

## COMPARATIVA DE NUEVOS MODELOS EUROPEOS DE PREDICCIÓN DE NIVELES DE RUIDO DE TRÁFICO RODADO

PACS 43.50.Rq

Simona Pujadó, Josep; Jorge Sánchez, Juan; Mulet Arias, Jordi F.  
Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa. Universitat Politècnica de Catalunya.  
Av. Bases de Manresa 61-73  
08242 Manresa  
Tel. +34938777200  
[jsimona@cetim.cat](mailto:jsimona@cetim.cat)

**ABSTRACT** European Commission prepares a method to evaluate noise from road traffic and other noise sources so that in 2012 the strategic noise maps can be produced with a common method. Recent European models to predict environmental noise levels, in particular the model created in the European project "Harmonoise", the model for Scandinavian countries "Nord2000" and the reviewed model "NMPB Routes 2008", are introduced in this communication and their application to some cases.

**RESUMEN** La Comisión Europea prepara un método de evaluación del ruido procedente del tráfico rodado y otras fuentes de ruido, para que en el 2012 se realicen los mapas estratégicos de ruido con un método común. El modelo creado en el proyecto europeo "Harmonoise", el de los países escandinavos "Nord2000" y la revisión del modelo utilizado actualmente "NMPB Routes 2008" son los modelos europeos para la predicción de los niveles de ruido ambientales desarrollados a partir de investigaciones más recientes. En este estudio presentamos una comparativa de estos modelos para varios casos de prueba.

### INTRODUCCIÓN

Los modelos de cálculo de simulación del nivel de ruido ambiental proveniente del tránsito rodado, surgieron como precursores de los actuales, en la década del 1950 [1]. Los primeros modelos fueron diseñados para predecir el nivel de presión sonora,  $L_p$ , de un único vehículo en la carretera. Posteriormente, surgieron modelos que incorporaron el factor temporal y, intentaban predecir el nivel continuo equivalente,  $L_{eq}$ , del mismo único vehículo. Finalmente se desarrollaron modelos para predecir el nivel continuo equivalente,  $L_{eq}$ , de varios flujos de vehículos en distintas circunstancias. Al mismo tiempo, se generalizó el uso de la ponderación frecuencial A [2].

Por otro lado, el Libro Verde de la Comisión Europea [3], desarrolló un nuevo marco para la política del ruido con base a la responsabilidad compartida entre la Unión Europea y los gobiernos estatales. Este documento, ya incluía medidas para mejorar la precisión y normalización de los datos de los niveles sonoros que soportaban los ciudadanos europeos [1].

El proceso concluyó con la aprobación, de la Directiva sobre el ruido ambiental, END [4], el objetivo de la cual fue exigir a los Estados Miembros, la elaboración de mapas estratégicos de ruido, sobre la base de indicadores armonizados, para cuantificar la población expuesta a determinados niveles, para informarla sobre la exposición al ruido [5] y sus efectos, y para elaborar planes de acción para abordar cuestiones relativas al ruido [6,7].

Respecto a los modelos de predicción del nivel de presión sonora provocado por el tráfico rodado, distintos países utilizan distintos modelos. Así, fuera del ámbito de la Unión Europea, se desarrollaron entre otros: en Estados Unidos el FHWA TNM, del cual la versión vigente es la 2.5 [8], en Japón el ASJ RTN, del cual la versión vigente es la 2008 [9] o, la norma internacional ISO 9613 [10]. En la Unión Europea, varios países cuentan con modelos de previsión propios y también existen modelos de nueva creación [11], entre los cuales cabe destacar los desarrollados en la última década, como el método de los países nórdicos, denominado Nord 2000 [12], el método Harmonoise, desarrollado dentro los proyectos europeos Harmonoise y Imagine [13], del cual en este documento se ha utilizado el método de ingeniería [14] o la reciente nueva versión del método francés NMPB-Routes-2008 [15]. Asimismo, en España antes de la entrada en vigor de la END, se había desarrollado un método desde el ámbito universitario [16], aunque el método utilizado, siguiendo la recomendación de la END para los países sin método propio, ha sido el método nacional francés NMPB-Routes-1996 [17].

Como se pone de manifiesto en un reciente estudio [18], aunque la END estableció la necesidad que todos los métodos se indicaran con el nivel  $L_{den}$ , índice de ruido día tarde noche, y el  $L_n$ , índice de ruido noche, y se realizara una estimación de la población situada en intervalos dados de dicho índice, existe una divergencia de resultados en la elaboración de los mapas estratégicos de ruido en distintos países, principalmente debido al uso de distintos métodos de cálculo (la END sólo recomendó el uso de métodos a los países que no dispusieran de métodos nacionales) y, también al uso de distinto software que da resultados desiguales para el mismo método aplicado.

A fin de mejorar la calidad y la fiabilidad de los resultados de la evaluación global del ruido, la Comisión Europea está preparando un método común de evaluación del ruido, para tráfico rodado, ferroviario, las aeronaves y el ruido industrial, incluidas las directrices sobre la implementación del método y los datos de entrada, destinado a obtener resultados comparables entre los Estados Miembros de la UE [19,20]. Este método, en principio será conocido como CNOSSOS-EU, acrónimo de Common Noise Assessment Methods in EU [21] y, parece que partirá de la base de los métodos Nord 2000 y Harmonoise, pero también de la investigación desarrollada para la NMPB-Routes-2008.

Algunos modelos de predicción, como Nord 2000 y Harmonoise [12,14], incluyen dos submodelos: (1) el modelo que predice la emisión sonora del flujo de tráfico rodado y (2) el modelo que predice la propagación (atenuación) de dicha emisión sonora hasta el receptor mientras que en otros modelos existe relación entre ambos, aunque el nombre del modelo de predicción propiamente dicho hace referencia solo a la propagación, como es el caso de NMPB-Routes-2008 [15].

## NUEVOS MODELOS EUROPEOS DE PREDICCIÓN DE RUIDO DE TRÁFICO RODADO

### Nord 2000

El método Nord 2000 se desarrolló en el período 1996-2000, proveyendo una primera versión el 2001, la cual fue revisada en el 2006 y, reúne muchos aspectos parecidos con el modelo Harmonoise, aunque presentan algunas diferencias [22]. El modelo se basa en la teoría geométrica de los rayos y la teoría de la difracción e incorpora los cálculos en bandas de tercios de octava. El modelo segmenta los terrenos no llanos en un número determinado de segmentos en línea recta. Por otro lado, el efecto de la dispersión por objetos tales como las zonas de viviendas o los bosques pueden ser incluidos. En referencia al efecto del suelo, éste se caracteriza por su impedancia y rugosidad.

### Harmonoise/Imagine

Cómo se ha mencionado anteriormente, dentro del proyecto Harmonoise, se desarrolló un nuevo método de predicción de la propagación del sonido en el aire libre. El método calcula la atenuación del sonido que se propaga desde un punto de origen, fuente, a un punto receptor, en un único plano de propagación; por este motivo el modelo se denomina “punto a punto” o “Point-To-Point: P2P” [23]. El modelo tiene en cuenta la propagación a través de varios perfiles de terreno complejos y, en una amplia variedad de condiciones meteorológicas.

En el método Harmonoise, el modelo de propagación del ruido hasta el receptor es independiente del modelo de la fuente generadora de ruido. De hecho, existen dos modelos de propagación distintos: (1) un modelo de referencia, basado en el estado del arte, de simulación numérica, el cual consume relativamente bastante tiempo de cálculo y se encuentra pensado para el uso por especialistas y, (2) un modelo, denominado de ingeniería destinado al uso diario para la predicción del ruido, el cual se ha evaluado y afinado a partir de los resultados numéricos del modelo de referencia.

El método Harmonoise es un modelo de predicción parecido y basado en parte con el método Nord 2000, a diferencia de la mayoría de los otros modelos actuales de predicción, que se basan directa o indirectamente en la norma ISO 9613-2 [23].

### NMPB-Routes-2008

La revisión del método nacional francés, NMPB-Routes-2008, ha traído consigo la actualización [15] de la guía de emisión [24,25], donde los valores de emisión se expresan en tercios de octava. Así modificaciones importantes respecto a la fuente son la reducción de su altura y la introducción de dos espectros distintos[26,27].

En la parte de propagación, el principal cambio es la sustitución de la fórmula de atenuación a causa del suelo en condiciones de refracción descendente basada en la ISO 9613-2, por la fórmula de atenuación a causa del suelo en condiciones homogéneas de la NMPB-Routes-1996 con alturas corregida, con la finalidad de tener en cuenta la curvatura media de los rayos (refracción) y su dispersión (turbulencia). Además, en la NMPB-Routes-2008 se añade un término de atenuación para cortes de taludes. Respecto a la difracción, la corrección  $\Delta_{dif}$  se ha adecuado para las barreras de baja altitud [28].

## PARÁMETROS QUE MODELIZAN LA EMISIÓN DEL TRÁFICO RODADO

La modelización de la fuente sonora en el caso del tráfico rodado, se suele expresar en términos del  $L_{A,w}$ , potencia sonora de la fuente con ponderación frecuencial A y, se suele considerar como una función de varios parámetros [19]: (1) la frecuencia, (2) la tipología de los vehículos, (3) la velocidad de los mismos, (4) su aceleración o desaceleración, (5) el tipo de superficie de rodamiento, (6) el tipo de neumático, (7) los elementos singulares de la vía, como pueden ser puentes, túneles, viaductos o cruces, (8) la segmentación de la fuente o el método mediante el cual, la fuente lineal del tránsito se descompone en fuentes puntuales y, (9) la posición de la fuente.

Una característica común de los modelos comparados en este artículo es el uso de las bandas de frecuencia de tercios de octava, para caracterizar la emisión del tráfico rodado y, consecuentemente también su uso en el cálculo de la propagación de dicha emisión. Así, en los modelos Nord2000 y Harmonoise, se trabaja con el espectro de frecuencia en bandas de tercios de octava entre 25 i 10.000 Hz, mientras que en la NMPB-Routes-2008, el espectro se reduce a las bandas de tercios de octava entre 100 i 5.000 Hz.

## PARÁMETROS QUE MODELIZAN LA PROPAGACIÓN EN EL AIRE LIBRE

La atenuación del ruido a medida que se propaga, se suele considerar como función de los siguientes parámetros [19]: (1) la divergencia geométrica, (2) la absorción atmosférica, (3) el perfil del terreno, (4) el efecto del suelo, (5) las reflexiones, (6) las difracciones y, (7) la influencia meteorológica, considerando como tal, el efecto de la temperatura, la presión, la velocidad del viento y su dirección.

A continuación, se comentan brevemente, cada uno de dichos parámetros:

- (1) Divergencia geométrica: La divergencia geométrica tiene en cuenta la disminución del sonido debido a la distancia de propagación.
- (2) Absorción atmosférica: Una porción de la energía acústica se convierte en energía térmica en su propagación a través del aire. Hay conducción calorífica, viscosidad de corte y pérdidas por relajación molecular. La absorción atmosférica resultante es significativa para elevadas frecuencias y largas distancias, hecho que la convierte en un filtro de paso bajo a largas distancias [29].
- (3) Perfil del terreno: Los perfiles de terrenos no llanos son objeto de simplificación mediante el principio de máxima desviación, en Nord 2000 y en Harmonoise, mediante el cual, el terreno se va dividiendo en segmentos rectos obteniendo sus extremos con la intersección del perfil del terreno, con la perpendicular de máxima distancia a la recta de unión de los extremos de referencia iniciales. En cambio, en NMPB-Routes-2008, el perfil real del terreno, se reemplaza por el plano ficticio que representa el perfil medio del terreno.
- (4) Efecto del suelo: Aunque se suele hablar de absorción del suelo [15], [29] plantea que el efecto del suelo es el resultado de la interferencia entre el sonido que se propaga directamente desde la fuente al receptor con el sonido reflejado desde el suelo, cuando fuente y receptor se encuentran cercanos al suelo. Así, la interferencia, se puede relacionar con interferencias que pueden provocar una atenuación o un aumento del nivel sonoro.

Cerca del suelo, en superficies consideradas acústicamente como duras o no porosas, como el asfalto o el hormigón no poroso, la presión sonora más o menos se duplica en un amplio rango de frecuencias audibles [29]. Por otro lado, en superficies porosas, como la tierra, la arena, suelo con presencia de vegetación o la nieve, el aumento de nivel sonoro tiende a ocurrir en las frecuencias bajas, en las cuales la onda sonora es larga y por tanto presenta menor capacidad para penetrar en los poros; sin embargo, a frecuencias altas, la onda sonora es capaz de penetrar en el terreno poroso por lo que la reflexión en la suelo, puede presentar un cambio en la amplitud y fase de la onda sonora.

- (5) Reflexiones: Se suelen incorporar en el denominado efecto del suelo. En la NMPB-Routes-2008, en el caso de reflexiones en elementos verticales, se introduce una corrección en el nivel de emisión de la fuente, la cual es función del coeficiente de absorción de la superficie.
- (6) Difracción y barreras: En las barreras acústicas, el ruido se propaga hasta el receptor básicamente debido a la difracción en los bordes de la barrera.
- (7) Condiciones meteorológicas: Las clasificaciones de condiciones meteorológicas, en los modelos Harmonoise y NMPB-Routes-2008, reflejan la situación de la atmosfera en relación a las condiciones que favorecen, o dificultan, la propagación del sonido en una determinada dirección entre la fuente y el receptor. La mayoría de los parámetros utilizados en Harmonoise y NMPB-Routes-2008 coinciden o son fácilmente convertibles a partir de las Redes de estaciones meteorológicas automáticas de organismos de meteorología, a excepción del parámetro nubosidad, el cual no recogen este tipo de estaciones y, el cual es necesario en Harmonoise. Las distintas clasificaciones parten de la constatación o no de inversión térmica en la atmosfera y del gradiente de la velocidad del viento, así como de su dirección, para determinar las distintas clases, las cuales en Harmonoise son 25 y en NMPB-Routes-2008 se reducen a dos: Condiciones homogéneas (neutras o desfavorables a la propagación del sonido) o Condiciones de refracción descendente (favorables a la propagación del sonido).

La Tabla 1 recoge una comparativa de los parámetros que utilizan los tres modelos.

## CASO DE ESTUDIO COMPARATIVO

Se han aplicado los modelos Harmonoise y NMPB-Routes-2008 en una ubicación real, la cual se muestra en la Figura 1. Los cálculos se han realizado a partir de la referencia [14] para Harmonoise y [15] para NMPB-Routes-2008. Para el cálculo del parámetro "Exceso de atenuación" en Harmonoise, se ha utilizado el software Harmonoise Point-to-Point v. 2.019 [23]. Por último, se han validado algunos de los resultados con el software Predictor Type 7810 v 7.03 de Brüel&Kjaer.

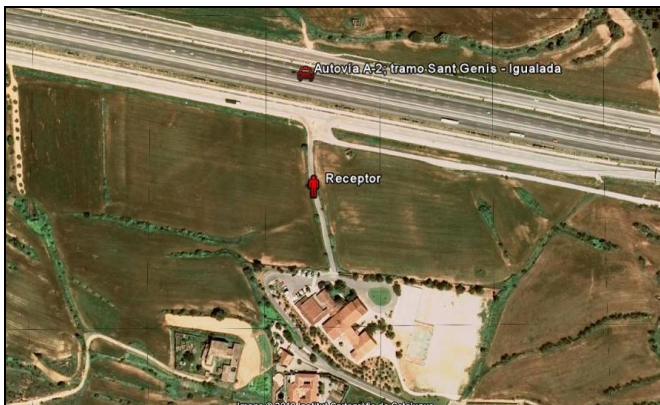


Figura 1.- Punto de medida para realizar la comparación de modelos; punto ubicado en la autovía A-2, en el tramo entre Sant Genís y Igualada a la altura del Colegio "Mestral".

A continuación se muestran los resultados de la aplicación de dichos modelos y su comparación con las medidas realizadas en distintos días y en distintas situaciones meteorológicas. La comparación de los resultados se muestra dividida en condiciones de suelo húmedo (Figura 2) y en condiciones de suelo seco (Figura 3).

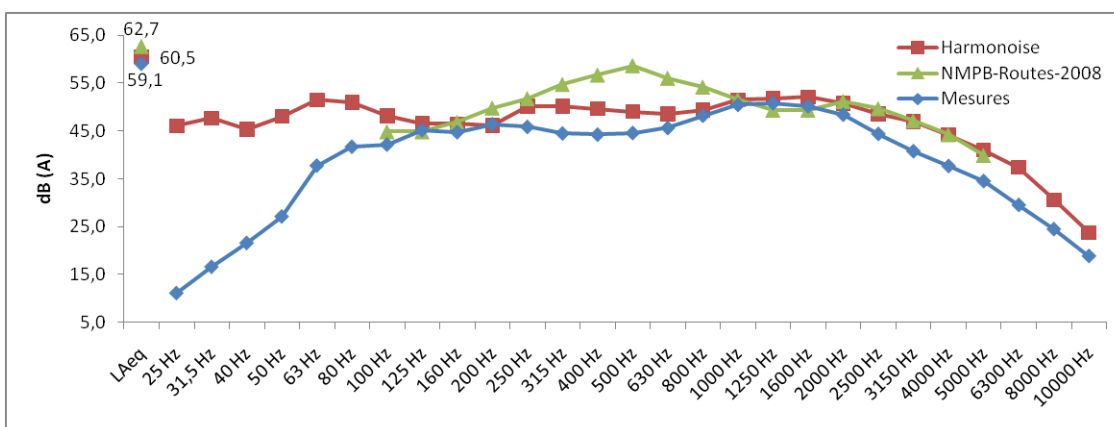


Figura 2 - Comparativa de los resultados de los modelos Harmonoise y NMPB-Routes-2008, para la situación de la Figura 1 con el suelo húmedo y un flujo alrededor de los 4.000 vehículos por hora (de los cuales aproximadamente un 4% corresponden a vehículos pesados).

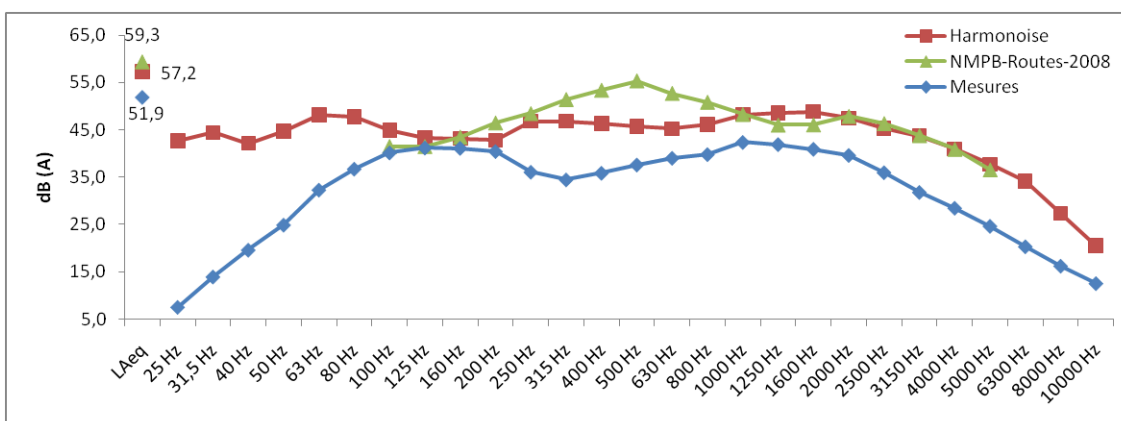


Figura 3 - Comparativa de los resultados de los modelos Harmonoise y NMPB-Routes-2008, para la situación de la Figura 1 con el suelo seco y un flujo alrededor de los 2.000 vehículos por hora (de los cuales aproximadamente un 5% corresponden a vehículos pesados).

## CONCLUSIONES

Se ha constatado la dificultad de obtención de algunos parámetros requeridos en los modelos para la definición de las condiciones meteorológicas a largo plazo, cómo puede ser especialmente la nubosidad, pero también otros como el gradiente vertical de temperatura.

Debido a que la finalidad de los cálculos realizados con los distintos modelos analizados es la obtención de unos valores globales  $L_{den}$  y  $L_n$ , que no recogen la componente espectral del ruido, o incluso, la obtención del valor de población expuesta a un determinado índice sonoro, es suficiente el uso de bandas de octava, con la finalidad de disminuir el tiempo y la potencia de cálculo necesarios para obtener los resultados buscados. Es decir, se considera que la resolución del espectro en bandas de tercios de octava no es necesaria para la realización de mapas estratégicos de ruido.

Tabla 1 - Parámetros de modelización en Nord 2000, Harmonoise y NMPB-Routes-2008.

Método de previsión de ruido proveniente del tráfico rodado	Nord2000	Harmonoise Engineering Method	NMPB-Routes-2008
Fuente de información	<a href="http://www.madebydelta.com/nord2000">www.madebydelta.com/nord2000</a> [12]	<a href="http://www.imagine-project.org">www.imagine-project.org</a> [14]	<a href="http://www.setra.equipement.gouv.fr">http://www.setra.equipement.gouv.fr</a> [15]
<b>Emisión</b>			
E1 – Frecuencia	Entre 25 Hz y 10 kHz en 3/8	Entre 25 Hz y 10 kHz en 3/8	Entre 100 Hz y 5 kHz en 3/8
E2 – Tipología vehículos	3: Ligeros, Medio pesados y Pesados	3-5: Ligeros, Medio pesados y Pesados	2: Ligeros y Pesados
E3 – Velocidad vehículos	Según tipología, para las fuentes de ruido de rodamiento y de tracción	Según tipología, para las fuentes de ruido de rodamiento y de tracción	Según tipología, tipo y edad calzada
E4 – Superficie rodamiento		Tipo de pavimento y temperatura	Tipo pavimento y edad
E5 – Aceleración/Frenada	Inclusión cómo gradiente	Corrección en ruido motor	Sí
E6 – Tipo neumático	Sí	Sí	No
E7 – Singularidades vía	No	No	No, referencia a [25]
E8 – Segmentación fuente	Sí, equiangular, equidistante o variable Punto de emisión en bisectriz	Sí	Sí, equiangular, equidistante o variable Punto de emisión en mitad segmento
E9 – Posición fuente		Rodamiento 0,01m;Tracción 0,30/0,75m	0,05 m
<b>Propagación</b>			
P1 – Divergencia geométrica	$10 \times \log(4\pi d^2/d_0^2)$	$10 \times \log(4\pi d^2/d_0^2)$	$20 \times \log(d) + 11$
P2 – Absorción atmosférica	Función modificada de ISO 9613-1	Función de f y d según ISO 9613-1	ISO 9613-1 a 15 °C y 70% humedad
P3 – Perfil del terreno	Secuencia de segmentos rectos	Secuencia de segmentos rectos	Plano medio del perfil del terreno
P4 – Efecto del suelo	Modelo impedancia de Delany-Bazley	Modelo impedancia de Delany-Bazley	Función de coeficiente G adimensional
P5 – Reflexiones	Se añaden a la propagación directa	Ponderada por zonas de Fresnel	Consideradas en efecto del suelo
P6 – Difracciones	Adaptación de Hadden&Pierce	Ponderada por zonas de Fresnel	Dependiente de la longitud de onda y la diferencia de trayectorias
P7 – Condición meteorológica	Se adoptan las clases de Harmonoise	25 clases	2: homogénea/refracción descendente

## REFERENCIAS

- [1] M. Ausejo Prieto, Estudio de la validación, errores e incertidumbre en la elaboración de mapas de ruido, (2009).
- [2] C. Steele, A critical review of some traffic noise prediction models, *Appl. Acoust.* 62 (2001) 271-287.
- [3] Commission of the European Communities, Green Paper, (1996) 31.
- [4] Unión Europea, Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental, (2002) L189/12-L189/25.
- [5] European Environment Agency, Noise Observation and Information Service for Europe (NOISE), (2010).
- [6] E. Murphy, E.A. King, Strategic environmental noise mapping: Methodological issues concerning the implementation of the EU Environmental Noise Directive and their policy implications, *Environ. Int.* 36 (2010) 290-298.
- [7] WHO Regional Office for Europe, Noise and health, (2010).
- [8] Federal Highway Administration, FHWA Traffic Noise Model Version 2.5, (2004).
- [9] K. Yamamoto, Road traffic noise prediction model "ASJ RTN-Model 2008": Report of the Research Committee on Road Traffic Noise, *Acoustical Science and Technology.* 31 (2010) 2-55.
- [10] ISO, ISO 9613-2:1996 Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation, (1996).
- [11] AENOR, UNE-ISO 1996-2:2009 Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 2: Determinación de los niveles de ruido ambiental. (2009).
- [12] J. Kragh, B. Plowsing, S. Storeheier, G. Taraldsen, H. Jonasson, A. Saarinen, Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. (2006).
- [13] Imagine Consortium, Imagine project, (2008).
- [14] R. Barelds, R. Nota, D. van Maercke, Harmonoise WP 3 Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning, (2005).
- [15] SÉTRA, Préviation du Bruit Routier: Guide Méthodologique, Sétra, Bagneux, 2009.
- [16] J. Jorge, J. Puigdomènech, Formulació d'un model de previsió de nivells sonors. Adaptat al cas de Catalunya, (1999). Documento no publicado.
- [17] CETUR, Bruit des infrastructures routières: Méthode de calcul incluant les effets météorologiques (NMPB-Routes-1996), Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et du Tourisme, Paris, 1997.
- [18] E. Murphy, E.A. King, Strategic environmental noise mapping: Methodological issues concerning the implementation of the EU Environmental Noise Directive and their policy implications, *Environ. Int.* 36 (2010) 290-298.
- [19] JRC European Commission, Workshop on Selection of common noise assessment methods in EU, (2009).
- [20] S. Kephelopoulos, M. Paviotti, Advancement in the development of European common noise assessment methods: where are we? (2009).
- [21] JRC, IHCP, Common NOISE ASSESSMENT METHODOLOGY IN EU (CNOSSOS-EU), Draft JRC Reference Report (2010) 1-131.
- [22] G.B. Jónsson, F. Jacobsen, A comparison of two engineering models for sound propagations: Harmonoise and Nord2000, (2008) BNAM2008-1.
- [23] D. van Maercke, Harmonoise. Programming the Point-To-Point Propagation Model, (2004).
- [24] CETUR, Bruit Et Formes Urbaines: Propagation Du Bruit Routier Dans Les Tissus Urbains, Cetur, Bagneux, 1981.
- [25] Ministère de l'environnement et du cadre de vie, Ministère des transports, Guide De Bruit Des Transports Terrestres. Préviation Des Niveaux Sonores, , November 1980.
- [26] F. Besnard, M. Bérengier, S. Doisy, N. Fürst, J.F. Hamet, J. Lelong, M.A. Pallas, The procedure for updating the vehicle noise emission values of the French "Guide du Bruit", (2003).
- [27] S. Doisy, J. Lelong, J.-. Hamet, New vehicle noise emission values to update the French "Guide du Bruit", (2008).
- [28] G. Dutilleul, J. Defrance, D. Ecotière, B. Gauvreau, M. Bérengier, F. Besnard, E.L. Duc, NMPB-Routes-2008: The Revision of the French Method for Road Traffic Noise Prediction, *Acta Acustica united with Acustica.* 96 (2010) 452-462.
- [29] K. Attenborough, Sound Propagation in the Atmosphere, in: Anonymous Springer Handbook of Acoustics, Springer New York, 2007, pp. 113-147.