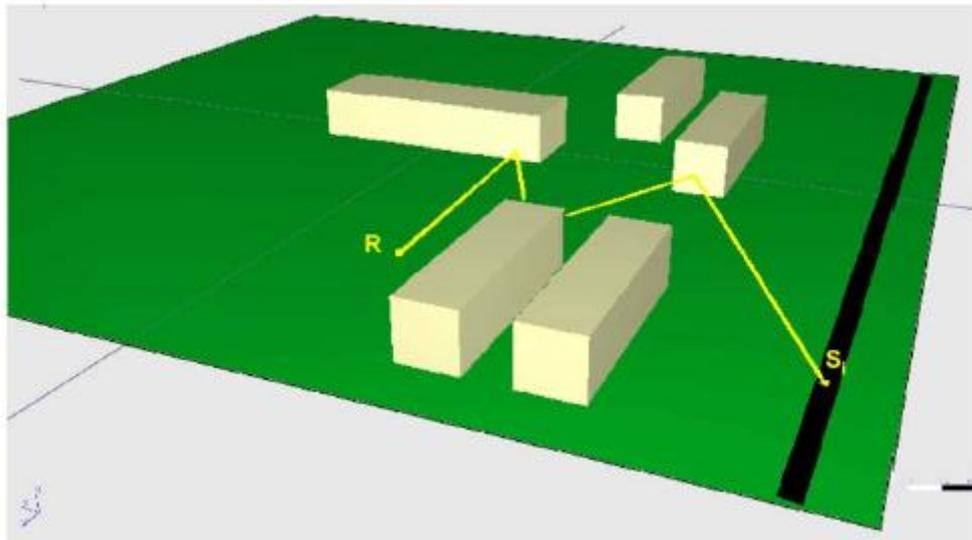


Figura 15. Trayectoria Tipo 2.

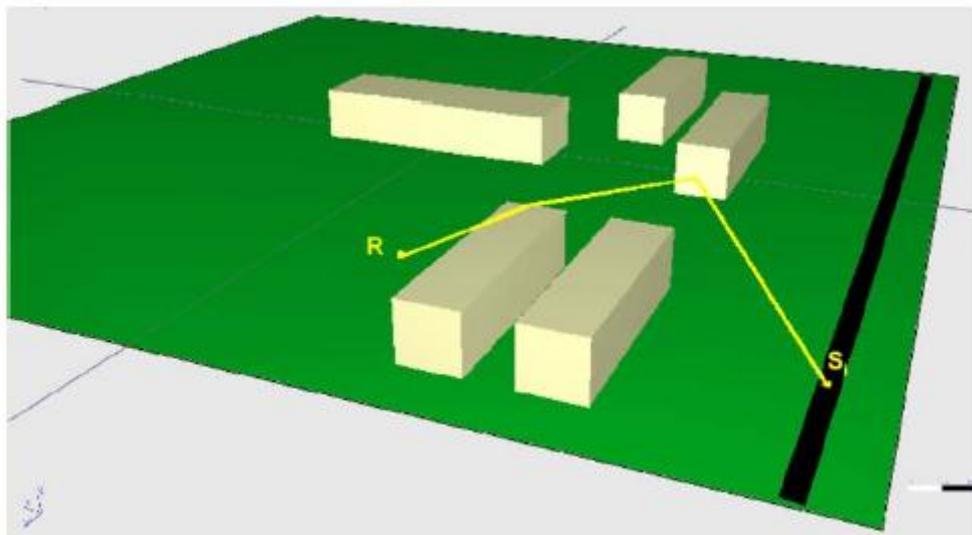


Figura 16. Trayectoria Tipo 2 con difracción horizontal en los bordes.

El principio consiste en aplicar el método de la imagen (véase la Sección 3.4.5). Una sección 2D de la geometría se crea con una sucesión de planos verticales que pasan a través de los segmentos rectos situados entre dos reflexiones. La sección se obtiene por desdoblamiento de estos planos, que se asemejan a una pantalla japonesa, y las reflexiones se toman en cuenta mediante la asignación de la potencia acústica. Un término que tiene en cuenta el coeficiente de reflexión de cada superficie vertical encontrada.

Si el orden es igual a 1, la potencia de L'_{w1} se considerada y se obtiene, de acuerdo con la ecuación (III-35). Si el orden es igual a 2, la potencia L'_{w2} a ser considerada y se obtiene aplicando la ecuación (III-35) donde L_w se sustituye por L'_{w1} y L'_{w1} por L'_{w2} . Esto continúa hasta el orden n deseado. El cálculo se realiza en la sección vertical 2D, de acuerdo con las indicaciones de la sección 3.4.5.

3.3.2.c Trayectoria Tipo 3

Caminos difractados por los bordes laterales de obstáculos (véase la Figura 17).

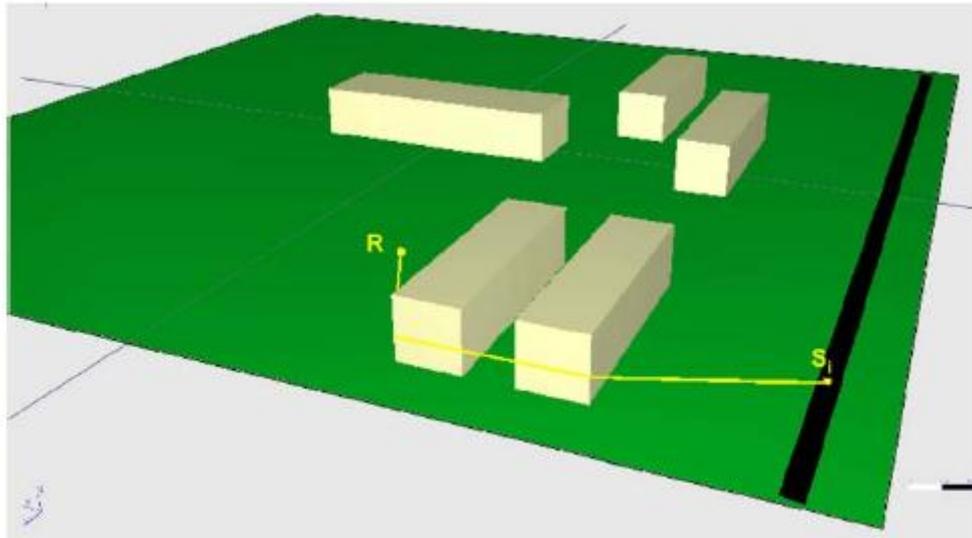


Figura 17. Trayectoria Tipo 3.

Primero determinar cada término de la ecuación (III-33) en condiciones homogéneas y la ecuación (III-34) en condiciones favorables:

- El término $\Delta_{dif(S,R)}$ se obtiene calculando las diferentes caminos de propagación δ entre la trayectoria directa y la trayectoria casco-convexa de los bordes laterales, en el plano horizontal.
- El termino A_{ground} se determina sin tener en cuenta la presencia de la pantalla protectora.

3.3.2.d Trayectoria Tipo 4

Estos son los trayectos mixtos que son difractados por los bordes laterales de obstáculos y reflejados por las superficies verticales (<15 °). El cálculo es por lo tanto el mismo que para el tipo 3, caminos con una simple corrección de la fuente sonora, como en el tipo 2.

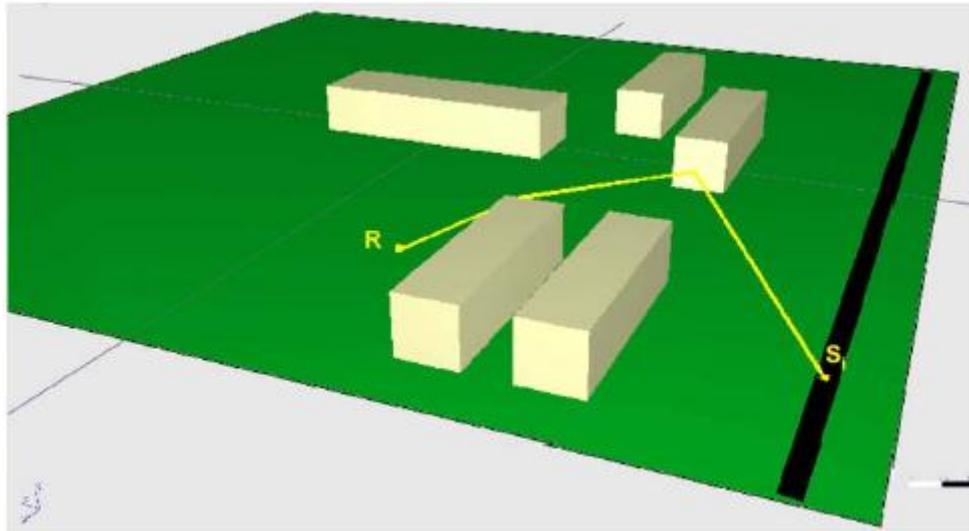


Figura 18. Trayectoria Tipo 4

3.4 Cálculo de una trayectoria elemental

Esta sección se aplica cuando la distancia euclidiana entre la fuente y el receptor no exceda de 2000 m. Los otros caminos son ignorados.

3.4.1 Divergencia geométrica

La atenuación debida a la divergencia geométrica, A_{div} , corresponde a una reducción en el nivel sonoro debido a la distancia de propagación. Para una fuente de sonido puntual en campo libre, la atenuación en dB es igual a:

$$A_{div} = 20 \times \log d + 11 \quad (III-12)$$

donde

- d : Es la distancia directa entre la fuente y el receptor.

3.4.2 Absorción atmosférica

La atenuación debida a la absorción atmosférica A_{atm} durante la propagación, para una distancia d , se da en dB mediante la ecuación:

$$A_{atm} = \alpha_{atm} \cdot d \cdot 1000 \quad (III-13)$$

donde

- d : Es la distancia entre la fuente y el receptor en metros (m).
- α_{atm} : Es la atenuación atmosférica, coeficiente en dB/Km en la frecuencia central nominal para cada banda de frecuencia, de acuerdo con la norma ISO 9613-1.

Los valores del coeficiente α_{atm} se indican para una temperatura de 15 ° C, una humedad relativa de 70% y una presión atmosférica de 101 325 Pa. Se calculan con las frecuencias de centro exacto de la banda de frecuencia. Estos valores cumplen con la norma ISO 9613-1. Con otros valores de temperatura y humedad se permite, siempre que éstos representan un promedio meteorológico a largo plazo.

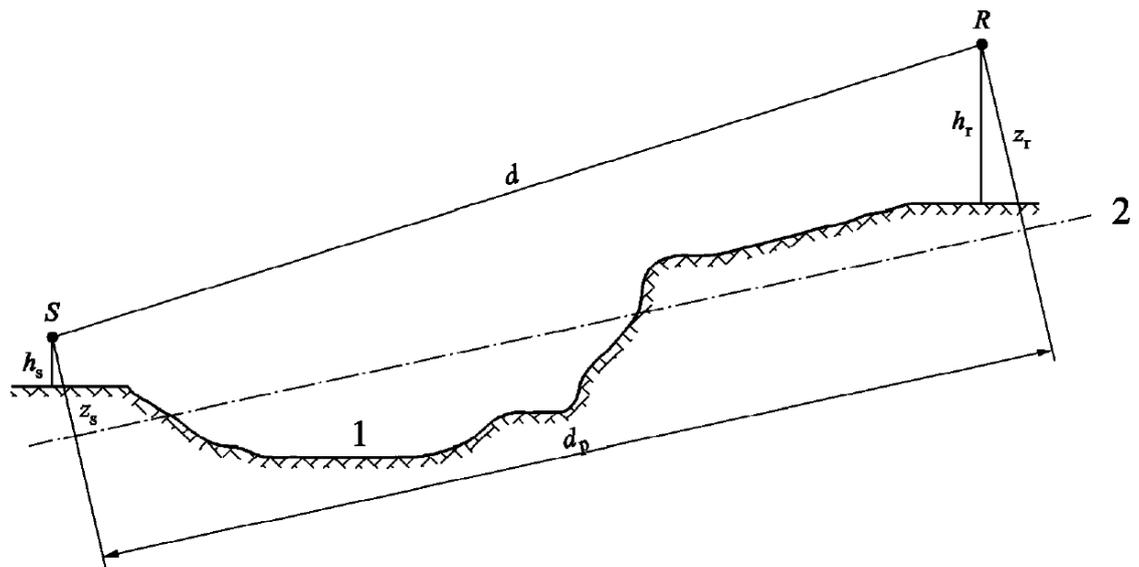
3.4.3 Efecto del suelo

La atenuación debida al efecto suelo es principalmente el resultado de la interferencia entre el sonido reflejado y el sonido que se propaga directamente desde la fuente al receptor. Está físicamente ligado a la absorción acústica de la tierra por encima del cual se propaga la onda sonora. Sin embargo, también es significativamente dependiente de las condiciones atmosféricas durante la propagación.

3.4.3.a Altura representativa sobre el suelo

Para tener en cuenta el relieve actual de la tierra a lo largo del trayecto de propagación, de la mejor manera posible, se introduce la noción de «altura equivalente», que sustituye a las alturas reales de las ecuaciones de efecto de suelo.

Es habitual referirse a las alturas reales sobre el suelo mediante la letra h y sobre las alturas equivalentes por la letra z . Las alturas equivalentes se obtienen de la media entre la fuente y el receptor respecto del suelo. Esto reemplaza el terreno real con un plano ficticio que representa el perfil medio de la tierra (véase la Figura 19). Las instrucciones sobre el método de cálculo del plano medio se dan en la Sección 3.2.2.



1 - Relieve real. 2 - Plano medio

Figura 19. Alturas equivalentes en relación con el suelo

La altura equivalente de un punto es su altura ortogonal en relación a este plano medio. La altura equivalente z_s y la altura equivalente del receptor z_r pueden ser definidas. La distancia entre la fuente y el receptor en proyección sobre el plano medio se observa por d_p .

Si la altura equivalente de un punto se hace negativa, es decir, si el punto está situado por encima del plano, se mantiene una altura nula, y el punto equivalente es entonces idéntico a su posible imagen si hay difracción.

3.4.3.b Caracterización acústica de suelo

Las propiedades de absorción acústica de la tierra están vinculadas principalmente a su porosidad. El suelo compacto es generalmente reflexivo y el suelo poroso es absorbente.

Para los requisitos operacionales de cálculo, la absorción acústica de un suelo está representada por un coeficiente adimensional G , entre 0 y 1. G es independiente de la frecuencia. La tabla 6 da los valores G al aire libre en tierra. En general, el promedio del coeficiente G sobre un camino toma valores entre 0 y 1. Aquí la media G representa la fracción absorbente a lo largo de la ruta. Para ver un ejemplo, consulte la Figura 20.

Description	Type	(kPa·s/m ²)	G value
Very soft (snow or moss-like)	A	12.5	1
Soft forest floor (short, dense heather-like or thick moss)	B	31.5	1
Uncompacted, loose ground (turf, grass, loose soil)	C	80	1
Normal uncompacted ground (forest floors, pasture field)	D	200	1
Compacted field and gravel (compacted lawns, park area)	E	500	0.7
Compacted dense ground (gravel road, car park)	F	2000	0.3
Hard surfaces (most normal asphalt, concrete)	G	20 000	0
Very hard and dense surfaces (dense asphalt, concrete, water)	H	200 000	0

Tabla 6. Valores de G para diferentes tipos de suelos

G_{path} se define como la fracción absorbente de suelo presente sobre toda la trayectoria completa.

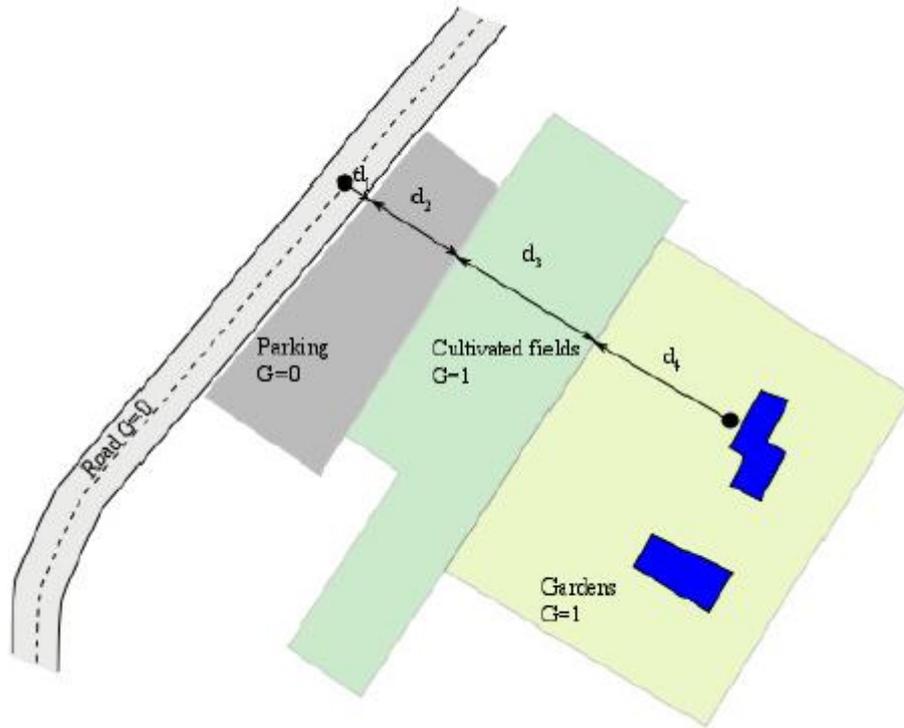
Cuando la fuente y el receptor están cerca $d_p \leq 30 (z_s + z_r)$, la distinción entre el tipo de terreno situado cerca de la fuente y el terreno situado cerca del receptor es insignificante. Si el receptor está muy cerca del borde de la plataforma, un parte es absorbida por la tierra y no debe ser considerado. Para tomar en cuenta esta observación, el factor G_{path} de suelo está por lo tanto en última instancia, corregido como sigue:

$$G'_{path} = \begin{matrix} G_{path} \frac{d_p}{30 z_s + z_r} + G_s & \text{Si } d_p \leq 30 z_s + z_r \\ G_{path} & \text{Otros} \end{matrix} \quad (III-14)$$

donde

- G_s es el factor suelo del área de origen. $G_s = 0$ para las plataformas de carretera, vías en placa. $G_s = 1$ para vías de ferrocarril. No hay una respuesta general en el caso de fuentes industriales y plantas.

G puede estar vinculado a la resistividad de flujo.



$$d = d_1 + d_2 + d_3 + d_4$$

$$G_{path} = \frac{0 \cdot d_1 + 0 \cdot d_2 + 1 \cdot d_3 + 1 \cdot d_4}{d} = \frac{d_3 + d_4}{d}$$

Figura 20. Determinación del coeficiente G_{path} de suelo sobre una trayectoria de propagación

Subsecciones 3.4.3.c y 3.4.3.d introducen el genérico \overline{G}_w y \overline{G}_m notaciones para la absorción del suelo. La tabla 7 da la correspondencia entre estas notaciones y las variables G_{path} y G'_{path} .

	Condiciones homogéneas			Condiciones favorables		
	A_{ground}	$A_{ground(S, O)}$	$A_{ground(O, R)}$	A_{ground}	$A_{ground(S, O)}$	$A_{ground(O, R)}$
\overline{G}_w	G'_{path}			G_{path}		
\overline{G}_m	G'_{path}			G_{path}	G'_{path}	G_{path}

Tabla 7. Correspondencia entre \overline{G}_w y \overline{G}_m y (G_{path} , G'_{path})

3.4.3.c Cálculos en condiciones homogéneas

La atenuación debida al efecto suelo en condiciones homogéneas se calcula de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

Si $G_{path} \neq 0$

$$A_{ground,H} = \max \left[-10 \times \log 4 \frac{k^2}{d_p^2} z_s^2 - \frac{2C_f}{k} z_s + \frac{C_f}{k} z_r^2 - \frac{2C_f}{k} z_r + \frac{C_f}{k} \right], A_{ground,H,min} \quad (III-15)$$

donde

- $k = \frac{2\pi f_m}{c}$
- f_m : Es la frecuencia central nominal de la banda de frecuencias considerada, en Hz.
- c : es la celeridad del sonido en el aire, tomado como a 340 m /s.

C_f : se define mediante

$$C_f = d_p \frac{1+3wd_p e^{-wd_p}}{1+wd_p} \quad (III-16)$$

donde los valores de w son dados por la siguiente ecuación:

$$w = 0.0185 \frac{f_m^{2.5} \overline{G_w^{2.6}}}{f_m^{1.5} \overline{G_w^{2.6}} + 1.3 \times 10^3 f_m^{0.75} \overline{G_w^{1.3}} + 1.16 \times 10^6} \quad (III-17)$$

$\overline{G_w}$ puede ser igual a cualquier G_{path} o G'_{path} en función de si el efecto del suelo se calcula con o sin difracción, de acuerdo con la naturaleza del punto de origen. Esto se especifica en los siguientes apartados.

$$A_{ground,H,min} = -3 \ 1 - \overline{G_m} \quad (III-18)$$

es el límite inferior de $A_{ground,H}$

Para una trayectoria (Si, R) en condiciones homogéneas sin difracción:

$$\begin{aligned} \overline{G_w} &= G'_{path} \\ \overline{G_m} &= G'_{path} \end{aligned}$$

Con difracción, consulte la Sección 3.4.4 para las definiciones de $\overline{G_w}$ y $\overline{G_m}$

$$\text{Si } G_{path} = 0 : A_{ground,H} = -3 \text{ dB}$$

El término $-3(1-\overline{G_m})$ tiene en cuenta el hecho de que cuando la fuente y el receptor están muy separados.

3.4.3.d Cálculos en condiciones favorables

El efecto suelo en condiciones favorables se calcula con la ecuación de $A_{ground,H}$ siempre y cuando las modificaciones sean las siguientes:

Si $G_{path} \neq 0$

- En la ecuación de $A_{ground,H}$ la altura z_s y z_r se sustituyen por $z_s + \delta z_s + \delta zT$ y $z_r + \delta z_r + \delta zT$ respectivamente, donde

$$\begin{aligned}\delta z_s &= a_0 \frac{z_s}{z_s+z_r} \frac{d_p^2}{2} \\ \delta z_r &= a_0 \frac{z_r}{z_s+z_r} \frac{d_p^2}{2}\end{aligned}\quad (III-19)$$

$a_0 = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ es el inverso del radio de curvatura.

$$\delta z_r = 6 \cdot 10^{-3} \frac{d_p}{z_s + z_r}$$

b) El límite inferior de $A_{ground, F}$ depende de la geometría del camino:

$$A_{ground, F, min} = \begin{cases} -3 \frac{1 - \overline{G}_m}{1 + 2 \frac{30 z_s+z_r}{d_p}} & \text{Si } d_p \leq 30 z_s + z_r \\ -3 \frac{1 - \overline{G}_m}{1 + 2 \frac{30 z_s+z_r}{d_p}} & \text{otros} \end{cases} \quad (III-20)$$

Si $G_{path} = 0$

$$A_{ground, F} = A_{ground, F, min}$$

La corrección de altura δz_s y δz_r transmitir el efecto del rayo de sonido. δz_T representa el efecto de la turbulencia.

\overline{G}_m también puede ser igual a cualquiera de las dos G_{path} o G'_{path} en función de si el efecto de suelo se calcula con o sin difracción, y de acuerdo con la naturaleza de punto de origen. Esto se especifica en los apartados siguientes

Para una trayectoria (S_i, R) en condiciones favorables, sin difracción:

$$\begin{aligned}\overline{G}_m &= G'_{path} \text{ en ecuación (III-17)} \\ \overline{G}_m &= G_{path}\end{aligned}$$

Con difracción, consulte la Sección 3.4.4 para las definiciones de \overline{G}_w y \overline{G}_m .

3.4.4 Difracción

Como regla general, la difracción debe ser estudiada en la parte superior de cada obstáculo situado en la trayectoria de propagación. Si la ruta pasa 'suficientemente alto' por encima del borde de difracción, $A_{dif} = 0$ se puede configurar y calcular una vista directa, en particular mediante la evaluación de A_{ground} (Sección.3.4.3).

En la práctica, para cada frecuencia central de la banda de frecuencias, la diferencia de caminos δ se compara con la cantidad $-\lambda / 20$. Si la diferencia de caminos λ es menor que $-\lambda / 20$, no hay necesidad de calcular A_{dif} para la banda de frecuencia considerada. En otras palabras, $A_{dif} = 0$. De lo contrario, A_{dif} se calcula como se describe en el resto

de este apartado. Esta regla se aplica tanto a difracción simple como múltiple en condiciones homogéneas y favorables.

Cuando, para una banda de frecuencias, se realiza un cálculo de acuerdo con el procedimiento descrito en esta sección, A_{ground} se establece igual a 0 dB en el cálculo de la atenuación total. El efecto de suelo se tiene en cuenta directamente en la ecuación de difracción del cálculo general.

Las ecuaciones propuestas aquí se utilizan para procesar la difracción en pantallas delgadas, pantallas gruesas, edificios, tierra bermas (natural o artificial), y bordes de terraplenes, desmontes y viaductos.

Cuando varios obstáculos que producen difracción se encuentran en un trayecto de propagación, estos son tratados como una sola difracción múltiple mediante la aplicación del procedimiento descrito en la Sección 3.4.4.c.

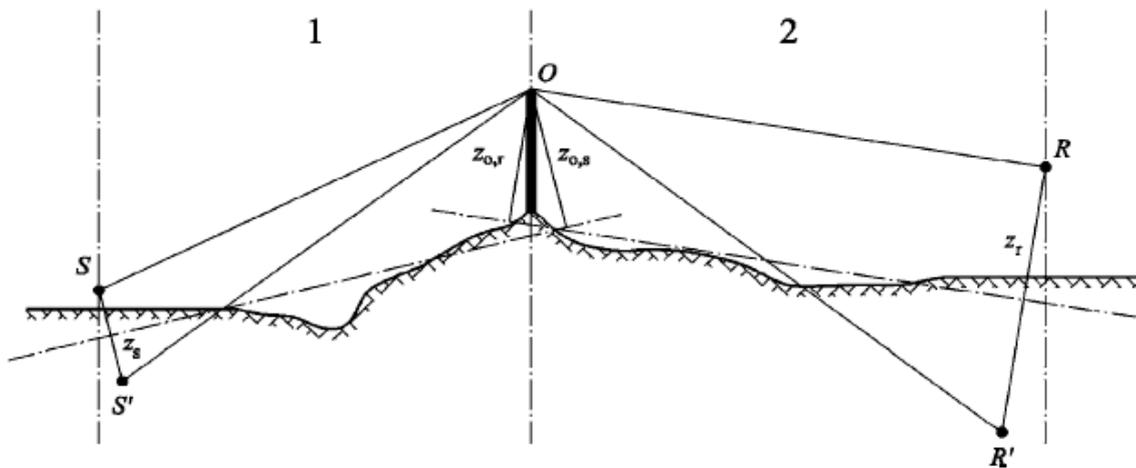
Los procedimientos presentados aquí se utilizan para calcular las atenuaciones en ambas condiciones, homogéneas y favorables. La flexión de los rayos se tiene en cuenta en el cálculo de la diferencia de caminos y para calcular los efectos de la tierra antes y después de difracción.

3.4.4.a Principios generales

La figura 21 ilustra el método general de cálculo de la atenuación debida a la difracción. Este método se basa en dividir la trayectoria de propagación en dos partes: el camino del "lado de la fuente", que se encuentra entre la fuente y el punto de difracción, y la ruta de la "parte del receptor", que se encuentra entre el punto de difracción y el receptor.

Se calculan:

- Efecto suelo, lado de la fuente, $\Delta_{ground(S, O)}$
- Efecto suelo, lado del receptor, $\Delta_{ground(O, R)}$
- Tres difracciones
 - Entre la fuente S y el receptor R : $\Delta_{dif(S,R)}$
 - Entre la imagen de la fuente S' y R : $\Delta_{dif(S',R)}$
 - Entre S y la imagen del receptor R' : $\Delta_{dif(S,R')}$



1 – Lado de la fuente
 2 – Lado del receptor

Figura 21. Cálculo de la atenuación geométrica debida a la difracción

donde

- S : Es la fuente.
- R : Es el receptor.
- S' : Es la imagen de la fuente en relación con el lado de la fuente respecto al plano medio del suelo.
- R' : Es la imagen del receptor en relación con el lado del receptor respecto al plano medio del suelo.
- O : Es el punto de difracción.
- z_s : Es la altura equivalente de la fuente S en relación con el lado del plano medio de fuente.
- $z_{o,s}$: Es la altura equivalente de la difracción en el punto O en relación con el plano medio del lado de la fuente.
- z_r : Es la altura equivalente del receptor R en relación con el lado del plano medio del receptor.
- $z_{o,r}$: Es la altura equivalente de la difracción en el punto O en relación con el plano medio del lado del receptor.

La irregularidad del terreno entre la fuente y el punto de difracción, y entre el punto de difracción y el receptor, se tiene en cuenta por medio de alturas equivalentes calculadas en relación con el plano medio de tierra, el lado de la fuente primero y después el lado del receptor, de acuerdo con el método descrito en la subsección 3.4.3.a.

3.4.4.b Difracción pura

Para la difracción pura, sin efectos de tierra, la atenuación viene dada por:

$$A_{dif} = \begin{matrix} 10C_h \cdot \log & 3 + \frac{40}{\lambda} C'' \delta & \text{Si } \frac{40}{\lambda} C'' \geq -2 \\ 0 & & \text{Otros} \end{matrix} \quad (III-21)$$

donde

$$C_h = \min \frac{f_m h_0}{250}, 1 \quad (III-22)$$

donde

- f_m : Es la frecuencia central nominal de una banda de frecuencia.
- h_0 : Es el mayor de las dos alturas, la del borde de difracción en relación con el lado de la fuente o el receptor.
- λ : Es la longitud de onda a la frecuencia central nominal de la banda de frecuencias considerada.
- δ : Es la diferencia de caminos entre la trayectoria difractada y la trayectoria directa (véase el sub apartado 3.4.4.c).
- C'' : Es un coeficiente usado para tener en cuenta las difracciones múltiples.

$C'' = 1$ para una difracción simple.

Para una difracción múltiple, si e es la distancia total entre la difracción más cercana a la fuente y a la difracción más cercana del receptor (ver Figuras 22 y 24) y si e excede 0,3 m (de otro modo $C'' = 1$), este coeficiente se define por:

$$C'' = \frac{1 + 5\lambda e^2}{1 + 3 + 5\lambda e^2} \quad (III-23)$$

Los valores de Δ_{dif} son:

- Si $\Delta_{dif} < 0$: $\Delta_{dif} = 0$ dB
- Si $\Delta_{dif} > 25$: $\Delta_{dif} = 25$ dB

3.4.4.c Cálculo de las diferentes trayectorias

La diferencia de caminos δ se calcula en un plano vertical que contiene a la fuente y al receptor. Esta es una aproximación en relación con el principio de Fermat. La aproximación sigue siendo aplicable en este caso (líneas de fuente). La diferencia de camino δ se calcula como en las figuras siguientes de la subsección 3.4.4.c, sobre la base de las situaciones encontradas.

3.4.4.c.1 Condiciones homogéneas

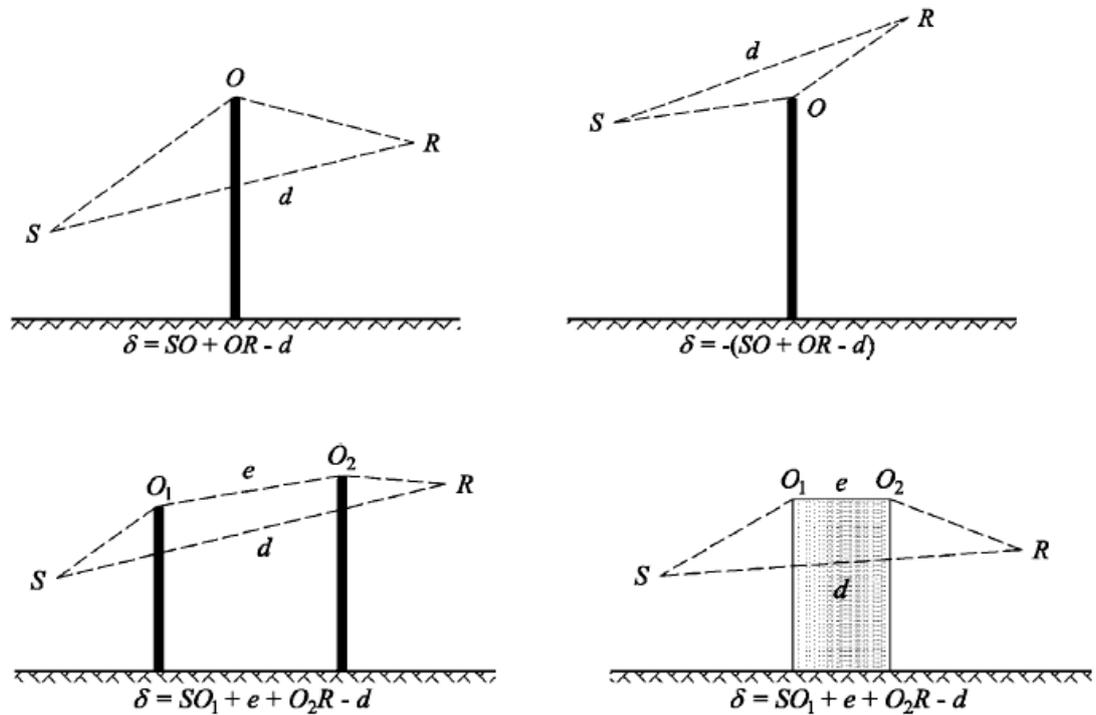


Figura 22. Cálculo de los diferentes caminos en condiciones homogéneas. O , O_1 y O_2 son los puntos de difracción.

Nota: Para cada configuración, la expresión de δ es dada.

3.4.4.c.2 Condiciones favorables

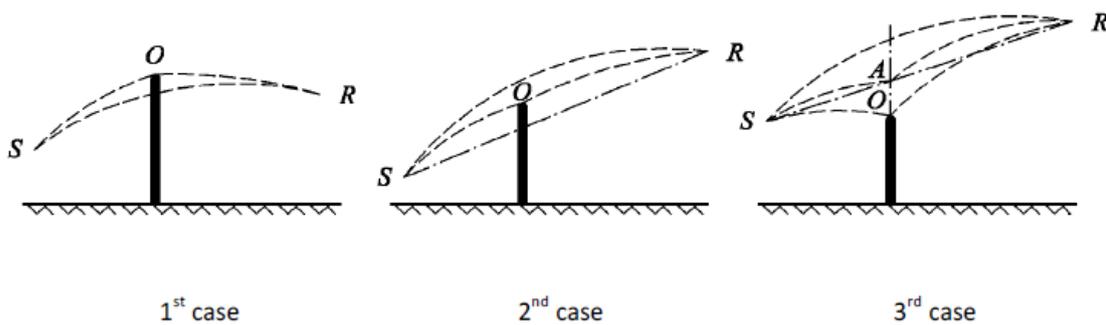


Figura 23. Cálculo de las diferentes trayectorias en condiciones favorables.

En condiciones favorables, se considera que los tres rayos sonoros curvos, SO , OR y SR tienen un radio de curvatura idéntica Γ definida por:

$$\Gamma = \max(1000, 8d) \quad (III-24)$$

La longitud de la curva de un rayo sonoro MN se observó en condiciones favorables.

Esta longitud es igual a:

$$MN = 2\Gamma \arccos \frac{MN}{2\Gamma} \quad (III-25)$$

En principio, tres escenarios deben ser considerados en el cálculo de la diferencia de caminos en condiciones favorables δ_F (Ver Figura 23). En la práctica, dos ecuaciones son suficientes:

- Si la recta del rayo sonoro SR está enmascarado por el obstáculo (primer y segundo caso en la Figura 23):

$$\delta_F = SO + OR - SR \quad (III-26)$$

- Si la recta del rayo sonoro SR no está enmascarada por el obstáculo (tercer caso en Figura 23):

$$\delta_F = 2SA + 2AR - SO - OR - SR \quad (III-27)$$

donde

- A es la intersección de la recta de rayos sonoros SR y la extensión del obstáculo difractante.

Para las múltiples difracciones en condiciones favorables:

- Determinar el casco convexo definido por el borde potencial de diferentes difracciones.
- Eliminar los bordes de difracción que no están en el límite de la envolvente convexa.
- Calcular δ_F sobre la base de las longitudes curvadas de los rayos sonoros, desglosando el camino difractada en tantos segmentos curvos como sea necesario.

$$\delta_F = SO_1 + \sum_{i=1}^{n-1} O_i O_{i+1} + O_n R - SR \quad (III-28)$$

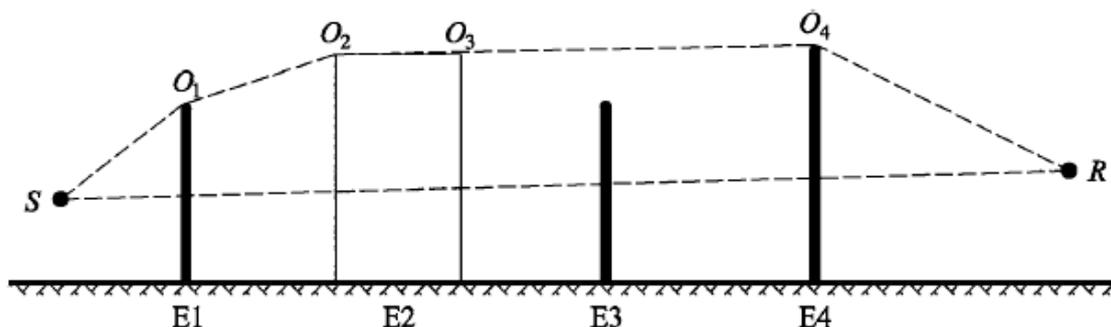


Figura 24. Ejemplo del cálculo de la diferencia de caminos en condiciones favorables, en el caso de difracciones múltiples

En el escenario que se presenta en la Figura 18, la diferencia de camino es:

$$\delta_F = SO_1 + O_1O_2 + O_2O_3 + O_3O_4 + +O_4R - SR \quad (III-29)$$

3.4.4.d Cálculo de la atenuación A_{dif}

La atenuación debida a la difracción, teniendo en cuenta los efectos de la tierra en el lado de la fuente y en el lado del receptor, se calcula de acuerdo con las ecuaciones generales siguientes:

$$\Delta_{dif} = \Delta_{dif(S,R)} + \Delta_{ground(S,O)} + \Delta_{ground(O,R)} \quad (III-30)$$

donde

- $\Delta_{dif(S,R)}$: Es la atenuación debida a la difracción entre la fuente S y el receptor R .
- $\Delta_{ground(S,O)}$: Es la atenuación debida al efecto suelo en el lado de la fuente, ponderado por el difracción en el lado de la fuente (ver apartado 3.4.4.d.1).
- $\Delta_{ground(O,R)}$: Es la atenuación debida al efecto suelo en el lado del receptor, ponderado por la difracción en el lado del receptor (ver apartado 3.4.4.d.2).

3.4.4.d.1 Calculo del término $\Delta_{ground(S, O)}$

$$\Delta_{ground S,O} = -20 \log \left[1 + 10^{\frac{-A_{ground(S,O)}}{20}} - 1 \right] \cdot 10^{\frac{-\Delta_{dif(S',R)} - \Delta_{dif(S,R)}}{20}} \quad (III-31)$$

donde

- $\Delta_{ground(S,O)}$: Es la atenuación debida al efecto suelo entre la fuente S y el punto de difracción O . Este término se calcula como se indica en la subsección 3.4.3.c en condiciones homogéneas y en la subsección 3.4.3.d en condiciones favorables, con las siguientes hipótesis:
 - $Z_r = Z_{O, S}$
 - G_{path} : Es calculado entre S y O .
 - En condiciones homogéneas: $G_w = G'_{path}$ en la ecuación (III-17), $G_m = G'_{path}$ en la ecuación (III-18).
 - En condiciones favorables: $G_m = G_{path}$ en la ecuación (III-17) $G_m = G'_{path}$ en la ecuación (III-20).

- $\Delta_{dif(S',R)}$: Es la atenuación debida a la difracción entre la imagen de la fuente S' y R , calculado como en la subsección 3.4.4.b.
- $\Delta_{dif(S,R)}$: Es la atenuación debida a la difracción entre la fuente S y R , calculado como en la subsección 3.4.4.b.

3.4.4.d.2 Calculo del termino $\Delta_{ground(O,R)}$

$$\Delta_{ground O,R} = -20 \log \left[1 + 10^{\frac{-A_{ground(O,R)}}{20}} - 1 \right] \cdot 10^{\frac{-\Delta_{dif(S,R)} - \Delta_{dif(S,R)}}{20}} \quad (III-32)$$

donde

- $\Delta_{ground(O,R)}$: Es la atenuación debida al efecto del suelo entre el punto de difracción O y el receptor R . Este término se calcula como se indica en la subsección 3.4.3.c en condiciones homogéneas y en la subsección 3.4.3.d en condiciones favorables, con la siguiente hipótesis:
- $Z_S = Z_{O,R}$
- G_{path} : Es calculado entre O y R .
- En condiciones homogéneas: G_w en la ecuación (III-17), y $G_m = G_{path}$ en la ecuación (III-18).
- En condiciones favorables: G_w en la ecuación (III-17) $G_m = G'_{path}$ en la ecuación (III-20).
- $\Delta_{dif(S,R')}$: Es la atenuación debida a la difracción entre la imagen del receptor R' y S , calculado como en la subsección 3.4.4.b.
- $\Delta_{dif(S,R)}$: Es la atenuación debida a la difracción entre la fuente S y R , calculado como en la subsección 3.4.4.b.

3.4.4.e Escenarios bordes verticales

La ecuación (III-21) se puede utilizar para calcular las difracciones en los bordes verticales (difracciones laterales). Si este es el caso, se toma $A_{dif} = \Delta_{dif(S,R)}$ y A_{ground} se mantiene. Además, A_{atm} y A_{ground} se calculan a partir de la longitud total de la trayectoria de propagación. A_{div} sigue calculándose a partir de la distancia directa d . Las ecuaciones (III-8) y (III-26), respectivamente, se convierten en:

$$A_H = A_{div} + A_{atm}^{path} + A_{ground,H}^{path} + \Delta_{dif,H(S,R)} \quad (III-33)$$

$$A_F = A_{div} + A_{atm}^{path} + A_{ground,F}^{path} + \Delta_{dif,H(S,R)} \quad (III-34)$$

Δ_{dif} : Se utiliza realmente en condiciones homogéneas en la ecuación (III-34).

3.4.5 Reflexiones sobre los obstáculos verticales

3.4.5.a Atenuación a través de la absorción

Las reflexiones sobre los obstáculos verticales se tratan por medio de las imágenes de las fuentes. Reflexiones sobre las fachadas de edificios y barreras acústicas son tratadas de esta manera.

Un obstáculo se considera que es vertical si su pendiente en relación con la vertical es inferior a 15°

Cuando se tratan de reflexiones sobre obstáculos significativamente inclinados, el método debe ser aplicado en 3D.

Los obstáculos en donde al menos una dimensión es inferior a 0,5 m deben ser ignorados en el cálculo de reflexiones, a excepción de configuraciones especiales.

Tenga en cuenta que las reflexiones sobre el terreno no se tratan aquí. Se tienen en cuenta en los cálculos de la atenuación debida a los límites (suelo, difracción).

Si L_w es el nivel de potencia de la fuente S y α_r el coeficiente de absorción de la superficie del obstáculo, por lo tanto el nivel de potencia de la imagen de la fuente de S' es igual a:

$$L_{w'} = L_w + 10 \log 1 - \alpha_r \quad (III-35)$$

donde $0 \leq \alpha_r < 1$

Las atenuaciones de propagación se ha descrito anteriormente (véanse las secciones 3.4.1 3.4.4 a) se aplican entonces a esta ruta (origen de la imagen, receptor), como para una trayectoria directa.

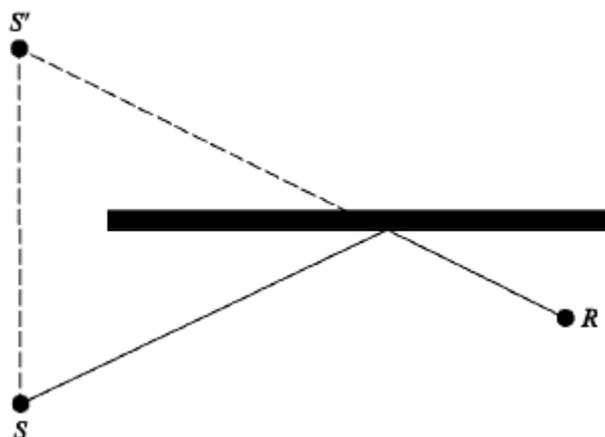


Figura 25. La reflexión especular sobre un obstáculo tratado por el método de origen de la imagen (S: fuente, S': origen de la imagen, R: receptor).

3.4.5.b Atenuación a través de la retro difracción

En la investigación geométrica de trayectos del sonido, durante la reflexión sobre un obstáculo vertical (pared, barrera, edificio), la posición del impacto del rayo en relación con el borde superior de este obstáculo determina la proporción más o menos importante de energía refleja eficazmente. Esta pérdida de energía acústica debida a que el rayo se somete a una reflexión es llamada la atenuación a través de retro difracción.

En el caso de reflexiones múltiples entre dos paredes verticales, no teniendo en cuenta este fenómeno de retro difracción, con esta sobreestimación crece el orden de reflexión considerado.

En el caso de un foso o zanja (véase por ejemplo la Figura 26), la atenuación a través de la retro difracción se debe aplicar a cada reflexión sobre los muros de contención.

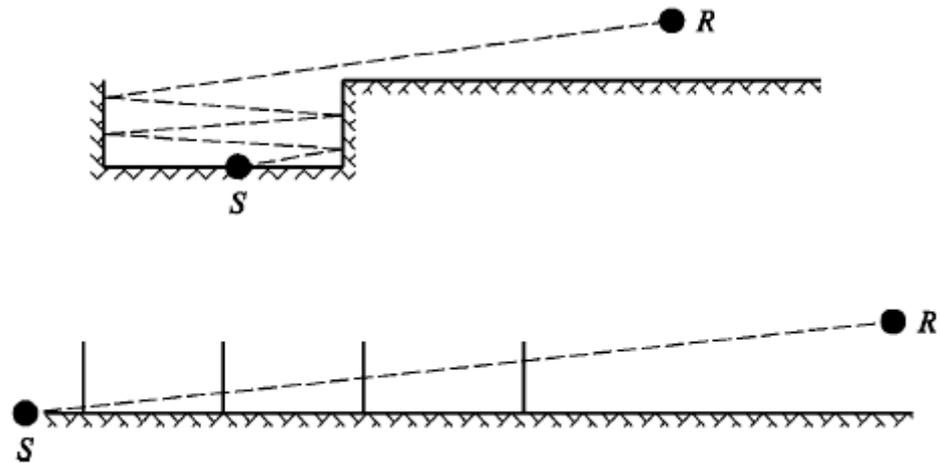


Figura 26. Rayo de sonido reflejado de orden 4 en una zanja: sección transversal real (Parte superior), desarrollo sección transversal (inferior).

En esta representación, el rayo de sonido llega al receptor sucesivamente pasando por los muros de contención de la zanja, que por lo tanto se pueden comparar con las aberturas.

En el cálculo de la propagación a través de una abertura, el campo de sonido en el receptor es la suma del campo directo y el campo difractado por los bordes de la abertura. Este campo difractado asegura la continuidad de la transición entre la zona clara y la zona de sombra. Cuando el rayo se aproxima al borde de la abertura, el campo directo es atenuado. El cálculo es idéntico al de la atenuación por una barrera en la zona clara.

La diferencia de caminos δ' asociada con cada retro difracción es el opuesto de la diferencia de caminos entre S y R relativamente en cada borde superior O (véase la Figura 27).

$$\delta = -SO + OR - SR \quad (III-36)$$

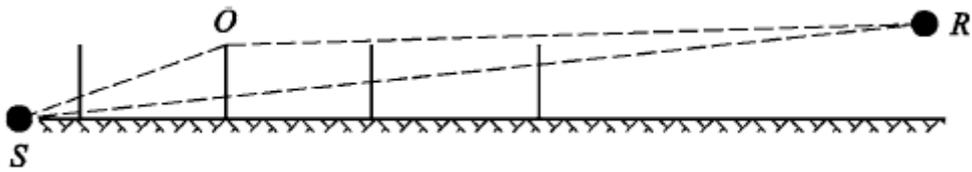


Figura 27. Diferencia de caminos para la segunda reflexión.

El signo "menos" de la ecuación (III-36) significa que el receptor está considerado en el área clara.

La atenuación a través de $\Delta_{retrodif}$ retro difracción se obtiene mediante la ecuación (III-37), que es similar a la ecuación (III-21) adaptada.

$$\Delta_{retrodif} = \begin{matrix} 10C_h \cdot \log 3 + \frac{40}{\lambda} \delta' & \text{Si } \frac{40}{\lambda} \delta' \geq -2 \\ 0 & \text{Otros} \end{matrix} \quad (III-37)$$

Esta atenuación se aplica al rayo directo cada vez que 'pasa a través' (refleja) en un muro o edificio. El nivel de potencia de la imagen de la fuente S' se convierte en:

$$L_{W'} = L_W + 10 \log 1 - \alpha_r - \Delta_{retrodif} \quad (III-38)$$

En las configuraciones de propagaciones complejas, las difracciones pueden existir entre las reflexiones, o entre el receptor y las reflexiones. En este caso, la retro difracción por las paredes se calcula teniendo en cuenta la trayectoria entre el origen y la primera difracción punto R' . Este principio se ilustra en la Figura 28.

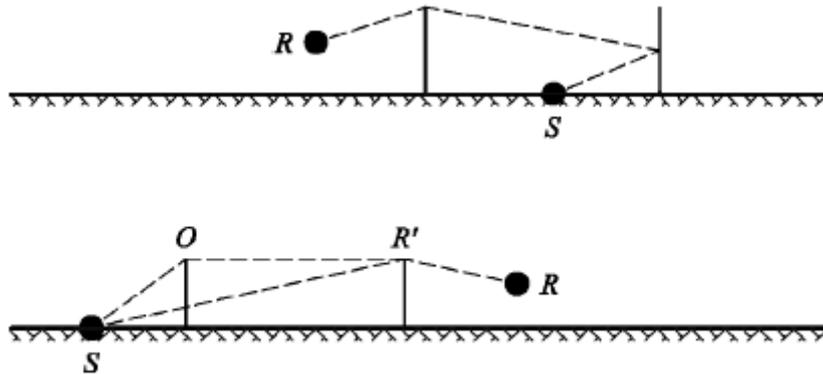


Figura 28. La diferencia de trayectoria por la presencia de una difracción: sección transversal real (parte superior), desarrollo de la sección transversal (inferior)

4. Dispositivo experimental y toma de datos

4.1 Dispositivo Experimental

En este capítulo se describen las diversas herramientas utilizadas para la realización del proyecto y campaña de medidas. Los principales instrumentos utilizados son sonómetro, micrófono, calibrador de sonido, software Brüel & Kjær y trípode.

4.1.2 Sonómetro

Sonómetro integrador de marca Brüel & Kjær, modelo 2260 “Investigator” .Nº de serie: 2027578. Software BZ7203, versión 1.2. (“Perfiles sonoros”).

Este sonómetro cumple con las distintas normativas vigentes:

- 105227_1_En
- IEC/EN 61672 Tipo 1
- IEC 651 Tipo 1
- IEC 1260, bandas de octava y 1/3 octava
- ANSI S1.4 Tipo 1
- ANSI S1.11, bandas de octava y 1/3 octava, orden 3, tipo 0-C

Las medidas y cálculos se hacen cumpliendo los estándar: ISO, DIM, BS, NBE, SS, SIA, NORM, NF, UNI, ASTM. El rango dinámico/lineal es de 90dB; si es ponderado “A”, 80 dB. Analiza en bandas de octava y 1/3 octava de 6.3 Hz – 20 KHz. Los parámetros de medida disponibles son L_{eq} , L_{max} , L_{min} , L_{peak} , L_n , L_{AE} , L_{EP} , d .

4.1.2 Micrófono

Micrófono de precisión marca Brüel & Kjær modelo 4189 N° de serie 1931036. Pre-polarizado. Rango de frecuencias de 6.3 Hz – 20 KHz, rango dinámico de 14.6 – 146 dB, sensibilidad de 50mV/Pa, capacitivo de 50 pF

4.1.3 Calibrador sonoro

Calibrador acústico multifunción marca Brüel & Kjær tipo 4230 N° de serie 1380268. Pistófono de frecuencia 1 KHz con un nivel de presión sonora de 94 dB.

4.1.4 Software

El software utilizado para importar y analizar las medidas, realizadas con el sonómetro es Noise Explorer Type 7815 Versión 4.5 Brüel & Kjaer.

4.1.5 Trípode

Trípode portátil modelo UA0801, utilizado para fijar el sonómetro a una altura de 1,2 metros y una inclinación de 45°.

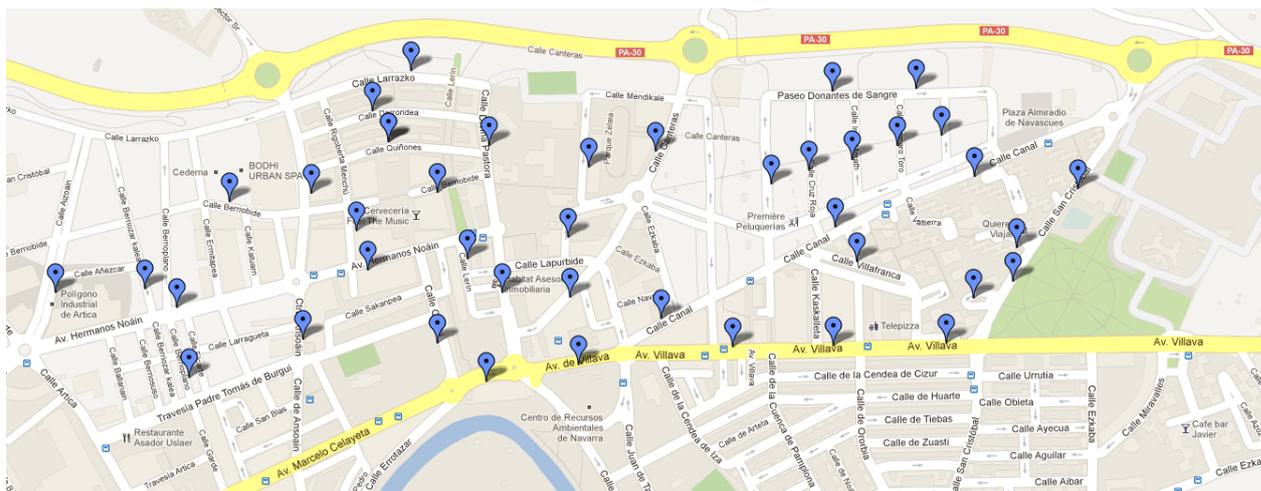


Figura 30. Situación puntos de medida en el municipio de Ansoáin y Pamplona.

4.2.2 Aforación

Previamente a la realización de las medidas diarias, se calibraba el sonómetro con una señal de 1 KHz y 94 dB, mediante el calibrador proporcionado por Brüel & Kjaer en el laboratorio de acústica de la Universidad Pública de Navarra.

Situado en el punto de medida se colocaba el trípode a 1,2 metros de altura respecto al nivel del suelo y una inclinación de 45° grados. El sonómetro se ha colocado en un entorno libre de obstáculos, en la medida de lo posible, buscando siempre una geometría plana del terreno.

A continuación se anotaban en una hoja de medida el código de medición, el día, la hora, el nombre de la calle, el número de carriles de la vía y la distancia al centro del carril o carriles.

Con todos los datos registrados del punto de medida daba comienzo la medición del L_{Aeq} registrado cada 10 milisegundos, durante los 10 minutos que dura la medida. En cada paso de vehículo, se anotaba en la hoja de medida el tipo de vehículo en función de su categoría (ligero tipo I, pesado tipo II - III y tipo IV, referente a los vehículos de dos ruedas), el minuto de paso, el carril, (cercano o lejano, si existen dos carriles) respecto al punto de medida, además de los cruces simultáneos de vehículos que circulaban por distintos carriles de la misma vía en el punto de medida. También se anotó la velocidad, en Km/h, de los vehículos y otras observaciones relevantes para la medida como pueden ser ruidos o características del tráfico.

En las distintas aforaciones se han intentado tomar el máximo número de variables que afectan al cálculo del L_{Aeq} . velocidad, con un rango de 20 a 100 Km/h, tipo de asfalto y registro de vehículos de las diferentes tipos (I, II, III, IV) de categorías, para cada paso de vehículos, garantizando de este modo un análisis más fiable.

4.2.3 Exportación de medidas.

Una vez realizadas varias aforaciones se importaban los datos del sonómetro al ordenador mediante el software propio del sonómetro Noise Explorer Type 7815 Versión 4.5 de Brüel & Kjaer. Para el análisis de los datos se procedió a seleccionar los pasos individuales de vehículos, ver ejemplo de análisis de un paso de vehículo en la sección 4.3.

4.3 Descripción de caso práctico

A continuación se detalla un caso práctico siguiendo el modelo de predicción y propagación de CNOSSOS descrito en los capítulos 3 y 4 respectivamente. De esta forma comprobamos la correlación de los resultados predichos por CNOSSOS y los valores reales medidos. Los pasos descritos a continuación para calcular el nivel de presión sonora en el receptor (predicho), se han llevado a cabo en todos los pasos de vehículos analizados.

La medida descrita a continuación se realizó el día 13/04/2012 a las 10:27 horas en la calle Cruz Roja de Pamplona, siendo la coordenada UMS: 611827 – 4743510 donde se instaló el sonómetro. El vehículo aforado es de categoría 1 y circulaba a 40 Km/h. El centro de la vía se encuentra a 5 metros del equipo de medida. En la figura 31 se muestra el L_{Aeq} medido para cada instante de tiempo para el paso de un vehículo. El sonómetro se configuró para recoger muestras cada 10 ms para el cálculo del L_{Aeq} .

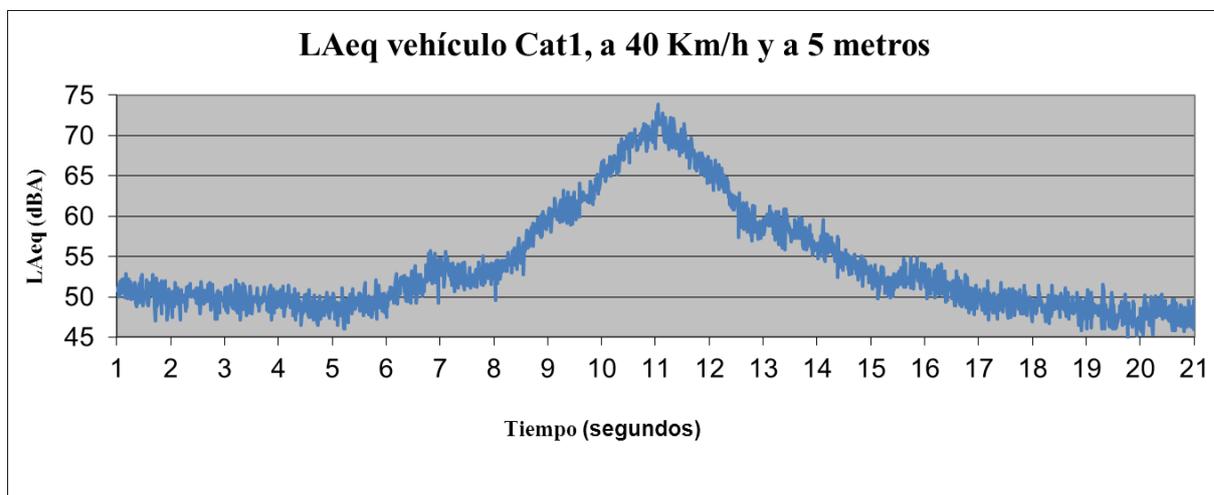


Figura 31. L_{Aeq} medido para el paso de un vehículo

4.3.1 Cálculo del $L_{A,eq,T}$ medido/real

Una vez realizada la aforación de 10 minutos con el sonómetro se procede a importar la medida con el software proporcionado por Brüel & Kjaer. En la medida realizada se anotan los pasos de vehículo válidos para el posterior análisis, ya que no todos los pasos cumplen con las condiciones para el estudio. Cada paso de vehículo válido es aislado y los valores medidos exportados a una hoja Excel para proceder a su análisis.

Con el paso del vehículo aislado calculamos la energía para cada valor muestreado cada 10 milisegundos con el fin de obtener la energía total de la medida haciendo el sumatorio de estas (ver ecuación IV-1).

$$\sum_1^n 10^{\frac{L_{A,eq}(n)}{10}} \quad (IV-1)$$

Para este ejemplo el sumatorio de la energía de los valores muestreados es de 2241145204

El cálculo del $L_{A,eq,T}$ se realiza mediante la ecuación IV-2 y muestra el nivel sonoro para el paso de ese vehículo en dBA.

$$L_{A,eq,T} = 10 \times \log \frac{N}{M} \times \text{Energía} \quad (IV-2)$$

donde:

- N : Es el número de vehículos registrados durante el fragmento de medida a analizar. En nuestro caso $N = 1$
- M : Es el número de muestreos de la medida en el periodo de tiempo a analizar. En nuestro caso el tiempo de paso del vehículo es de 20 segundos como hemos muestreado cada décima de segundo 2000 muestras.
- *Energía*: Es el sumatorio calculado con la ecuación (IV-1)

En el ejemplo descrito el $L_{A,eq,T}$ da un valor de 60,5 dBA.

El cálculo de $L_{A,eq,T}$ en una hora se calcula según la ecuación siguiente, sumando al resultado obtenido ($L_{A,eq,T}$) el valor de diez veces el logaritmo de la duración en segundos del paso del vehículo entre 3600 segundos que equivalen a una hora.

$$L_{A,eq,T,1H} = L_{A,eq,T} + 10 \times \log \frac{T}{3600} \quad (IV-3)$$

donde

- $L_{A,eq,T}$: Cálculo nivel sonoro equivalente en el periodo T, descrito en la ecuación (IV-2).
- T : Tiempo en segundos del paso del vehículo.

El valor producido durante una hora es de 37,9 dBA.

4.3.2 Cálculo del $L_{Aeq,T}$ predicho por CNOSSOS

Para el cálculo del $L_{Aeq,T}$ predicho por CNOSSOS hay que seguir unos pasos para calcular una serie de valores, los cuales se describen a continuación. En primer lugar debemos calcular el Rolling noise y el Propulsion noise. Las formulas del Rolling noise y Propulsión noise se detallaron en profundidad en los apartados 2.3.3 y 2.3.4; por ello no profundizaremos mucho en ellas en esta sección.

Mediante estos valores obtendremos los niveles de potencia sonora que genera un vehículo del tráfico rodado. Las fórmulas a emplear para el cálculo de ambos parámetros son las siguientes:

1- Rolling Noise

$$L_{WR,i,m} = A_{R,i,m} + B_{R,i,m} \times \log \frac{v_m}{v_{ref}} + \Delta L_{WR,i,m} \quad (IV-4)$$

$$\Delta L_{WR,i,m} = \alpha_{i,m} + \beta_m \times \log \frac{v}{v_{ref}} \quad (IV-5)$$

Donde los coeficientes de α_{im} y β_m se encuentran en la tabla 8. A partir de estos coeficientes obtenemos los valores para el cálculo de $\Delta L_{WR,i,m}$ ecuación (IV-5), tabla 9, Los coeficientes A_R y B_R se dan en la tabla 10, tanto los valores de $\Delta L_{WR,i,m}$, como A_R y B_R son necesarios para el cálculo final de la componente de potencia rolling noise $L_{WR,i,m}$ ecuación (IV-4), tabla 11. El resultado se expresa en dB, con referencia a 1pW, siendo la velocidad de referencia de 70 Km/h. Se expresara para cada banda de tercio de octava, desde 25 Hz a 10 KHz.

Coeficientes para corrección tipo de calzada (α_{im} y β_m)							
Frecuencia (Hz)	TBC	CSD 2/4	EAC	PA 6/16	2PA 4/8 - 11/16	SMA 0/6	SD 4/8
25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
40	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100	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
160	0,9	0,7	0,3	0,0	-0,5	0,0	1,7
200	1,7	1,4	0,7	0,0	-1,1	0,0	3,4
250	2,6	2,1	1,0	0,0	-1,6	0,0	5,1
315	2,5	2,4	1,1	0,0	-2,2	0,0	5,3
400	2,5	2,7	1,1	0,0	-2,7	0,0	5,4
500	2,4	3,0	1,2	0,0	-3,3	0,0	5,6
630	2,0	3,2	1,4	-0,4	-3,6	-0,7	5,3
800	1,6	3,3	1,7	-0,7	-4,0	-1,3	4,9
1000	1,2	3,5	1,9	-1,1	-4,3	-2,0	4,6
1250	1,6	2,4	1,5	-2,2	-5,2	-2,3	2,6
1600	2,0	1,2	1,2	-3,4	-6,0	-2,6	0,5
2000	2,4	0,1	0,8	-4,5	-6,9	-2,9	-1,5
2500	1,6	-0,2	0,5	-4,8	-6,8	-2,7	-1,8
3150	0,8	-0,5	0,3	-5,0	-6,8	-2,4	-2,2
4000	0,0	-0,8	0,0	-5,3	-6,7	-2,2	-2,5
5000	0,0	-0,5	0,0	-3,5	-4,5	-1,5	-1,7
6300	0,0	-0,3	0,0	-1,8	-2,2	-0,7	-0,8
8000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Índice de velocidad (β_m)	6,0	-5,0	0,0	-11,0	-6,0	-5,0	-4,0
Ponderado A. Corrección a 70 Km/h	1,4	2,7	1,3	-1,4	-4,6	-1,7	3,4

Tabla 8. Coeficientes para corrección tipo de calzada α_{im} y β_m

Corrección del tipo de cazada $\Delta L_{WR,road}$ (Cat 1)							
Frecuencia (Hz)	TBC	CSD 2/4	EAC	PA 6/16	2PA 4/8 - 11/16	SMA 0/6	SD 4/8
25	-1,5	1,2	0,0	2,7	1,5	1,2	1,0
31,5	-1,5	1,2	0,0	2,7	1,5	1,2	1,0
40	-1,5	1,2	0,0	2,7	1,5	1,2	1,0
50	-1,5	1,2	0,0	2,7	1,5	1,2	1,0
63	-1,5	1,2	0,0	2,7	1,5	1,2	1,0
80	-1,5	1,2	0,0	2,7	1,5	1,2	1,0
100	-1,5	1,2	0,0	2,7	1,5	1,2	1,0
125	-1,5	1,2	0,0	2,7	1,5	1,2	1,0
160	-0,6	1,7	0,3	2,7	1,0	1,2	2,7
200	0,2	2,6	0,7	2,7	0,4	1,2	4,4
250	1,1	3,3	1,0	2,7	-0,1	1,2	6,1
315	1,0	3,6	1,1	2,7	-0,7	1,2	6,3
400	1,0	3,9	1,1	2,7	-1,2	1,2	6,4
500	0,9	4,2	1,2	2,7	-1,8	1,2	6,6
630	0,5	4,4	1,4	2,3	-2,1	0,5	6,3
800	0,1	4,5	1,7	2,0	-2,5	-0,1	5,9
1000	-0,3	4,7	1,9	1,6	-2,8	-0,8	5,6
1250	0,1	3,6	1,5	0,5	-3,7	-1,1	3,6
1600	0,5	2,4	1,2	-0,7	-4,5	-1,4	1,5
2000	0,9	1,3	0,8	-1,8	-5,4	-1,7	-0,5
2500	0,1	1,0	0,5	-2,1	-5,3	-1,5	-0,8
3150	-0,7	0,7	0,3	-2,3	-5,3	-1,2	-1,2
4000	-1,5	0,4	0,0	-2,6	-5,2	-1,0	-1,5
5000	-1,5	0,7	0,0	-0,8	-3,0	-0,3	-0,7
6300	-1,5	0,9	0,0	0,9	-0,7	0,5	0,2
8000	-1,5	1,2	0,0	2,7	1,5	1,2	1,0
10000	-1,5	1,2	0,0	2,7	1,5	1,2	1,0

Tabla 9. Coeficientes para corrección tipo de calzada $\Delta L_{WR,road}$ (Cat 1)

Coeficientes para la emisión de potencia sonora de los vehículos (Cat 1)								
Frecuencia (Hz)	A _R	B _R	Frecuencia (Hz)	A _R	B _R	Frecuencia (Hz)	A _R	B _R
25	69,9	33,0	200	80,9	41,8	1600	91,5	37,0
31,5	69,9	33,0	250	78,9	38,6	2000	88,5	37,5
40	69,9	33,0	315	78,8	35,5	2500	84,9	37,5
50	74,9	30,0	400	80,5	32,9	3150	81,8	38,6
63	74,9	30,0	500	85,0	25,0	4000	78,7	39,6
80	74,9	30,0	630	87,9	25,0	5000	74,9	40,0
100	79,3	41,0	800	90,9	27,0	6300	71,8	39,9
125	82,0	41,2	1000	93,3	33,4	8000	69,1	40,2
160	81,2	42,3	1250	92,8	36,7	10000	65,6	40,3

Tabla 10. Coeficientes para la emisión de potencia sonora de los vehículos (Cat 1)

Rolling Noise (L_{WR}) para distintos tipos de calzada a $V = 40$ Km/h (Cat 1)							
Frecuencia (Hz)	TBC	CSD 2/4	EAC	PA 6/16	2PA 4/8 - 11/16	SMA 0/6	SD 4/8
25	60,4	63,1	61,9	64,6	63,3	63,1	62,9
31,5	60,4	63,1	61,9	64,6	63,3	63,1	62,9
40	60,4	63,1	61,9	64,6	63,3	63,1	62,9
50	66,2	68,8	67,6	70,3	69,1	68,8	68,6
63	66,2	68,8	67,6	70,3	69,1	68,8	68,6
80	66,2	68,8	67,6	70,3	69,1	68,8	68,6
100	67,9	70,6	69,3	72,0	70,8	70,6	70,3
125	70,5	73,2	72,0	74,7	73,4	73,2	73,0
160	70,4	72,8	71,2	73,6	71,9	72,1	73,6
200	71,0	73,4	71,4	73,4	71,1	72,0	75,1
250	70,7	72,8	70,5	72,2	69,4	70,7	75,6
315	71,2	73,8	71,3	72,8	69,4	71,4	76,4
400	73,5	76,4	73,6	75,2	71,3	73,7	78,9
500	79,9	83,1	80,1	81,6	77,1	80,1	85,5
630	82,4	86,2	83,2	84,1	79,7	82,3	88,1
800	84,5	88,9	86,0	86,3	81,8	84,3	90,2
1000	84,9	89,9	87,1	86,8	82,3	84,4	90,8
1250	84,0	87,5	85,4	84,4	80,1	82,8	87,5
1600	83,0	84,9	83,7	81,8	78,0	81,1	84,0
2000	80,3	80,7	80,2	77,6	73,9	77,7	78,9
2500	75,9	76,8	76,3	73,7	70,4	74,3	75,0
3150	71,8	73,1	72,7	70,1	67,1	71,2	71,2
4000	67,6	69,5	69,1	66,4	63,8	68,1	67,5
5000	63,7	65,9	65,2	64,4	62,1	64,9	64,5
6300	60,6	63,0	62,1	63,0	61,4	62,6	62,3
8000	57,9	60,5	59,3	62,0	60,8	60,5	60,3
10000	54,3	57,0	55,8	58,5	57,3	57,0	56,8
Banda Ancha	92,02	95,61	93,24	93,07	89,06	91,43	96,48

Tabla 11. Rolling Noise (L_{WR}) para distintos tipos de calzada a $V = 40$ Km/h (Cat 1)

2- Propulsion Noise

$$L_{WP,i,m} = A_{P,i,m} + B_{P,i,m} \times \frac{v - v_{ref}}{v_{ref}} + \Delta L_{WP,i,m} \quad (IV-6)$$

$$\Delta L_{W,P,i,m} = \text{Max } \alpha_{i,m}; 0 \quad (IV-7)$$

Donde los coeficientes de α_{im} se encuentran en la tabla 12. A partir de estos coeficientes obtenemos los valores para el cálculo de $\Delta L_{W,P,i,m}$ ecuación (IV-7). Los coeficientes A_P y B_P se dan en la tabla 13. Tanto los valores de $\Delta L_{WP,i,m}$, como A_P y B_P son necesarios para el cálculo final de la componente propulsion noise $L_{WP,i,m}$ ecuación (IV-6), tabla 14. El resultado se expresa en dB, con referencia a 1pW, siendo, la velocidad de referencia de 70 Km/h. Se expresará para cada banda de tercio de octava, desde 25 Hz a 10 KHz.

Corrección del tipo de calzada $\Delta L_{WP,road}$ (Cat 1)							
Frecuencia (Hz)	TBC	CSD 2/4	EAC	PA 6/16	2PA 4/8 - 11/16	SMA 0/6	SD 4/8
25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
40	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100	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
160	0,9	0,7	0,3	0,0	0,0	0,0	1,7
200	1,7	1,4	0,7	0,0	0,0	0,0	3,4
250	2,6	2,1	1,0	0,0	0,0	0,0	5,1
315	2,5	2,4	1,1	0,0	0,0	0,0	5,3
400	2,5	2,7	1,1	0,0	0,0	0,0	5,4
500	2,4	3,0	1,2	0,0	0,0	0,0	5,6
630	2,0	3,2	1,4	0,0	0,0	0,0	5,3
800	1,6	3,3	1,7	0,0	0,0	0,0	4,9
1000	1,2	3,5	1,9	0,0	0,0	0,0	4,6
1250	1,6	2,4	1,5	0,0	0,0	0,0	2,6
1600	2,0	1,2	1,2	0,0	0,0	0,0	0,5
2000	2,4	0,1	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
2500	1,6	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
3150	0,8	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
4000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6300	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 12. Coeficientes para corrección tipo de calzada $\Delta L_{WP,road}$ (Cat 1)

Coeficientes para la emisión de potencia sonora de los vehículos (Cat 1)								
Frecuencia (Hz)	A _P	B _P	Frecuencia (Hz)	A _P	B _P	Frecuencia (Hz)	A _P	B _P
25	87,0	0,0	200	82,3	7,0	1600	82,3	8,0
31,5	87,0	0,0	250	83,9	8,0	2000	82,6	8,0
40	87,0	0,0	315	83,3	8,0	2500	81,5	8,0
50	87,9	0,0	400	82,4	8,0	3150	80,2	8,0
63	90,8	-3,0	500	80,6	8,0	4000	78,5	8,0
80	89,9	0,0	630	80,2	8,0	5000	75,6	8,0
100	86,9	8,0	800	77,8	8,0	6300	73,3	8,0
125	82,6	6,0	1000	78,0	8,0	8000	71,0	8,0
160	81,9	6,0	1250	81,4	8,0	10000	68,1	8,0

Tabla 13. Coeficientes para la emisión de potencia sonora de los vehículos (Cat 1)

Propulsion Noise (L_{WP}) para distintos tipos de calzada a $V = 40$ Km/h (Cat 1)							
Frecuencia (Hz)	TBC	CSD 2/4	EAC	PA 6/16	2PA 4/8 – 11/16	SMA 0/6	SD 4/8
25	87,0	87,0	87,0	87,0	87,0	87,0	87,0
31,5	87,0	87,0	87,0	87,0	87,0	87,0	87,0
40	87,0	87,0	87,0	87,0	87,0	87,0	87,0
50	87,9	87,9	87,9	87,9	87,9	87,9	87,9
63	92,1	92,1	92,1	92,1	92,1	92,1	92,1
80	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9
100	83,5	83,5	83,5	83,5	83,5	83,5	83,5
125	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
160	80,2	80,0	79,6	79,3	79,3	79,3	81,0
200	81,0	80,7	80,0	79,3	79,3	79,3	82,7
250	83,1	82,6	81,5	80,5	80,5	80,5	85,6
315	82,4	82,3	81,0	79,9	79,9	79,9	85,2
400	81,5	81,7	73,6	79,0	79,0	79,0	84,4
500	79,6	80,2	80,1	77,2	77,2	77,2	82,8
630	78,8	80,0	83,2	76,8	76,8	76,8	82,1
800	76,0	77,7	86,0	74,8	74,8	74,8	79,3
1000	75,8	78,1	87,1	76,5	82,3	84,4	79,2
1250	79,6	80,4	85,4	74,4	74,4	74,4	80,6
1600	80,9	80,1	83,7	74,6	74,6	74,6	79,4
2000	81,6	79,3	80,2	78,0	78,0	78,0	79,2
2500	79,7	78,1	76,3	78,9	78,9	78,9	78,1
3150	77,6	76,8	77,1	79,2	79,2	79,2	76,8
4000	75,1	75,1	75,1	78,1	78,1	78,1	75,1
5000	69,9	69,9	69,9	69,9	69,9	69,9	69,9
6300	60,6	63,0	62,1	63,0	61,4	62,6	62,3
8000	67,6	67,6	67,6	67,6	67,6	67,6	67,6
10000	64,7	64,7	64,7	64,7	64,7	64,7	64,7
Banda Ancha	98,2	98,2	98,0	97,8	97,8	97,8	98,6

Tabla 14. Propulsion Noise (L_{WP}) para distintos tipos de calzada a $V = 40$ Km/h (Cat 1)

3- Efecto de las fuentes de ruido Rolling noise L_{WR} y Propulsion noise L_{WP} .

La tabla 15 muestra el efecto de cada una de las fuentes de ruido. Como vemos, para esta categoría 1 de vehículo ligero y velocidad de 40 Km/h, la componente *rolling noise* es claramente dominante en las bandas entre 500 y 1600 Hz, resaltado en color verde, mientras que la componente *propulsion noise* es dominante en las bandas bajas de 25 a 400 y en las bandas altas de 2000 a 10000 Hz, color rojo.

Evaluación de las fuentes de ruido $L_{WR} - L_{WP}$ para distintos tipos de cazada a $V = 40$ Km/h, (Cat 1)							
Frecuencia (Hz)	TBC	CSD 2/4	EAC	PA 6/16	2PA 4/8 - 11/16	SMA 0/6	SD 4/8
25	-26,6	-23,9	-25,1	-22,4	-23,7	-23,9	-24,1
31,5	-26,6	-23,9	-25,1	-22,4	-23,7	-23,9	-24,1
40	-26,6	-23,9	-25,1	-22,4	-23,7	-23,9	-24,1
50	-21,7	-19,1	-20,3	-17,6	-18,8	-19,1	-19,3
63	-25,9	-23,3	-24,5	-21,8	-23,0	-23,3	-23,5
80	-23,7	-21,1	-22,3	-19,6	-20,8	-21,1	-21,3
100	-15,6	-12,9	-14,1	-11,5	-12,7	-12,9	-13,2
125	-9,5	-6,8	-8,0	-5,4	-6,6	-6,8	-7,1
160	-9,9	-7,2	-8,4	-5,7	-7,5	-7,2	-7,4
200	-10,0	-7,3	-8,6	-5,9	-8,2	-7,3	-7,6
250	-12,4	-9,7	-11,0	-8,3	-11,1	-9,7	-10,0
315	-11,2	-8,5	-9,7	-7,0	-10,4	-8,5	-8,7
400	-7,9	-5,3	-6,5	-3,8	-7,7	-5,3	-5,5
500	0,3	3,0	1,8	4,4	-0,1	3,0	2,7
630	3,6	6,3	5,1	7,3	2,9	5,6	6,0
800	8,5	11,2	10,0	11,9	7,4	9,9	10,9
1000	9,2	11,8	10,6	12,2	7,8	9,8	11,6
1250	4,5	7,1	5,9	6,4	2,2	4,8	6,9
1600	2,2	4,9	3,6	2,9	-0,9	2,3	4,6
2000	-1,2	1,4	0,2	-1,6	-5,2	-1,5	-0,3
2500	-3,7	-1,3	-2,3	-4,4	-7,6	-3,8	-3,1
3150	-5,8	-3,6	-4,4	-6,7	-9,7	-5,5	-5,6
4000	-7,5	-5,6	-6,0	-8,6	-11,2	-7,0	-7,5
5000	-8,5	-6,3	-7,0	-7,8	-10,0	-7,3	-7,7
6300	-9,2	-6,9	-7,8	-6,9	-8,5	-7,3	-7,6
8000	-9,7	-7,0	-8,2	-5,6	-6,8	-7,0	-7,3
10000	-10,3	-7,7	-8,9	-6,2	-7,4	-7,7	-7,9

Tabla 15. Evaluación de las fuentes de ruido $L_{WR} - L_{WP}$ para distintos tipos de cazada a $V = 40$ Km/h, (Cat 1)

4- Fuente inferior y Fuente superior

El CNOSSOS define para los vehículos de categorías 1 a 3 dos fuentes puntuales equivalentes, inferior y superior. El cálculo de la potencia se describe continuando con el caso real.

4.1 – Fuente inferior

$$L_{W,dir,low,i,m} v = 10 \times 0,8 \times 10^{L_{WR,i,m}} + 0,2 \times 10^{L_{WP,i,m}} + \Delta L_{W,dir,i,m} \quad (IV-8)$$

4.2 – Fuente superior

$$L_{W,dir,high,i,m} v = 10 \times 0,2 \times 10^{L_{WR,i,m}} + 0,8 \times 10^{L_{WP,i,m}} + \Delta L_{W,dir,i,m} \quad (IV-9)$$

Donde $L_{WR, i, m}$ es el nivel de potencia acústica producido por el ruido de rodadura (Rolling Noise) y $L_{WP, i, m}$ es el nivel de potencia acústica correspondiente al ruido de la propulsión (Propulsion Noise) en ambas fórmulas IV-8 y IV-9. $\Delta L_{W, dir, i, m}$ es despreciada en esta primera aproximación para los dos tipos de fuentes. La tabla 16 y 17 muestran respectivamente los valores de la fuente inferior y superior para los diferentes tipos de vía a la velocidad de 40 Km/h para el vehículo correspondiente de categoría 1.

Fuente inferior ($L_{W, dir, low, i, m}$) para distintos tipos de calzada a $V = 40$ Km/h (Cat 1)							
Frecuencia (Hz)	TBC	CSD 2/4	EAC	PA 6/16	2PA 4/8 – 11/16	SMA 0/6	SD 4/8
25	80,0	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1
31,5	80,0	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1
40	80,0	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1
50	81,0	81,1	81,1	81,2	81,1	81,1	81,1
63	85,1	85,2	85,2	85,2	85,2	85,2	85,2
80	83,0	83,0	83,0	83,1	83,1	83,0	83,0
100	76,9	77,3	77,1	77,6	77,3	77,3	77,2
125	74,6	75,7	75,2	76,4	75,8	75,7	75,6
160	74,7	75,5	74,6	75,5	74,7	74,8	76,4
200	75,5	76,1	74,9	75,4	74,4	74,7	78,0
250	77,0	77,1	75,7	75,5	74,7	75,0	80,0
315	76,5	77,2	75,5	75,4	74,2	74,8	80,0
400	76,6	78,1	75,9	76,2	74,2	75,4	80,7
500	79,8	82,7	79,8	81,0	77,1	79,7	85,1
630	81,8	85,5	82,6	83,3	77,2	81,7	87,4
800	83,7	88,0	85,2	85,4	81,0	83,4	89,3
1000	84,1	89,0	86,2	85,9	81,5	83,5	89,9
1250	83,4	86,7	84,7	83,6	79,8	82,2	86,7
1600	82,7	84,3	83,2	81,3	78,2	80,8	83,4
2000	80,6	80,5	80,1	77,9	75,6	78,0	78,9
2500	77,0	77,1	76,8	75,0	73,4	75,4	75,8
3150	73,7	74,1	74,0	72,5	71,3	73,0	73,0
4000	70,4	71,3	71,1	70,0	69,2	70,6	70,4
5000	67,1	68,1	67,7	67,4	66,6	67,6	67,4
6300	64,6	65,5	65,1	65,5	64,8	65,3	65,2
8000	62,1	63,1	62,6	63,8	63,2	63,1	63,0
10000	59,1	60,0	59,5	60,6	60,1	60,0	59,9
Banda Ancha	94,1	96,2	94,7	94,6	92,7	93,7	97,1

Tabla 16. Fuente inferior ($L_{W, dir, low, i, m}$) para distintos tipos de calzada a $V = 40$ Km/h (Cat 1)

Fuente superior ($L_{W,dir,high,i,m}$) para distintos tipos de calzada a $V = 40$ Km/h (Cat 1)							
Frecuencia (Hz)	TBC	CSD 2/4	EAC	PA 6/16	2PA 4/8 – 11/16	SMA 0/6	SD 4/8
25	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0
31,5	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0
40	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0
50	86,9	86,9	86,9	86,9	86,9	86,9	86,9
63	91,1	91,1	91,1	91,1	91,1	91,1	91,1
80	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9
100	82,5	82,6	82,5	82,6	82,6	82,6	82,6
125	79,2	79,3	79,2	79,4	79,3	79,3	79,3
160	79,4	79,3	78,8	78,6	78,6	78,6	80,3
200	80,1	79,9	79,2	78,6	78,5	78,5	81,9
250	82,2	81,7	80,6	79,7	79,6	79,6	84,7
315	81,5	81,5	80,1	79,1	79,0	79,1	84,3
400	80,7	81,0	79,3	78,4	78,2	78,3	83,7
500	79,6	80,9	78,8	78,5	77,2	77,6	83,5
630	79,8	82,1	79,8	79,5	77,5	78,6	84,1
800	79,4	83,0	80,5	80,3	77,2	78,8	84,4
1000	79,7	83,9	81,4	80,7	77,6	78,9	84,8
1250	80,9	83,0	81,5	80,2	78,5	79,5	83,1
1600	81,4	81,6	81,1	79,6	78,7	79,4	80,8
2000	81,3	79,6	80,0	78,9	78,5	78,9	79,1
2500	79,1	77,8	78,2	77,5	77,3	77,5	77,6
3150	76,9	76,2	76,5	76,0	75,9	76,1	76,1
4000	74,3	74,4	74,4	74,2	74,2	74,3	74,3
5000	71,4	71,5	71,4	71,4	71,3	71,4	71,4
6300	69,0	69,1	69,1	69,1	69,1	69,1	69,1
8000	66,7	66,8	66,8	66,9	66,8	66,8	66,8
10000	63,8	63,9	63,8	64,0	63,9	63,9	63,9
Banda Ancha	97,9	97,8	97,4	97,2	97,0	97,1	98,3

Tabla 17. Fuente superior ($L_{W,high,low,i,m}$) para distintos tipos de calzada a $V = 40$ Km/h (Cat 1)

Estos valores quedan definidos para tres variables; tipo de vehículo, tipo de calzada y velocidad. Los vehículos de categoría 4 solo tienen fuente superior.

5- Potencia instantánea de la fuente, $L_{W,0}$

Haciendo la suma logarítmica de ambos valores obtendremos la potencia instantánea de la fuente. La fórmula empleada es la que se muestra a continuación IV-10.

$$L_{W,0} = 10 \times \log 0,5 \times 10^{L_{W,low,i,m}} + 0,5 \times 10^{L_{W,high,i,m}} \quad IV-10$$

Donde $L_{W,low,i,m}$ y $L_{W,high,i,m}$ son los valores calculados anteriormente en las tablas 16 y 17. La tabla 18 muestra los valores de potencia instantánea de la fuente, $L_{W,0}$ para los

diferentes tipos de vía a la velocidad de 40 Km/h para el vehículo correspondiente de categoría 1.

Potencia instantánea de la fuente ($L_{w,0}$) para distintos tipos de calzada a $V = 40$ Km/h (Cat 1)							
Frecuencia (Hz)	TBC	CSD 2/4	EAC	PA 6/16	2PA 4/8 – 11/16	SMA 0/6	SD 4/8
25	84,0	84,0	84,0	84,0	84,0	84,0	84,0
31,5	84,0	84,0	84,0	84,0	84,0	84,0	84,0
40	84,0	84,0	84,0	84,0	84,0	84,0	84,0
50	84,9	84,9	84,9	85,0	84,9	84,9	84,9
63	89,1	89,1	89,1	89,1	89,1	89,1	89,1
80	86,9	86,9	86,9	86,9	86,9	86,9	86,9
100	80,6	80,7	80,6	80,8	80,7	80,7	80,7
125	77,5	77,8	77,7	78,1	77,9	77,8	77,8
160	77,6	77,8	77,2	77,3	77,0	77,1	78,7
200	78,4	78,4	77,6	77,3	76,9	77,0	80,4
250	80,3	80,0	78,8	78,1	77,8	77,9	83,0
315	79,7	79,8	78,4	77,6	77,2	77,4	82,7
400	79,1	79,8	77,9	77,5	76,6	77,1	82,4
500	79,7	81,9	79,3	79,9	77,1	78,9	84,3
630	80,9	84,1	81,4	81,8	78,5	80,4	86,1
800	82,0	86,2	83,4	83,6	79,5	81,7	87,5
1000	82,4	87,2	84,4	84,0	80,0	81,8	88,0
1250	82,3	85,3	83,4	82,2	79,2	81,0	85,3
1600	82,1	83,1	82,3	80,6	78,4	80,1	82,3
2000	81,0	80,9	80,1	78,4	77,3	78,5	79,0
2500	78,2	77,5	77,6	76,4	75,8	76,6	76,8
3150	75,6	75,3	75,4	74,6	74,2	74,8	74,8
4000	72,8	73,1	73,0	72,6	72,4	72,9	72,8
5000	69,7	70,1	70,0	69,8	69,6	69,9	69,8
6300	67,4	67,7	67,5	67,7	67,4	67,6	67,6
8000	65,0	65,3	65,2	65,6	65,4	65,3	65,3
10000	62,0	62,3	62,2	62,6	62,4	62,3	62,3
Banda Ancha	96,1	97,1	96,2	96,1	95,4	95,7	97,7

Tabla 18. Potencia instantánea de la fuente ($L_{w,0}$) para distintos tipos de calzada a $V = 40$ Km/h (Cat 1)

Estos valores quedan definidos para tres variables; tipo de vehículo, tipo de calzada y velocidad. Los vehículos de categoría 4 en este apartado no serán de aplicación, ya que la única fuente considerada es la superior.

Con $L_{w,0}$, (ecuación IV – 10) calculamos la potencia instantánea de la fuente total, que es la aportación de la potencia de las fuentes puntuales inferior y superior, ecuaciones IV – 8 y IV – 9.

6- Potencia media por unidad de longitud, $L_{W',eq,line}$

El paso siguiente es evaluar la potencia lineal de una vía en función de la intensidad del tráfico. La potencia media por unidad de longitud viene expresada en dB/m (ref. 10^{-12} w/m). En este caso además de todas las variables anteriores, habrá que tener en cuenta el periodo de medida (T, en segundos) y el número de vehículos en dicho periodo (N). La fórmula utilizada es la siguiente IV-11.

$$L_{W',eq,line} = L_{W,0} + 10 \times \log \frac{N}{T \times V} \quad IV-11$$

Donde $L_{W,0}$ es el nivel de potencia sonora instantánea de la fuente (vehículo analizado), los valores están reflejados en la tabla 18. T es el periodo de medida en segundos, N es el número de vehículos en el periodo de medida y V la velocidad media del tráfico en m/s. En nuestro análisis suponemos que el paso del vehículo es único $N = 1$, el cual circula por una línea recta infinita. El tiempo de muestreo es de $T = 20$ segundos y la velocidad de 40 Km/h, es decir 11,11 m/s. La tabla 19 muestra los valores para los diferentes tipos de vías en función de los parámetros descritos.

Potencia media por unidad de longitud ($L_{W',eq,line}$) para distintos tipos de calzada a $V = 11,11$ m/s, $N = 1$ y $T = 20$ s (Cat 1)							
Frecuencia (Hz)	TBC	CSD 2/4	EAC	PA 6/16	2PA 4/8 - 11/16	SMA 0/6	SD 4/8
25	60,5	60,5	60,5	60,5	60,5	60,5	60,5
31,5	60,5	60,5	60,5	60,5	60,5	60,5	60,5
40	60,5	60,5	60,5	60,5	60,5	60,5	60,5
50	61,5	61,5	61,5	61,5	61,5	61,5	61,5
63	65,6	65,6	65,6	65,6	65,6	65,6	65,6
80	63,4	63,5	63,4	63,5	63,5	63,5	63,5
100	57,1	57,2	57,2	57,3	57,2	57,2	57,2
125	54,0	54,4	54,2	54,7	54,4	54,4	54,3
160	54,2	54,3	53,7	53,9	53,6	53,6	55,3
200	54,9	55,0	54,1	53,8	53,4	53,6	56,9
250	56,8	56,5	55,3	54,6	54,3	54,4	59,5
315	56,2	56,4	54,9	54,2	53,8	54,0	59,2
400	55,6	56,3	54,5	54,0	53,2	53,6	59,0
500	56,3	58,4	55,9	56,5	53,7	55,4	60,9
630	57,5	60,7	57,9	58,4	55,0	56,9	62,6
800	58,6	62,7	60,0	60,1	56,0	58,2	64,1
1000	58,9	63,7	61,0	60,5	56,5	58,3	64,6
1250	58,9	61,8	59,9	58,8	55,7	57,6	61,8
1600	58,6	59,7	58,8	57,1	55,0	56,7	58,8
2000	57,5	56,6	56,6	55,0	53,8	55,0	55,6
2500	54,7	54,0	54,1	52,9	52,3	53,1	53,3
3150	52,1	51,9	52,0	51,1	50,7	51,4	51,4
4000	49,3	49,7	49,6	49,2	48,9	49,4	49,3
5000	46,3	46,6	46,5	46,4	46,1	46,4	46,4
6300	43,9	44,2	44,1	44,2	44,0	44,1	44,1
8000	41,5	41,9	41,7	42,2	41,9	41,9	41,8

10000	38,6	38,9	38,7	39,1	38,9	38,9	38,8
Banda Ancha	72,7	73,6	72,8	72,6	71,9	72,2	74,2

Tabla 19. Potencia media por unidad de longitud ($L_{W',eq,line}$) para distintos tipos de calzada a $V = 11,11$ m/s, $N = 1$ y $T = 20$ s.

El $L_{W',eq,line}$ evalúa la potencia media por unidad de longitud de la vía, en función de la intensidad del tráfico. Tal potencia media por unidad de longitud viene expresada en dB/m (ref. 10^{-12} w/m).

7- Predicción del Nivel de Presión Sonora en el receptor, L_{Aeq}

Para finalizar con el ejemplo práctico obtenemos el L_{Aeq} pronosticado por el método CNOSSOS mediante la ecuación IV – 12 para los diferentes tipos de calzadas, a una velocidad de 11,11 m/s, con un tiempo de medida de 20s y a una distancia de 5m del punto de medida al vehículo. De este modo calculamos el Nivel de Presión Sonora predicho en el receptor. Por último comparamos los resultados con los valores medidos con el sonómetro, para poder obtener conclusiones.

$$NPS = L_{W',eq,line} - 3 - 10 \cdot \log h \quad IV-12$$

Donde $L_{W',eq,line}$ es el nivel de potencia sonora medida por unidad de longitud calculado en el apartado anterior, h es la distancia de la línea de tráfico al receptor, en nuestro caso h es igual a 5 m. La reducción de 3 dB es debida a la consideración de suelo reflectante. La reducción por distancia es debida a la atenuación por divergencia para fuentes lineales.

Las tablas 21 muestra el Nivel de Presión Sonora en el receptor con ponderación A. En ella se ha aplicado la tabla de ponderación A (tabla 20) para cada una de las bandas de frecuencia y tipo de vía.

Frecuencia (Hz)	Ponderación A	Frecuencia (Hz)	Ponderación A	Frecuencia (Hz)	Ponderación A
25	-44,7	200	-10,9	1600	1
31,5	-39,4	250	-8,6	2000	1,2
40	-34,6	315	-6,6	2500	1,3
50	-30,2	400	-4,8	3150	1,2
63	-26,2	500	-3,2	4000	1
80	-22,5	630	-1,9	5000	0,5
100	-19,1	800	-0,8	6300	-0,1
125	-16,1	1000	0	8000	-1,1
160	-13,4	1250	0,6	10000	-2,5

Tabla 20. Ponderación A para cada banda de tercio de octava

Potencia media por unidad de longitud ($L_{A, eq}$) para distintos tipos de calzada a $V = 11,11$ m/s, $N = 1$, $T = 20$ s y $h = 5$ m (Cat 1)							
Frecuencia (Hz)	TBC	CSD 2/4	EAC	PA 6/16	2PA 4/8 – 11/16	SMA 0/6	SD 4/8
25	5,8	5,9	5,8	5,9	5,9	5,9	5,8
31,5	11,1	11,2	11,1	11,2	11,2	11,2	11,1
40	15,9	16,0	15,9	16,0	16,0	16,0	15,9
50	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3
63	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4
80	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0
100	28,0	28,1	28,1	28,2	28,1	28,1	28,1
125	27,9	28,3	28,1	28,6	28,3	28,3	28,2
160	30,8	30,9	30,3	30,5	30,2	30,2	31,9
200	34,0	34,1	33,2	32,9	32,5	32,7	36,0
250	38,2	37,9	36,7	36,0	35,7	35,8	40,9
315	39,6	39,8	38,3	37,6	37,2	37,4	42,7
400	40,9	41,5	39,7	39,2	38,4	38,8	44,2
500	43,1	45,2	42,7	43,3	40,5	42,2	47,7
630	45,6	48,8	46,0	46,5	43,1	45,0	50,7
800	47,8	51,9	49,2	49,3	45,3	47,4	53,3
1000	49,0	53,7	51,0	50,5	46,5	48,4	54,6
1250	49,5	52,4	50,5	49,4	46,3	48,2	52,4
1600	49,6	50,7	49,8	48,1	46,0	47,7	49,8
2000	48,7	47,8	47,8	46,2	45,0	46,2	46,8
2500	46,0	45,3	45,4	44,2	43,6	44,4	44,6
3150	43,3	43,1	43,2	42,3	41,9	42,6	42,6
4000	40,3	40,7	40,6	40,2	39,9	40,4	40,3
5000	36,8	37,1	37,0	36,9	36,6	36,9	36,9
6300	33,8	34,1	34,0	34,1	33,9	34,1	34,0
8000	30,4	30,8	30,6	31,1	30,8	30,8	30,8
10000	26,1	26,4	26,2	26,6	26,4	26,4	26,4
Banda Ancha	57,5	59,8	58,1	57,4	54,8	56,3	60,5

Tabla 21. Potencia media por unidad de longitud ($L_{A, eq}$) para distintos tipos de calzada a $V = 11,11$ m/s, $N = 1$, $T = 20$ s y $h = 5$ m.

Para concluir con este caso práctico, comparamos las medidas realizadas con el sonómetro, apartado 4.3.1 y los valores calculados anteriormente. El $L_{A, eq, T}$ medido es de 60,5 dBA y se comparan con la banda ancha de cada una de las distintas vías de la tabla 21. La tabla 22 muestra el error entre lo medido y lo calculado.

Comparación $L_{A,eq}$ teórico y medido para un vehículo a $V = 40$ Km/h, $T = 20$ y $h = 5$ de categoría 1 para los distintos tipos de calzada		
Tipo de calzada	$L_{A,eq, Teórico}$	Diferencia
TBC	57,5	3,0
CSD 2/4	59,8	0,7
EAC	58,1	2,4
PA 6/16	57,4	3,1
2PA 4/8 – 11/16	54,8	5,7
SMA 0/6	56,3	4,2
SD 4/8	60,5	0,0

Tabla 22. Comparación $L_{A,eq}$ teórico y medido para un vehículo a $V = 40$ Km/h, $T = 20$ y $h = 5$ de categoría 1 para los distintos tipos de calzada

En este ejemplo el pavimento que menos diferencia muestra (0,0 dB) con los datos medidos es el SD 4/8. Este es un asfalto líquido de curado lento, con consistencia blanda. El siguiente asfalto que menos desviación muestra sobre la medida real es el CSD 2/4, el cual tiene un error de 0,7 dB. El pavimento que más se aleja de la medida es el tipo 2PA 4/8 – 11/16 que difiere 5,7 dB.

5. Resultados y Análisis

En esta sección se realiza una exposición y análisis de los resultados medidos frente a los predichos por CNOSSOS. Para el análisis de los datos se ha empleado el valor de la potencia medida por unidad de longitud, normalizado a una hora $L_{W', eq, line, (1h)}$. De este modo las medidas son independientes del tiempo y la distancia de medida, para su posterior estudio. Para las diferentes medidas se ha calculado los valores promedio y sus desviaciones estándar.

5.1 $L_{W', eq, line (1h)}$ por categoría y velocidad

5.1.1 Categoría 1

La figura 31 representa $L_{W', eq, line (1h)}$ a distintas velocidades en función del tipo de vía para vehículos de categoría 1 (coches de pasajeros, furgonetas y caravanas con pesos inferiores a 3500 kg). Esta gráfica se construye realizando la media y la desviación estándar de todas las medidas registradas durante las aforaciones y que han sido válidas para el análisis de este proyecto. Se ha trazado la línea de tendencia con una regresión del tipo lineal y se ha representado en la figura, tanto la ecuación de la recta de regresión como el valor de R^2 . El resto de valores corresponden a las predicciones de CNOSSOS en $L_{W', eq, line (1h)}$ para las distintas velocidades en función del tipo de vía.

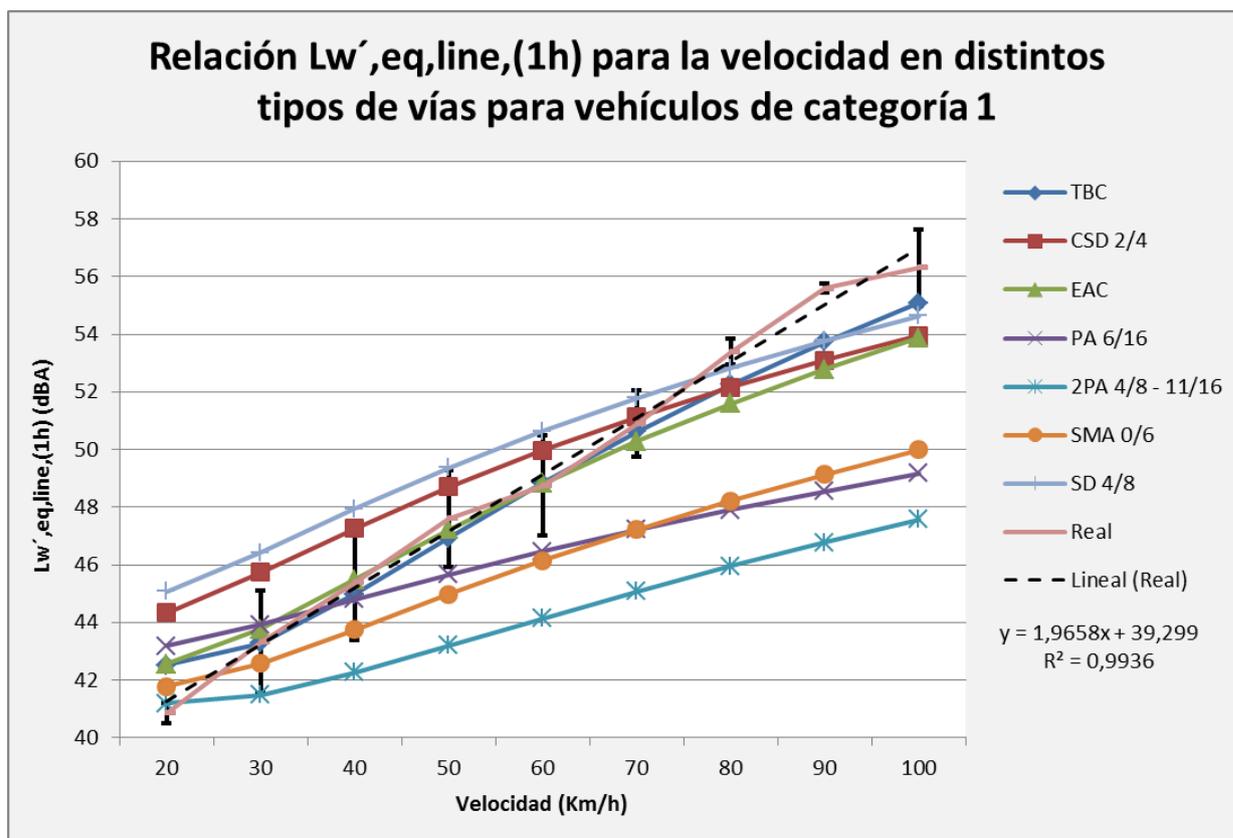


Figura 31. $L_{W', eq, line, 1h}$ medido y predicho para distintas velocidades de vehículos de categoría 1.

En la figura 31 podemos apreciar como la serie que contiene los valores medidos (*Real*) tiene un crecimiento lineal conforme aumentamos la velocidad. La línea de tendencia también muestra un crecimiento lineal con la velocidad y se ajusta notablemente a las medidas aforadas. Las barras de error son mayores en las velocidades entre 30 y 60 km/h ya que es donde más vehículos se aforaron y por lo tanto la dispersión es mayor. Por el contrario en las velocidades de 20, 80, y 90 son menores debido a que se obtuvieron menos medidas dado que la mayoría de las aforaciones se han realizado en los núcleos urbanos de la Comarca de Pamplona.

Para poder concluir a qué tipo de vía se asemejan más las medidas tomadas se han analizado por separado los distintos tipos de vía. Por un lado la serie con las medidas aforadas (*Real*) y por otro el valor predicho por CNOSSOS para esa vía. Para ratificar estos resultados utilizamos mínimos cuadrados por aproximación.

Por medido de los mínimos cuadrados podemos decir que la vía que más se aproxima a los datos medidos es la vía de tipo TBC 1.0 dBA y la que menos se parece a los datos medidos es la vía 2PA 4/8 – 11/16 5.8 dBA. A continuación se muestran las gráficas de las distintos tipos de vías.

- TBC

La predicción de CNOSSOS para el tipo de vía TBC es la que más se aproxima a los datos medidos (*Real*). En la figura 32 podemos observar cómo sus series son muy similares para las distintas velocidades. Cabe destacar que altas velocidades y pequeñas velocidades difiere un poco de la predicción de CNOSSOS. Al calcular la varianza (por mínimos cuadrados) sobre este tipo de asfalto obtenemos un valor de 1.0 dBA siendo el más pequeño de ellos y por lo tanto podemos asegurar que el tipo de asfalto TBC es el que mejor se ajusta a las aforaciones realizadas en la Cuenca de Pamplona.

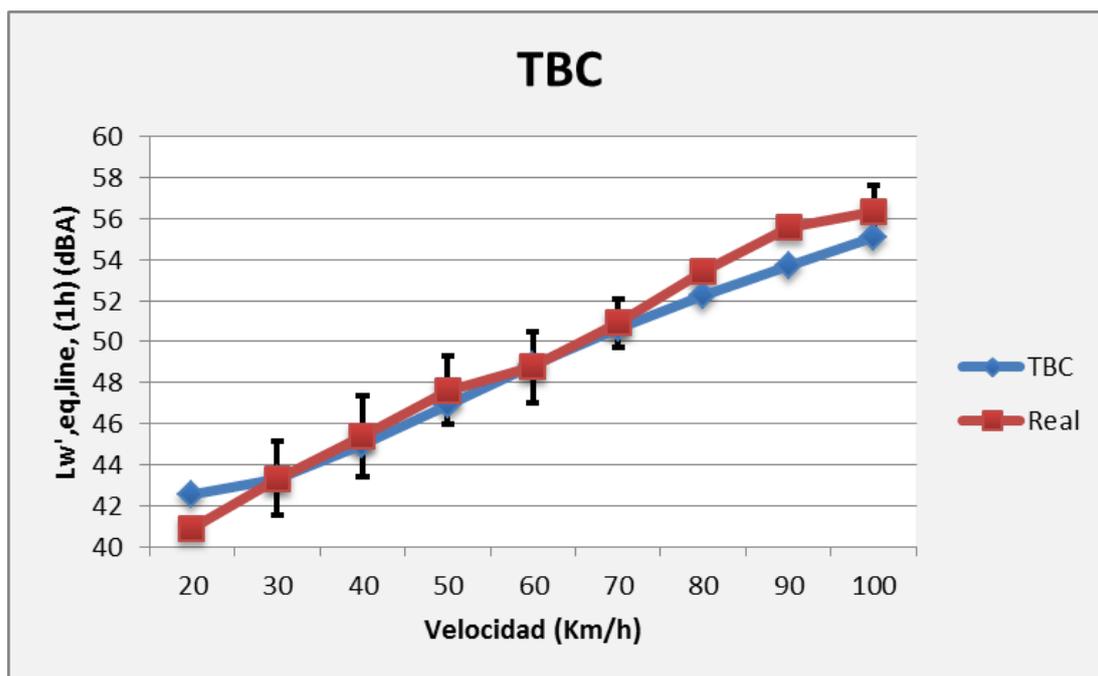


Figura 32. $Lw', eq, line, 1h$ medido y predicho para el tipo de vía TBC a distintas velocidades para vehículos de categoría 1

- EAC

Las vías de tipo EAC se ajustan muy bien a las medidas realizadas en este proyecto. Es en las altas velocidades, a partir de 70 Km/h donde podemos apreciar la divergencia de la serie medida (*Real*) respecto a la predicha por CNOSSOS. En bajas velocidades (20 Km/h) también observamos desviaciones respecto al modelo de predicción para este tipo de asfalto. En este tipo de vía obtenemos un valor de 1.5 dBA para los mínimos cuadrados.

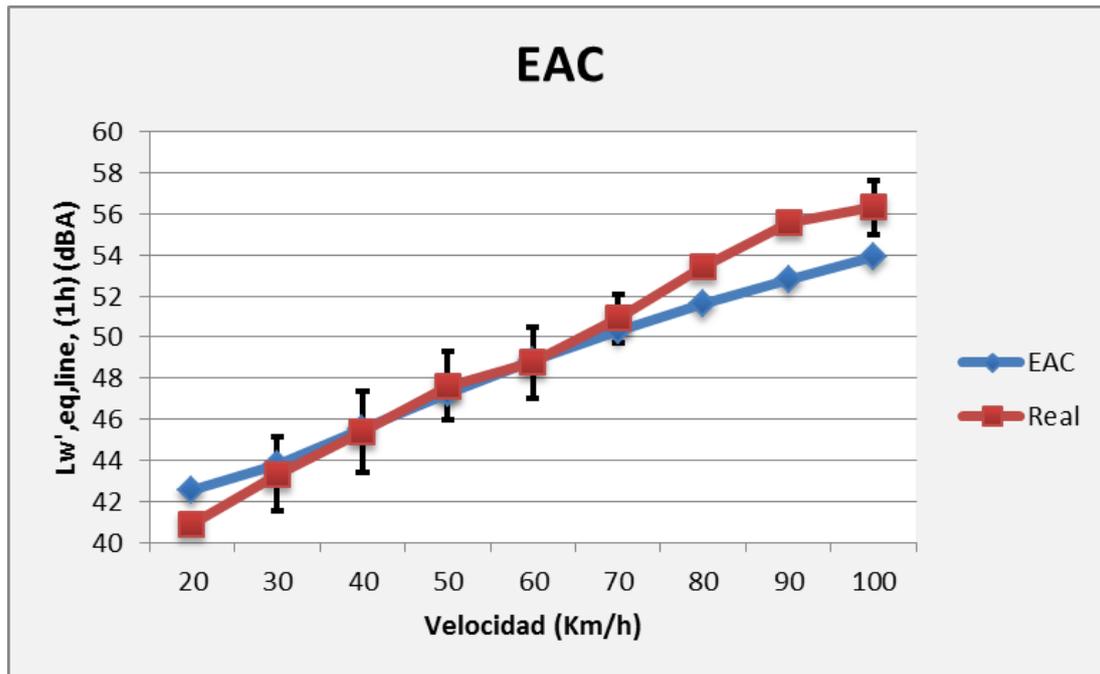


Figura 33. $L_{w', eq, line, 1h}$ medido y predicho para el tipo de vía EAC a distintas velocidades para vehículos de categoría 1

- CSD 2/4

El cálculo predicho por CNOSSOS para vías de tipo CSD 2/4 presenta una mayor desviación a bajas y altas velocidades respecto de las medidas realizadas. Para la velocidad de 20 Km/h la diferencia entre la serie medida y la predicha difiere en 3.5 dBA convergiendo hasta los 70 Km/h donde comienzan a divergir las serie real respecto a la predicha. En cuanto a los mínimos cuadrados comentar que el valor es de 2.0 dBA.

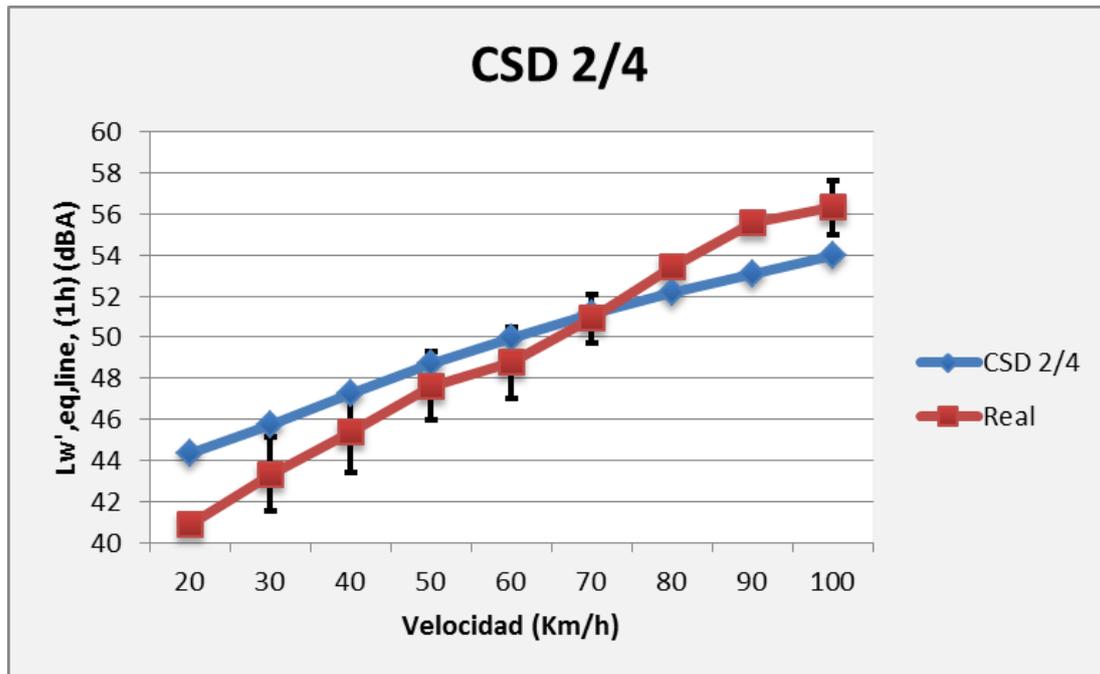


Figura 34. $L_{w', eq, line, 1h}$ medido y predicho para el tipo de vía CSD 2/4 a distintas velocidades para vehículos de categoría 1

- SD 4/8

La predicción de CNOSSOS para el tipo de vías SD 4/8 se asemeja a la serie del tipo de vía anterior (CSD 2/4) solo que con una mayor desviación. En la velocidad de 20 Km/h la diferencia es de 4.2 dBA y en las velocidades altas es algo menor. La forma de la serie SD 4/8 es también parecida a la anterior, convergiendo en los 70 Km/h y divergiendo a partir de esta velocidad. En el conjunto de la serie la desviación es mayor siendo el valor de su mínimo cuadrado de 2.3 dBA.

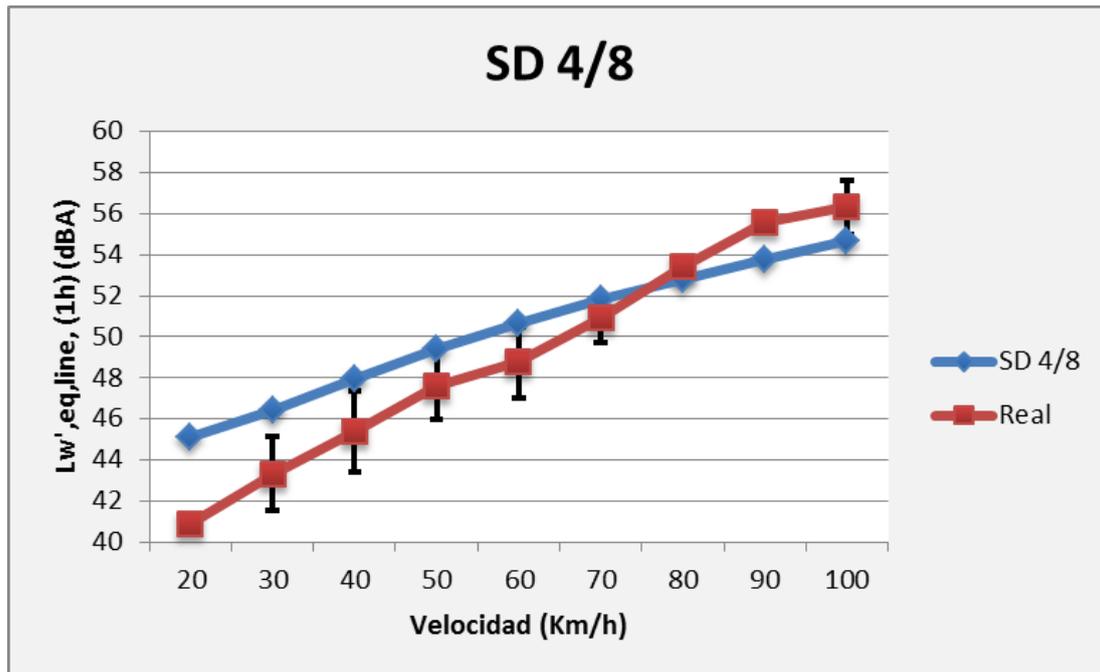


Figura 35. L_w' , eq , $line$, $1h$ medido y predicho para el tipo de vía SD 4/8 a distintas velocidades para vehículos de categoría 1

- SMA 0/6

Los tipos de calzada SMA 0/6 se ajustan bien a bajas velocidades entre los 20 y los 30 Km/h. A partir de los 30 km/h las dos series medida (*Real*) y predicha (*SMA 0/6*) divergen la una de la otra hasta alcanza su máximo en los 100 Km/h con una diferencia de 6.3 dBA. En este caso la serie real tiene valores mayores que la serie predicha. El valor del mínimo cuadrado para esta serie es de 3.9 dBA

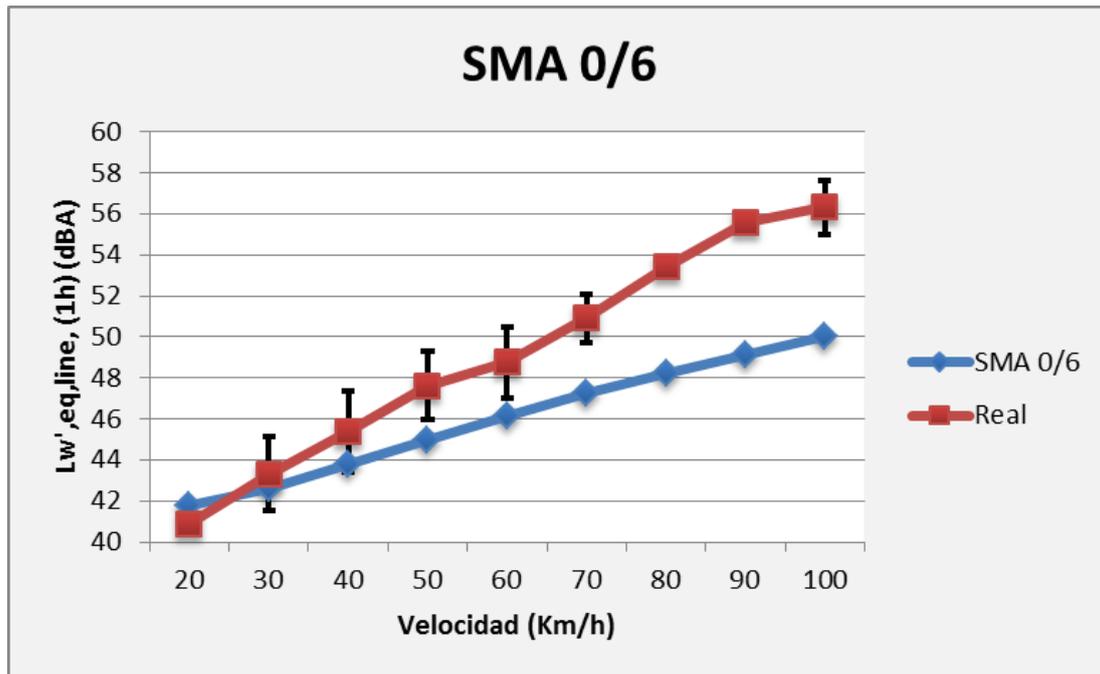


Figura 36. $L_w', eq, line, 1h$ medido y predicho para el tipo de vía SMA 0/6 a distintas velocidades para vehículos de categoría 1

- PA 6/16

Como en el caso anterior las calzadas compuestas para este tipo de vía se aproxima más a las medidas realizadas en bajas velocidades 30 – 40 Km/h. A partir de los 40 Km/h las dos series vuelven a divergir alcanzado su máximo en los 100 Km/h con una diferencia de 7.1 dBA. La serie PA 6/16 queda por debajo de la serie que contiene las medidas reales. El valor del mínimo cuadrado para esta serie es de 4.2 dBA

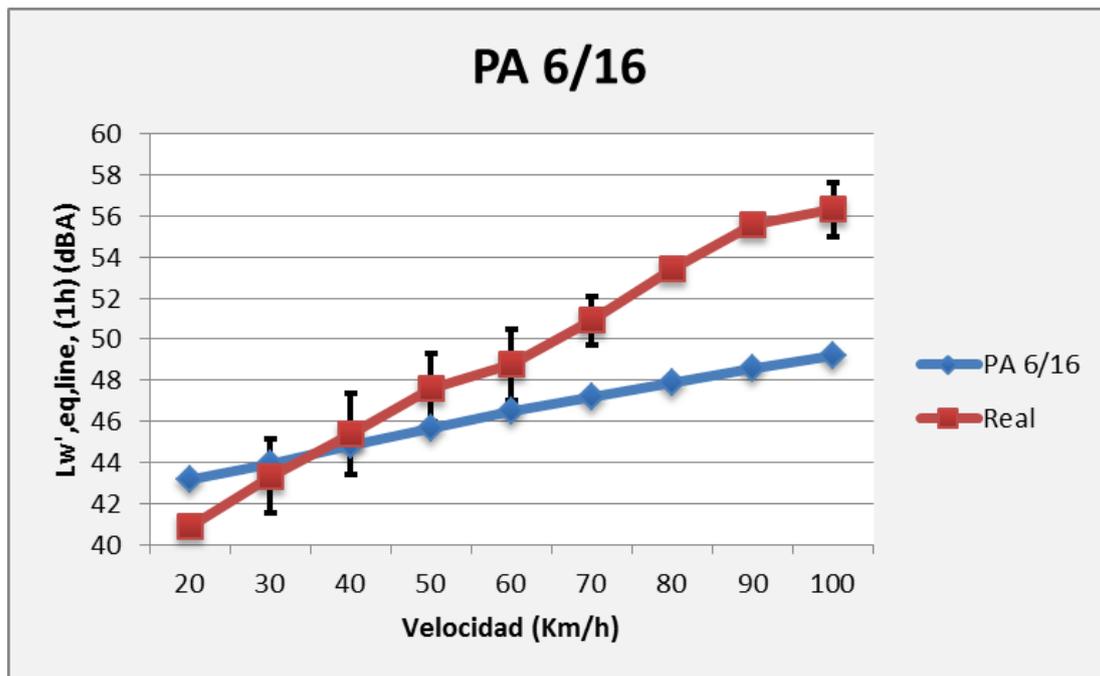


Figura 37. $L_w', eq, line, 1h$ medido y predicho para el tipo de vía PA 6/16 a distintas velocidades para vehículos de categoría 1

- 2PA 4/8 – 11/16

La vía tipo 2PA 4/8 – 11/16 es la que menos se asemeja a la serie (*Real*) que contiene los valores medidos en las distintas aforaciones. Este tipo de vía se aproxima a las medidas en la velocidad de 20 Km/h y a partir de esta velocidad comienza a divergir una serie respecto a la otra, siendo la serie inferior la predicha por CNOSSOS. El valor por mínimos cuadrado para esta el tipo de vía 2PA 4/8 – 11/16 es de 5.8 dBA.

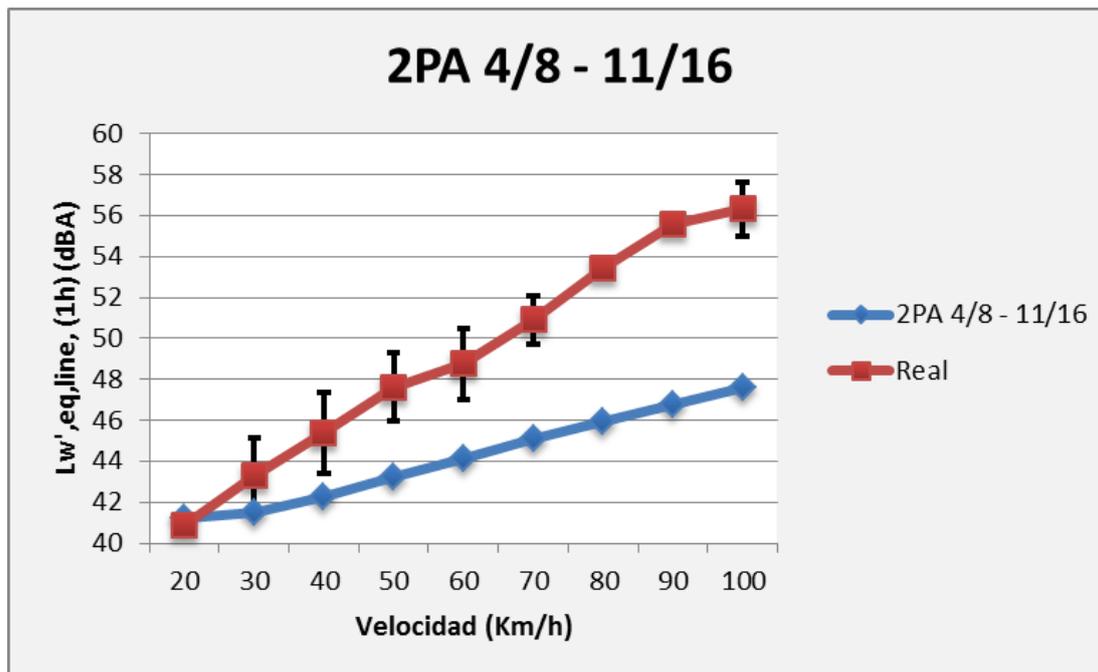


Figura 38. $L_{w', eq, line, 1h}$ medido y predicho para el tipo de vía 2PA 4/8 – 11/16 a distintas velocidades para vehículos de categoría 1

El mismo método ha sido empleado para representar los valores de las categorías 3 y 4. Debido a que los vehículos pesados y motocicletas no son tan comunes como los vehículos ligeros, no se han registrado tantos datos. A continuación se muestran las gráficas referentes a la categoría 3, 4a y 4b. No se muestra la gráfica de la categoría 2 por no disponer de datos.

5.1.2 Categoría 3

La figura 39 representa $L_{w', eq, line, 1h}$ a distintas velocidades en función del tipo de vía para vehículos de categoría 3 (caravanas, camiones, autobuses, etc, con tres ejes como mínimo). Esta gráfica se construye realizando la media y la desviación estándar de todas las medidas (*Real*) registradas durante las aforaciones y que han sido válidas para el análisis de este proyecto. Se ha trazado la línea de tendencia con una regresión del tipo lineal y se ha representado en la figura, así como la ecuación de la recta y el valor de R^2 . El resto de valores corresponden a las predicciones de CNOSSOS en $L_{w', eq, line, 1h}$ para las distintas velocidades en función del tipo de vía.

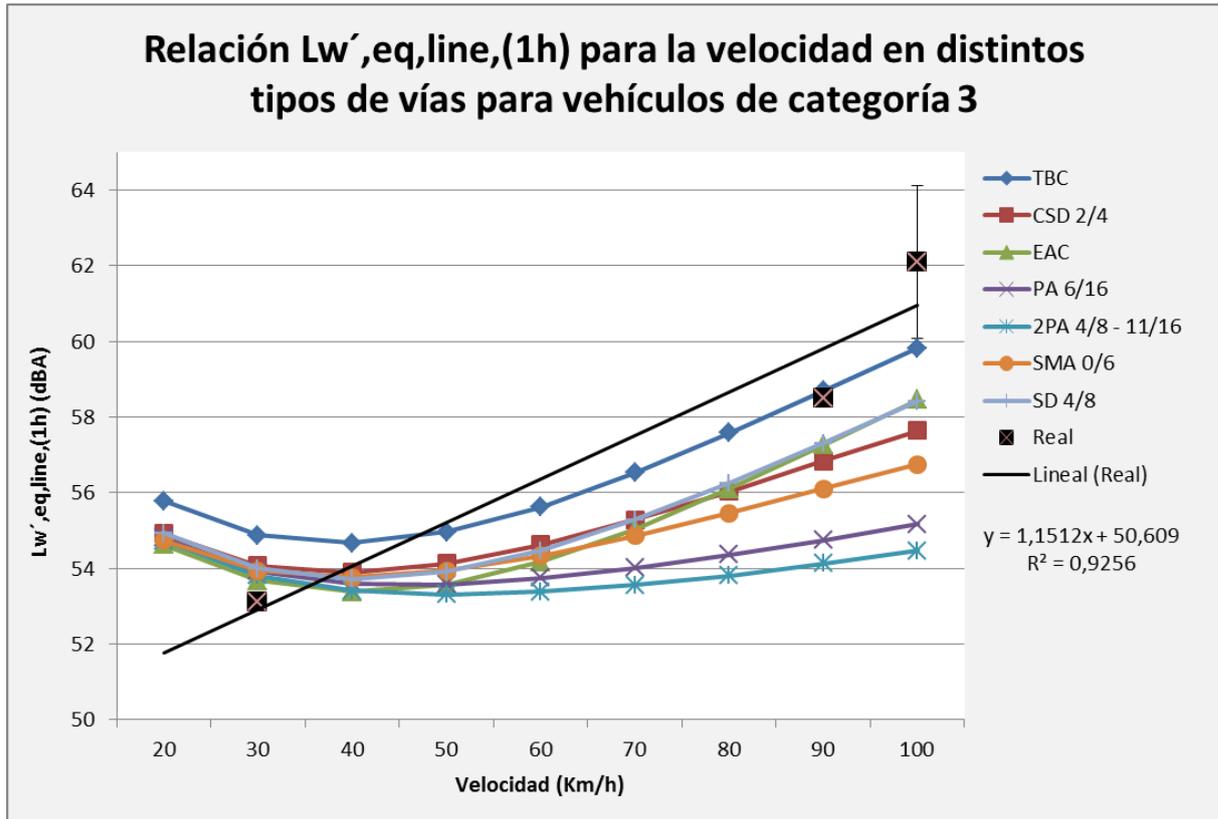


Figura 39. $L_{w',eq,line,1h}$ medido y predicho para distintas velocidades de vehículos de categoría 1.

En la figura 39 analizaremos la línea de tendencia que se traza con la media de los tres puntos medidos en los pasos de vehículos pesados (*Real*). Esta tiene un pendiente lineal conforme aumenta la velocidad. La línea de tendencia está por debajo de los valores que muestran las series para las diferentes tipos de vías a velocidades bajas, entre 20 y 30 Km/h. A partir de los 50 Km/h crece por encima de estas. En la velocidad de 90 Km/h la media de las, medidas coincide con la serie que representa el tipo de calzada TBC. Para la velocidad de 100 Km/h está por encima de los valores de las distintas vías, pero los valores de su desviación están muy próximos al tipo de calzada TBC. Hacemos notar que podrían lograrse mejores ajustes con funciones polinómicas de grado elevado, pero no se ha considerado necesario.

5.1.3 Categoría 4a y 4b

- 4a

La categoría 4a corresponde a ciclomotores, triciclos o quads con cilindradas inferiores a 50 cc. En esta categoría solo se tiene una medida la cual se encuentra a 0.9 dBA por encima del valor predicho por CNOSSOS. Al tener una sola medida no podemos calcular la línea de tendencia ni su desviación típica.

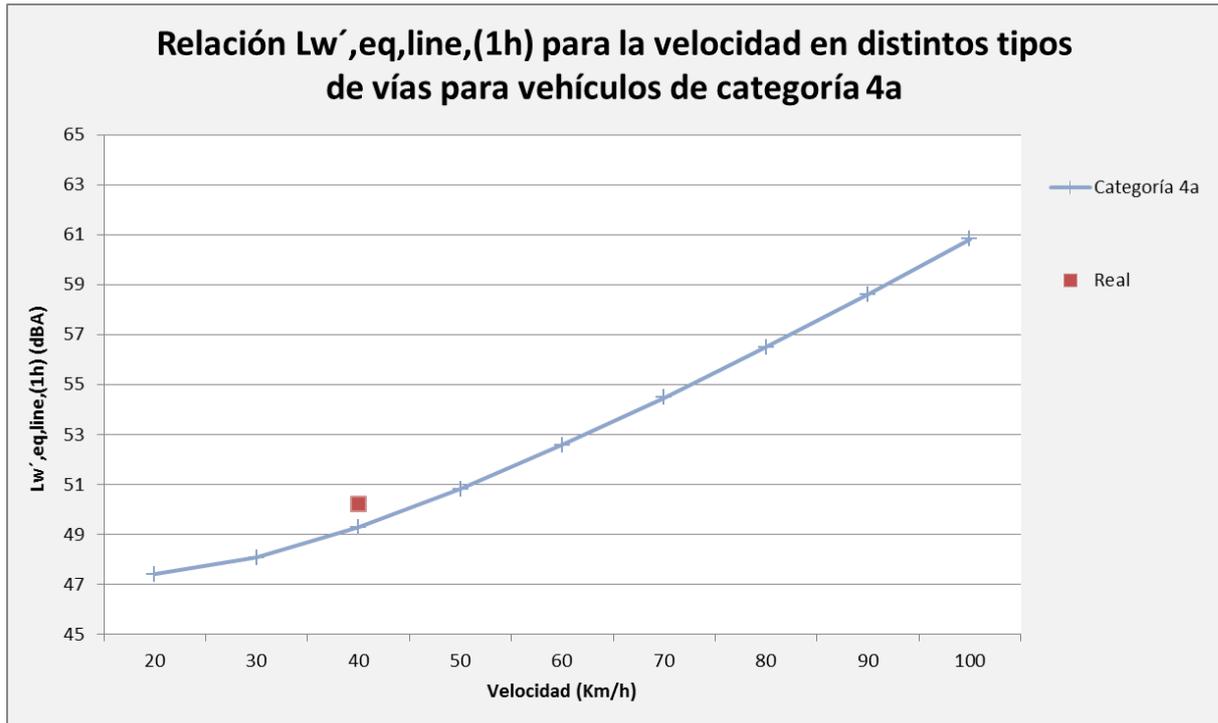


Figura 40. Lw' , eq, line, 1h medido y predicho para distintas velocidades de vehículos de categoría 4a.

- 4b

La categoría 4b corresponde a motocicletas, triciclos o quads con cilindradas superiores a 50 cc. En esta categoría se tienen valores para las velocidades de 30 y 60 Km/h. La medida registrada para la velocidad de 30 Km/h está a 2.5 dBA por debajo del valor predicho por CNOSSOS y la correspondiente a la velocidad de 60 Km/h difiere en 0.1 dBA. La línea de tendencia tiene un crecimiento lineal, en las bajas velocidades se aleja más del modelo convergiendo en la velocidad de 60 Km/h y a partir de esta velocidad diverge conforme aumenta la velocidad pero con una menor diferencia que en las bajas velocidades.

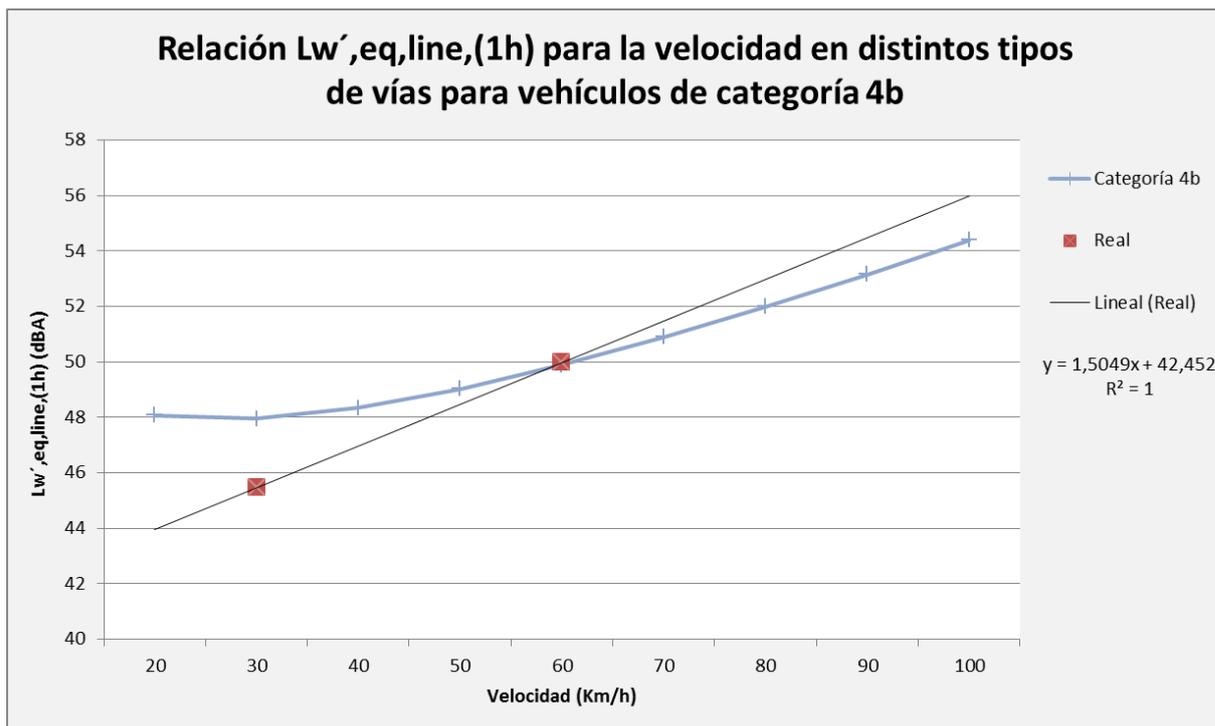


Figura 41. $L_{w',eq,line,1h}$ medido y predicho para distintas velocidades de vehículos de categoría 4b.

5.2 $L_{w',eq,line}(1h)$ vs tiempo de medida

Para la realización del proyecto se han medido numerosas vías de la Cuenca de Pamplona. Para analizar los pasos de vehículos de las mismas se planteó cual era el tiempo de paso correcto para obtener la mayor parte de la energía del paso del vehículo. Para ello se ha hecho una comparativa de diferentes pasos de vehículos a distintas velocidades. En ellas se calcula el $L_{w',eq,line}(1h)$ para un segundo de paso de medida, coincidiendo con el nivel máximo de potencia. A partir de ahí se aumenta el tiempo de paso de forma simétrica a ambos lados del punto máximo hasta llegar al ruido de fondo.

Los valores obtenidos del $L_{w',eq,line}(1h)$ para los diferentes tiempos de paso se muestran en la figura 42.

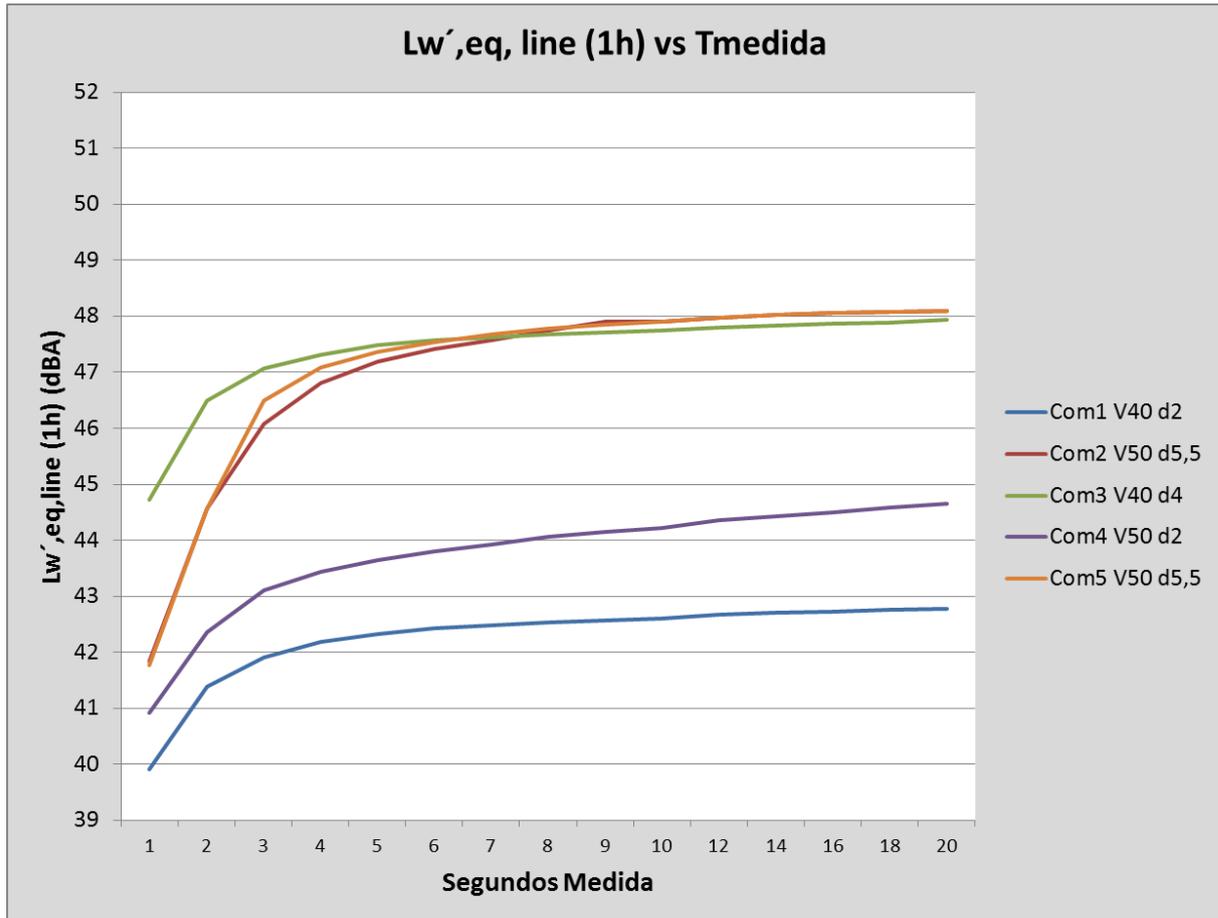


Figura 42. Representación de $Lw',eq,line, (1h)$ frente al tiempo de medida

En la figura 42 podemos observar cómo las series se asemejan mucho a funciones logarítmicas donde de 1 a 6 segundos presentan incrementos importantes y a partir de los 8 segundos se estabiliza la energía producida por el paso del vehículo. Por ello podemos concluir que para calcular el NPS en el receptor serie suficiente coger 10 segundos de medida, obteniendo la mayor parte de la energía del paso del vehículo y sin tomar ruido de fondo.

6. Aplicación informática para el cálculo de CNOSSOS

Para este proyecto se ha realizado una aplicación informática para el cálculo del nivel de presión sonora (NPS) predicho en el receptor $L_{A,eq}$ para las diferentes categorías y velocidades comprendidas entre los 20 y los 100 Km/h en los diferentes tipos de vías contempladas en CNOSSOS en las unidades de dB y dBA. La aplicación está desarrollada en Visual Basic para aplicaciones y está compuesto por un formulario de entrada de datos para su posterior cálculo, un botón que define a las distintas categorías y un botón que calcula el nivel de presión sonora predicho por CNOSSOS en función de los parámetros seleccionados por el usuario.

Los parámetros de entrada se pueden ver en la figura 43. Estos son el número de vehículos que circulan por la calzada, el tiempo de paso se refiere al periodo de registro de la medida para el paso de los vehículos, en segundos. La distancia en metros del receptor donde se va a calcular el NPS, en metros y velocidad a la que circulan los vehículos por la vía, en Km/h. También la categoría en la cual están clasificados los vehículos según CNOSSOS, categorías 1, 2, 3, 4a y 4b. Por último podemos decidir si queremos los resultados del NPS en el receptor para los diferentes tipos de vías en dB o dBA (Ponderación A).

Figura 43. Formulario de entrada de datos para el cálculo del nivel de presión sonora L_{Aeq} predicho en el receptor por CNOSSOS.

Al pinchar sobre el botón  obtenemos una descripción de las distintas categorías contempladas en CNOSSOS (figura 44) para los diferentes tipos de vehículos.

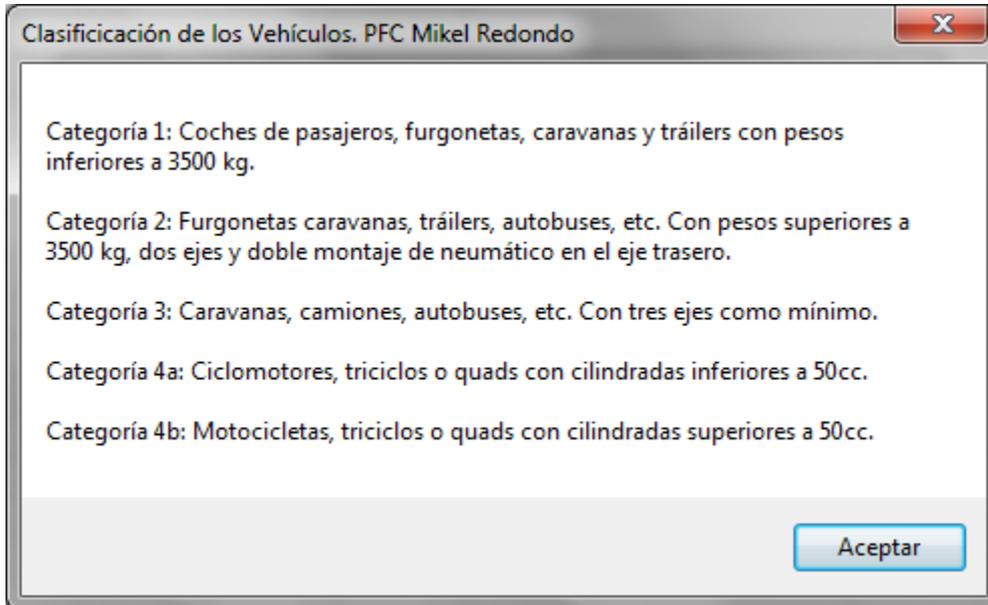


Figura 44. Panel que describe las distintas categorías contenidas en CNOSSOS

A continuación se muestra un ejemplo (figura 45) de cálculo de NPS para un vehículo de categoría 1 a velocidad 50 Km/h con ponderación A cuando el receptor se encuentra a 6 metros de la fuente de sonido y con un tiempo de paso de 30s. Se incluye un ejemplo de un vehículo de la categoría 4b con los mismos parámetros (figura 46).

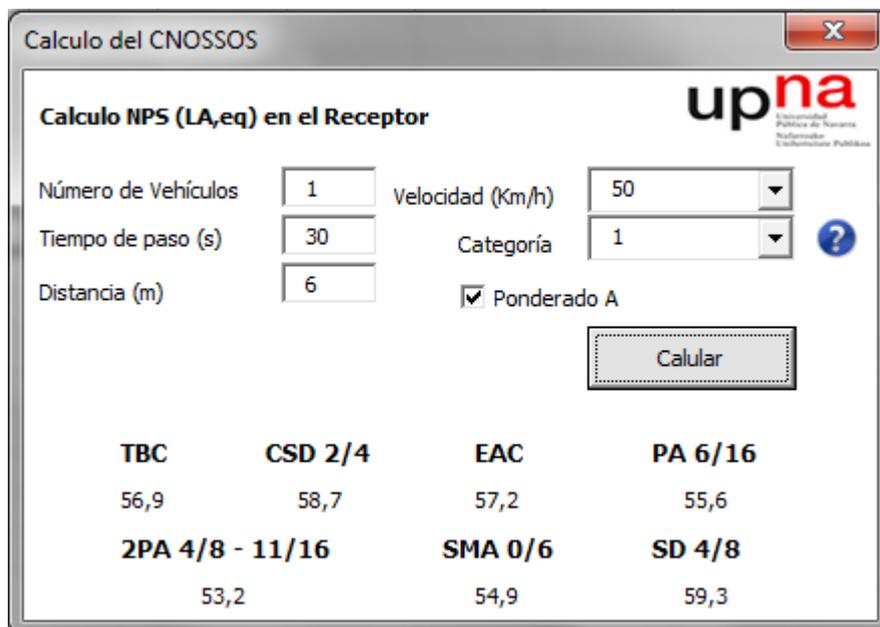


Figura 45. NPS para los diferentes tipos de vía de un vehículo que circula a 50 Km/h, tiempo de paso 30s a una distancia de 6m de categoría 1 y con ponderación A

Calculo del CNOSSOS

Calculo NPS (LA,eq) en el Receptor

Número de Vehículos: 1 Velocidad (Km/h): 50

Tiempo de paso (s): 30 Categoría: 4b

Distancia (m): 6 Ponderado A

Calcular

Moto
59,0

Figura 46. NPS para los diferentes tipos de vía de un vehículo que circula a 50 Km/h, tiempo de paso 30s a una distancia de 6m de categoría 4b y con ponderación A

Con esta herramienta se pretende obtener de un modo rápido el NPS en el receptor que predice CNOSSOS, para los distintos tipos de vehículos y vías, facilitando una primera aproximación a estudios de ruido en vías de circulación.

7. Conclusiones

El fin con el que se ha desarrollado este proyecto es el estudio del nuevo modelo armonizado europeo de predicción del ruido ambiental CNOSSOS (Common Noise aSSessment methOdS, CNOSSOS-EU). A partir de los resultados de múltiples medidas acústicas para caracterizar la potencia acústica de las fuentes del tráfico rodado y su ajuste con las predicciones, de CNOSSOS se ha comprobado una satisfactoria correlación, especialmente en los vehículos de categoría 1.

Las conclusiones que se obtienen con los valores registrados para el cálculo de CNOSSOS en el paso de un vehículo, muestran que es suficiente con registrar 10 segundos de medida. De esta forma tenemos en cuenta la mayor parte de la energía del paso del vehículo y la influencia del ruido de fondo es mínima.

Los resultados obtenidos respecto a los valores teóricos representados por el modelo CNOSSOS son muy equiparables a los registrados en las vías de la Cuenca de Pamplona. Esta comparación podemos afirmarla para los vehículos de categoría 1 que ha sido donde mayor número de pasos se han registrado. La serie real y las predichas poseen una correlación alta. Para el resto de categorías la relación es buena pero al no disponer de tantos datos no lo podemos afirmar con la misma certeza que los vehículos de categoría 1.

En cuanto a la velocidad cabe destacar cómo a bajas y altas velocidades la dispersión entre los valores medidos y predichos es mayor, que a velocidades medias de 30 - 70 Km/h. Comentar que en las velocidades bajas y altas el número de medidas es menor debido a que la mayorías de medidas se han realizado en zonas urbanas con vías de 50 Km/h. En general, para las distintas velocidades, el modelo se ajusta muy bien.

En el proyecto también se analizado las predicciones para los distintos tipos de vías según el modelo de predicción CNOSSOS. Cabe destacar que la vía que mejor se ajusta en este modelo a las medidas realizadas en la Cuenca de Pamplona es la del tipo TBC y por el contrario la 2PA 4/8 – 11/16 la que peor se ajusta. Para poder afirmar esta conclusión nos basamos en la relación obtenida por el ajuste de los mínimos cuadrados, que es de 1 dBA en el caso de la vía TBC y de 5,8 dBA para la vía 2PA 4/8 – 11/16. El ajuste, en el resto de calzadas analizadas, es peor. Basándonos en el ajuste por mínimos cuadrados, el ajuste para el resto de vías es de la siguiente manera. De mayor a menor ajuste de la vía a las medidas registradas en la cuenca: EAC (1.5 dBA), CSD 2/4 (2 dBA), SD 4/8 (2.3 dBA), SMA 0/6 (3.9 dBA), PA 6/16 (4.2 dBA).

Por todo esto podemos concluir afirmando que el modelo de predicción CNOSSOS obtiene unos valores de nivel de presión sonora en el receptor para los diferentes tipos de vehículos (categoría) en función de la velocidad y la distancia de la fuente de sonidos muy similares a los que hemos medido en las carreteras de la Cuenca de Pamplona. En especial para el tipo de vía TBC.

Finalmente, se ha desarrollado una sencilla herramienta para calcular los niveles de presión sonora a cualquier distancia de la vía de tráfico en función de la categoría de los vehículos, su velocidad y el tiempo de medida.

Anexo

Tablas de coeficientes de emisión de potencia acústica vehículos de carretera

Las siguientes tablas indican los coeficientes necesarios para el cálculo de:

- El rolling noise definido en la ecuación (II-10) (coeficientes $A_{R,i,m}$ y $B_{R,i,m}$)

$$L_{WR,i,m} = A_{R,i,m} + B_{R,i,m} \times \log \frac{v_m}{v_{ref}} + \Delta L_{WR,i,m} \quad (II-10)$$

- La corrección de los neumáticos de clavos tal como se define en la Ecuación (II-12) (coeficientes a_i y b_i)

$$\Delta_{stud,i,m=1} \quad v_{m=1} = \begin{cases} a_i + b_i \times \log v_{m=1} - 70 & \text{para } 50 \leq v_{m=1} \leq 90 \text{ km/h} \\ a_i + b_i \times \log 90 - 70 & \text{para } v_{m=1} > 90 \text{ km/h} \\ a_i + b_i \times \log 50 - 70 & \text{para } v_{m=1} < 50 \text{ km/h} \end{cases} \quad (II-12)$$

- El propulsión noise definido en la ecuación (II-15) (coeficientes $A_{P,i,m}$ y $B_{P,i,m}$)

$$L_{WP,i,m} = A_{P,i,m} + B_{P,i,m} \times \frac{v_m - v_{ref}}{v_{ref}} + \Delta L_{WP,i,m} \quad (II-16)$$

- Corrección del rolling y propulsión noise debido a la aceleración, definida en las ecuaciones (II-17) y (II-18) (coeficientes $C_{R,m,k}$ y $C_{P,m,k}$)

$$\Delta L_{WR,acc,i,m} = C_{R,m,k} \times \text{Max} \left(1 - \frac{x}{100}; 0 \right) \quad (II-22)$$

$$\Delta L_{WP,acc,i,m} = C_{P,m,k} \times \text{Max} \left(1 - \frac{x}{100}; 0 \right) \quad (II-23)$$

Tabla II.A.1 Coeficientes para la **categoría m = 1** vehículos (turismos)

Frecuencia Central banda de octava (Hz)	A_R	B_R	A_P	B_P	a	b
63	79,7	30,0	94,5	-1,3	0	0
125	85,7	41,5	89,2	7,2	0	0
250	84,5	38,9	88,0	7,7	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	-1,4
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

Tabla II.A.2 Coeficientes para la **categoría m = 2**
vehículos (camiones medianos)

Frecuencia Central banda de octava (Hz)	A_R	B_R	A_P	B_P
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

Tabla II.A.3 Coeficientes para la **categoría m = 3**
vehículos (camiones pesados)

Frecuencia Central banda de octava (Hz)	A_R	B_R	A_P	B_P
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

Tabla II.A.4 Coeficientes para la **categoría m = 4a**
 vehículos (dos ruedas ≤ 50 cc)

Frecuencia Central banda de octava (Hz)	A_R	B_R	A_P	B_P
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

Tabla II.A.5 Coeficientes para la **categoría m = 4b**
 vehículos (dos ruedas > 50 cc)

Frecuencia Central banda de octava (Hz)	A_R	B_R	A_P	B_P
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

Tabla II.A.5 Coeficientes para la **categoría m = 4b**
 vehículos (dos ruedas > 50 cc)

Frecuencia Central banda de octava (Hz)	A_R	B_R	A_P	B_P
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

Tabla II.A.6 Coeficientes para el efecto de aceleración y deceleración
 (datos que se confirmaron durante la Fase B de CNOSSOS-UE)

Categoría	<i>K = 1: cruce</i>		<i>K = 2: rotonda</i>	
	<i>C_R</i>	<i>C_P</i>	<i>C_R</i>	<i>C_P</i>
1	-4,5	+5,5	-4,4	+3,1
2	-4,0	+9,0	-2,3	6,7
3	-4,0	+9,0	-2,3	6,7
4a	-		-	
4b	-		-	

Referencias

- [1] 2002/49/CE - Evaluación y gestión del ruido ambiental. Directiva, 25 de junio de 2002. Diario Oficial nº L 189 de 18/07/2002 p. 0012 – 0026.
- [2] Ley del Ruido. Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del ruido. BOE 18/11/2003.
- [3] RD 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.
- [4] RD 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.
- [5] NMPB-Routes-96 (SETRA-CERTULCPC-CSTB).
- [6] RLS, 1990. *Richtlinien für den Lärmschutz an Strassen*. BM für Verkehr, Bonn, 1990.
- [7] Department of Transport, *Calculation of Road Traffic Noise*, HMSO, UK, 1988.
- [8] Department of Transport, *Calculation of Road Traffic Noise*, HMSO, UK, 1988.
- [9] Miguel Arana. Elaboración de Mapas Acústicos Mediante Técnicas Computacionales. Departamento de Física. Universidad Pública de Navarra. España (2002).
- [10] Informe sobre el Draft JRC REFERENCE REPORT on Common Noise Assessment Methods in EU CNOSSOS-EU version 2d, España, 28 de Mayo de 2010.
- [11] French standard, NF S 31- 133, Acoustics – Outdoor noise - Calculation of sound levels, February 2011. ISSN 0335- 3931, 71p.
- [12] Cárdenas J.D. Diseño y desarrollo de herramienta informática para la predicción de ruido de tráfico. Investigación presentada como parte a optar al grado de Doctor en Acústica, Universidad Politécnica de Madrid (2004).
- [13] <http://www.bksv.com>

