

SIMULACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE RAYOS DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL RUIDO DE VEHÍCULOS EN CALLES PARA LA PREDICCIÓN DE LOS ÍNDICES L_{10} Y L_{90}

REFERENCIA PACS: 43.50.Lj

Francisco Fernández Arango, Jorge L. Parrondo Gayo, Joaquín Fernández Francos, Pablo García Castejón
Universidad de Oviedo
Área de Mecánica de Fluidos
E.T.S.I.I. e I.I.G.
Campus de Viesques
33204 GIJÓN

SUMMARY

The sensation of annoyance caused by the noise of traffic in urban streets is significantly increased by the fluctuations of noise associated to the passage of each vehicle, when the traffic is discontinuous. Its characterisation requires the study of the evolution of the sound pressure level along time. For this purpose a simulation procedure based on the acoustic ray method has been developed, with a particular focus on the case of streets with continuous facades at the sides. The vehicles were simulated as point sources of sound in motion along the streets, so that the instantaneous sound pressure level at the receptor locations could be calculated for several relative positions of any given passing vehicle. This paper presents the calculation algorithm together with some of the results obtained on the statistical levels L_{10} and L_{90} in streets with different geometrical and traffic conditions. Also, predictions are compared to noise measurements obtained on several streets of the city of Gijón, showing a good agreement.

INTRODUCCIÓN

El cálculo teórico de los niveles de ruido generados por el tráfico en vías urbanas resulta de gran interés, puesto que posibilita una rápida adaptación de los datos de ruido ante cualquier alteración de las características geométricas o de tráfico de cada calle y, además, permite estimar a priori el impacto ambiental sonoro correspondiente a una determinada propuesta de actuación urbanística o de simple redistribución del tráfico. Dadas las características de la mayoría de nuestras ciudades (calles estrechas con fachadas altas), los campos sonoros generados por los vehículos tienen una gran componente de reverberación y, por ello, los métodos de simulación de acústica geométrica, como el método de las imágenes o el método de rayos, pueden resultar particularmente adecuados. De hecho existen varios programas comerciales, basados en uno de esos dos métodos o en ambos, diseñados para calcular la distribución espacial del nivel de ruido equivalente L_{EQ} , considerando para ello a los vehículos como fuentes lineales de sonido [1].

Sin embargo, en el caso de tráfico discontinuo (como el nocturno) el nivel de ruido equivalente L_{EQ} resulta insuficiente para caracterizar la sensación de molestia provocada en el ambiente, pues, para un mismo L_{EQ} , las sucesivas fluctuaciones del nivel de presión sonora asociadas al acercamiento y posterior alejamiento de los vehículos pueden incrementar esa molestia notablemente [2,3]. Para valorar la propia variabilidad del ruido a lo largo del tiempo de una forma simple se pueden emplear algunos parámetros (como el índice de ruido de tráfico, TNI) que normalmente están basados en los niveles estadísticos L_{10} y L_{90} , los cuales recogen el nivel de ruido

superado bien en un 10% o bien en un 90% del tiempo total de exposición. La determinación teórica de dichos índices constituye el objeto del estudio aquí expuesto.

Para este propósito se ha desarrollado un modelo de simulación de los campos sonoros creados en vías urbanas basado en el método de rayos acústicos, en el que los vehículos se han simulado como fuentes sonoras puntuales en movimiento a lo largo de las calles [2,4]. Dado el objeto del estudio, en el algoritmo se obtiene primero la distribución instantánea del nivel de presión sonora en la calle para sucesivas posiciones relativas de cada vehículo a lo largo de su recorrido, para poder así analizar a continuación la evolución temporal del ruido en cada posición receptora de la calle. En este trabajo se describe brevemente el modelo de simulación desarrollado y se muestran algunas de las predicciones del programa de cálculo para los niveles L_{10} y L_{90} , obtenidas por bandas de octava bajo distintas características de tráfico y de geometría de las calles. Así mismo se ofrece una comparación entre dichas predicciones y los resultados de varias medidas experimentales realizadas en varias calles de la ciudad de Gijón. Entre ambas, medidas y predicciones, se encontró un acuerdo considerado satisfactorio en todos los casos.

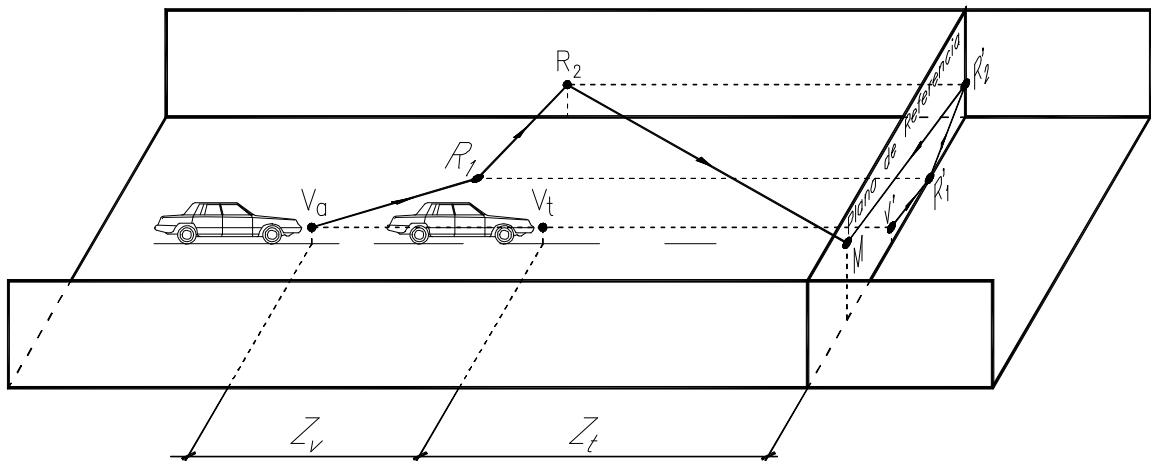


Figura 1. Proyección de un rayo acústico $V_a-R_1-R_2-M$ sobre el plano de referencia (rayo $V'-R_1'-R_2'-M$).

MÉTODO DE SIMULACIÓN

Dado el objeto de este estudio, los vehículos se consideraron como fuentes monopulares, con un espectro de potencia sonora dependiente de la velocidad, tipo de vehículo (ligero o pesado), tipo de pavimento y pendiente de la calle [5,6]. Además, para simplificar tanto la entrada de datos como los posteriores cálculos, se consideró que las calles tendrían una sección transversal constante a lo largo de su eje. Sus parámetros de caracterización incluyen datos geométricos (ancho de calzada, aceras y mediana, número de carriles, altura de fachadas, pendiente, aleros en fachadas, vehículos aparcados...) y datos del tráfico (vehículos por hora, velocidad promedio y porcentaje de vehículos pesados).

El algoritmo de cálculo se basó en el método de rayos, que consiste en la proyección iterativa del sonido a lo largo de un conjunto de direcciones principales, a las que se asocia un ángulo sólido, contabilizándose para cada punto la correspondiente contribución de presión sonora a

la par que se modifica la trayectoria de los rayos cuando inciden sobre las superficies que delimitan la calle. Para unas determinadas condiciones geométricas y de tráfico, la precisión de las predicciones de ruido depende básicamente del número de rayos proyectados y del máximo orden de reflexiones considerado para cada rayo. Frente al método de imágenes, se optó por el método de rayos por su mayor simplicidad y por su flexibilidad para incorporar características de direccionalidad para las fuentes sonoras, si bien en este trabajo aún no se ha hecho uso de dicha propiedad.

Puesto que se asumen calles con geometría transversal constante, los rayos siempre se reflejan respecto a planos paralelos al eje de la calle, es decir, los rayos nunca ven alterada la componente longitudinal de su dirección (figura 1). Por ello el estudio de las reflexiones de los rayos se puede reducir a un único plano de referencia, vertical y perpendicular al eje de la calle, con una fuente sonora ficticia situada en las mismas coordenadas transversales que cada vehículo circulante (obsérvese en la figura 1 la correspondencia biunívoca entre los puntos del rayo $V_a-R_1-R_2-M$ y los de su proyección en el plano de referencia $V'-R_1'-R_2'-M$). En consecuencia, resultó suficiente la proyección de los rayos sólo a través de una circunferencia (en vez de una esfera) centrada en la fuente puntual, considerándose sectores angulares para cada rayo en vez de ángulos sólidos. Así pues, tras la inicialización de variables y la definición de nodos receptores de cálculo, el algoritmo analiza la trayectoria de cada rayo en el plano transversal de referencia, para lo que se efectúan pequeños desplazamientos tanto en la dirección de los rayos como en la dirección perpendicular (dentro del sector angular de influencia del rayo). En su caso, los puntos resultantes se asocian al nodo receptor más próximo, evitándose asignaciones duplicadas, y entonces ya se procede a calcular los correspondientes incrementos de presión sonora en cada banda de frecuencia y para un determinado número de instantes de tiempo, teniéndose en cuenta que a cada instante t le corresponde una cierta posición relativa V_t de cada vehículo circulante respecto al plano característico. Este cálculo requiere la corrección de la longitud del rayo en el plano de referencia mediante la adición vectorial de la correspondiente distancia longitudinal a lo largo de la calle; esta distancia se determina teniendo en cuenta la posición relativa Z_t entre vehículo y plano característico en el instante de cálculo, así como la distancia Z_a recorrida por el vehículo en el tiempo necesitado por el rayo acústico para alcanzar el plano de referencia (figura 1). Durante estos cálculos se han considerado además los efectos de la absorción aérea de energía sonora (importante para frecuencias altas y grandes distancias), absorción en reflexiones (con coeficientes de absorción para cada pared y frecuencia) y difracción en el caso de vehículos aparcados junto a aceras [7]. No se consideró el efecto Doppler.

Este procedimiento ya permite disponer de las distribuciones del nivel de presión sonora en el plano de referencia para un cierto número de instantes de tiempo durante el paso de cada vehículo. Para cualquier nodo receptor la evolución temporal del nivel de presión sonora muestra una forma de campana, aunque no totalmente simétrica, con un máximo ligeramente desplazado respecto del instante de paso del vehículo a través del plano de referencia. A partir de la evolución temporal del ruido producido por cada vehículo aislado, y conociendo el número de vehículos circulantes por hora, se puede determinar el nivel de ruido equivalente [2,4], pero para estimar además los niveles estadísticos L_{10} y L_{90} es antes necesario conocer la distribución del paso de vehículos a lo largo del tiempo. Esta distribución se puede considerar aleatoria cuando el tráfico es escaso, como es el típico tráfico nocturno, pero cuando el tráfico es denso existe una modulación impuesta por la red de semáforos. Para el presente trabajo no obstante se optó por mantener una distribución aleatoria de paso de vehículos en todos los casos, para no aumentar la complejidad en la aportación inicial de datos. Así pues, para calcular los niveles L_{10} y L_{90} el algoritmo considera un suficiente número de instantes temporales a lo largo de un periodo de tiempo de una hora y primero se asigna a cada uno un nivel de presión sonora igual al ruido de fondo existente para cada frecuencia (medido en ausencia de circulación de vehículos). A continuación se distribuyen aleatoriamente todos los vehículos circulantes durante ese periodo, de modo que cada una de sus curvas de ruido (con forma de campana) se puedan sumar convenientemente desfasadas sobre la evolución temporal acumulada del nivel de presión sonora. El nivel L_{10} está asociado a los máximos valores de ruido registrados durante el periodo de referencia, mientras que el nivel L_{90} recoge los valores más pequeños. En el caso de pequeña densidad de tráfico el nivel L_{90} representa de hecho

el ruido de fondo.

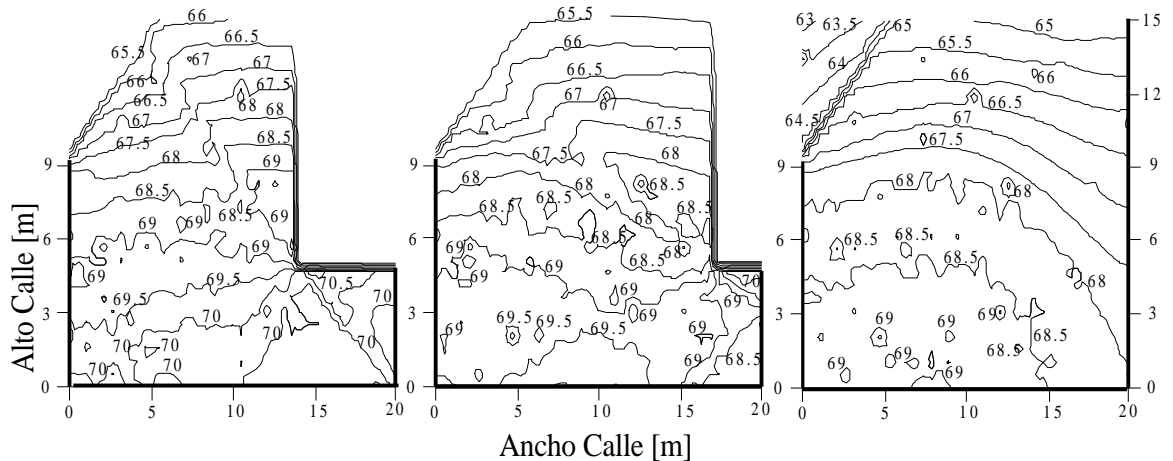
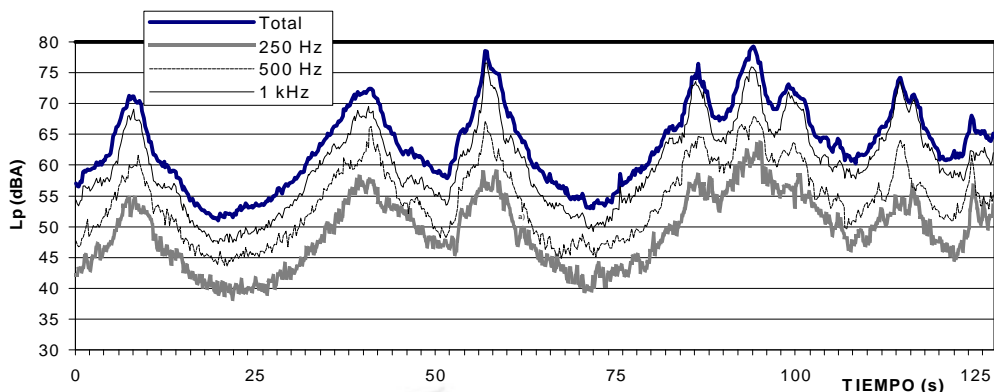


Figura 2. Distribución del nivel L_{10} (dBA) calculado para una calle con varios anchos de alero desde la fachada derecha (6, 3 y 0 m), altura de fachadas izquierda y derecha de 9 y 15 m, y tráfico de 330 vehículos/h a la velocidad de 55 km/h.

PREDICCIONES DEL MODELO Y CONTRASTE EXPERIMENTAL

Siguiendo las líneas básicas del modelo descrito se realizó una versión preliminar, simplificada, de programa de cálculo para PC, que era apropiado para determinar la distribución en las calles del nivel de ruido equivalente L_{EQ} [2,4]. Para estos cálculos se encontró suficiente el lanzamiento de unos 500 rayos con un orden máximo de 12 reflexiones por rayo. Los resultados del programa para un sustancial número de calles con diferentes características geométricas y de tráfico, y sobre diferentes bandas de octava, resultaron estar dentro de un intervalo de ± 2 dBA respecto a las mediciones con sonómetro integrador, lo que se juzgó como un resultado suficientemente satisfactorio [2,4]. Actualmente ya se ha desarrollado una segunda versión más completa, apta para determinar también los niveles L_{10} y L_{90} , que suponen el verdadero objeto del estudio. Como ejemplo de estos cálculos, la figura 2 muestra las distribuciones espaciales del nivel L_{10} a través de una calle limitada por fachadas de 9 y 15 m de altura a cada lado y con un alero saliente desde la fachada más alta de 0, 3 y 6 m de anchura en cada caso (tráfico de 330 vehículos/h, con velocidad promedio de 55 km/h), pudiendo apreciarse los correspondientes efectos de concentración de ruido.

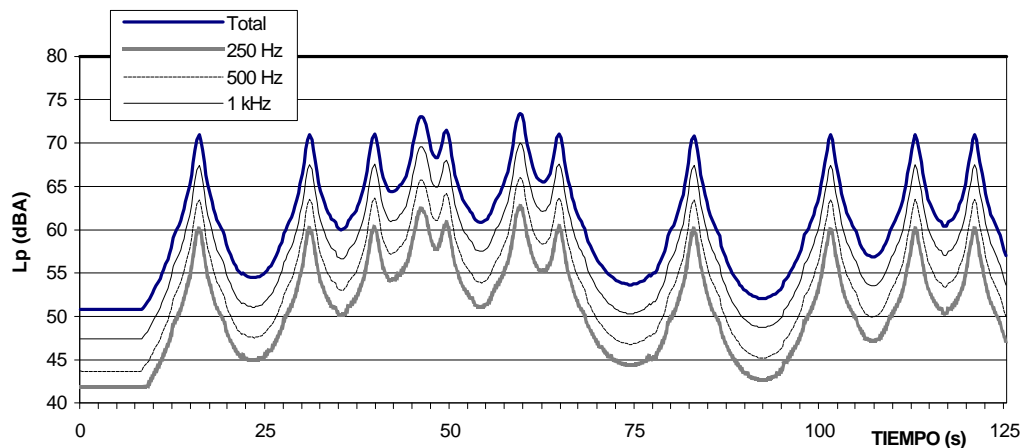
a)



b)

Figura 3. Evolución temporal del nivel de presión sonora en la localización de medida de la Avda. de Gijón, Lugones (datos en tabla 1); a) medición; b) predicción.

Para poder contrastar los resultados del modelo se realizaron ensayos consistentes en el registro temporal del nivel de presión sonora en varias calles, mediante un analizador Symphonie, de la casa 01dB. Las principales características de las calles objeto de ensayo se muestran en la tabla 1; se observa que en todos los casos el micrófono se situó sobre fachada y a una cierta altura (desde ventanas de viviendas). Para cada localización de medida se realizaron series de grabación cortas hasta completar registros de al menos 15 minutos, a la par que se tomaba nota manual de los vehículos circulantes durante ese periodo. En el caso de eventos ruidosos inusualmente elevados y ajenos al normal paso de los vehículos (como maniobras de aparcamiento, vehículos parados con el motor en marcha, ruido de actividades de construcción en zonas próximas, ladrido



de perros, etc.), la serie afectada era rechazada procediéndose pues a una nueva medida.

Tabla 1. Principales características de las calles con medidas de L_{EQ} , L_{10} y L_{90} .
H= altura de sonómetro sobre fachada.

Calle	Ancho (m)	Vías	H (m)	Q (veh./h)	v (km/h)	Observaciones
Marqués de S.Esteban	19.9	2	12	330	55	Aparcamiento a ambos lados, alero en fachada opuesta a sonómetro.
Magnus Blikstad (A)	14	1	5	940	25	Aparcamiento a ambos lados
Magnus Blikstad (B)	14	1	16	200	35	Aparcamiento en lado opuesto a sonómetro
Magnus Blikstad (C)	14	1	5	300	30	Aparcamiento a ambos lados
Ezcurdia	8.2	1	16	780	25	Aparcamiento en lado sonómetro
Avda.Gijón (Lugones)	25	2	15	292	75	Aparcamiento en lado opuesto a sonómetro

Tabla 2. Medidas y predicciones de los niveles L_{EQ} , L_{10} y L_{90} :

Calle	Medidas experimentales (dBA)			Predicciones (dBA)			
	L_{EQ}	L_{10}	L_{90}	L_{EQ}	L_{10}	L_{90}	
Marqués de San Esteban	L_{EQ}			L_{EQ}			
	Total	65.5	68.5	51.7	64.1	69.2	51
	250 Hz	52.6	54.6	39.6	54.3	59.4	40.0
	500 Hz	56.8	59.8	44.1	57.3	62.4	45
	1 kHz	60.6	64.1	46.6	59.3	64.4	47.5
	2 kHz	61.2	63.8	45.2	58.0	63.2	46
Magnus Blikstad (A)	L_{EQ}			L_{EQ}			
	Total	67.6	70.9	57.8	67.5	70.0	56.9
	250 Hz	55.3	58.5	45.0	57.5	60.1	46.7
	500 Hz	60.8	64.2	51.3	61.6	64.0	52.2
	1 kHz	63.0	66.2	52.8	62.7	65.2	52.3
	2 kHz	62.0	65.2	49.8	60.8	63.4	48.8
Magnus Blikstad (B)	L_{EQ}			L_{EQ}			
	Total	63.4	67.6	53.1	64.8	69.3	51.2
	250 Hz	51.4	54.8	40.0	53.7	58.3	40.1
	500 Hz	55.9	59.7	46.5	58.2	62.6	46.2
	1 kHz	59.2	63.1	48.1	58.7	63.3	46.2
	2 kHz	57.6	61.8	45.8	58.6	63.2	43.9
Magnus Blikstad (C)	L_{EQ}			L_{EQ}			
	Total	63.9	67.2	58.7	63.6	66.9	59.5
	250 Hz	53.0	55.6	45	52.1	55.8	45.7
	500 Hz	56.7	59.9	50.6	56.5	59.9	52.2
	1 kHz	59.8	62.6	54.4	59.3	62.5	55.6
	2 kHz	57.5	61.2	52.2	57.8	61	54.0
Ezcurdia	L_{EQ}			L_{EQ}			
	Total	64.4	68.2	55	65.3	67.9	54.9
	250 Hz	52.4	55.0	41.5	55.3	57.9	44.1
	500 Hz	56.0	59.3	46.8	58.6	61.2	48.7
	1 kHz	59.0	63.1	49.5	60.2	62.8	49.2
	2 kHz	59.1	62.8	49.1	59.1	61.8	48.7
Avenida de Gijón (Lugones)	L_{EQ}			L_{EQ}			
	Total	67.8	72.1	51.4	67.7	72.4	50.8
	250 Hz	53.4	57.3	40.1	56.2	61.8	41.9
	500 Hz	58.0	62.0	43.7	59.5	65.2	43.6
	1 kHz	65.1	69.6	47.5	64.2	69.1	47.4
	2 kHz	61.9	65.9	44.2	60.4	65.5	43.4

La figura 3.a muestra la típica evolución del ruido (para varias bandas de octava) recogida para la calle Avda. Gijón de Lugones (véase tabla 1), con un tráfico de unos 300 vehículos por hora y a lo largo de un periodo de 125 s. La figura 3.b por su parte muestra la correspondiente simulación del programa de cálculo para las mismas características geométricas y de tráfico de la calle, pero con inserción aleatoria de los vehículos durante el periodo de referencia. Entre ambas figuras se aprecian notables diferencias, por ejemplo en los valores máximos y mínimos alcanzados en algunas de las bandas de frecuencia, pero, como se deducirá a continuación, esos valores extremos no son suficientemente representativos de los índices L_{10} y L_{90} de interés en este estudio.

La tabla 2 presenta los datos experimentales del L_{EQ} , L_{10} y L_{90} obtenidos para cada localización de medida y para varias bandas de frecuencia, junto con las correspondientes predicciones teóricas del programa de cálculo. Se observa que, como se esperaba, las predicciones son particularmente ajustadas para el nivel de ruido equivalente, con errores menores de 2 dBA, pero de hecho también se predice a los índices L_{10} y L_{90} con errores bastante pequeños. Sólo para la banda de frecuencia más baja entre las consideradas (250 Hz) el error en las predicciones del L_{10} es mayor de 3 dBA para algunas de las calles ensayadas, pero, incluso para esos casos, el error en los valores de nivel total del L_{10} se mantiene notablemente pequeño. Estos resultados suponen pues una validación de las distintas hipótesis asumidas en el modelo y, en particular, justifican el empleo del método de rayos para la simulación de la evolución temporal de los campos sonoros en calles.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un programa de cálculo para PC, basado en el método de rayos acústicos, para la predicción del nivel de ruido equivalente L_{EQ} y en especial de los niveles L_{10} y L_{90} producidos por el tráfico de vehículos en vías urbanas, en las que acostumbra a existir una significativa reverberación sonora desde fachadas y pavimento. A fin de analizar la evolución del ruido a lo largo del tiempo en cualquier posición receptora, cada vehículo se consideró como una fuente monopolar móvil. Las predicciones obtenidas para calles con distintas características geométricas y de tráfico mostraron buen acuerdo al ser comparadas con las mediciones experimentales, por lo que puede considerarse que, a pesar de sus simplificaciones, esta metodología es adecuada para caracterizar las fluctuaciones temporales del ruido.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) a través del Proyecto AMB98-1051 titulado "Modelo de predicción de índices de ruido de tráfico urbano y aplicación a la ciudad de Gijón".

REFERENCIAS

- [1] J.L. Parrondo, C.A. Robles, J. Fernández, L. Alemany, C. Aguado, "Programa para el cálculo de ruido de tráfico urbano y la elaboración de mapas sonoros de la ciudad de Gijón", Tecniacústica 97, 33-36 (1997).
- [2] F. Fernández, J.L. Parrondo, S. Velarde, J. Fernández, "Simulation of vehicle traffic noise based on the acoustic ray method", Congresso Ibérico de Acústica 98, Lisboa (1998).
- [3] J. Lelong, L. Leclercq, "Steps towards a better evaluation of urban traffic noise", Proc. 6th int. cong. on Sound and Vibration (Lyngby, 1999), vol. 3, 1417-1424 (1999).
- [4] J.L. Parrondo, F. Fernández, J. Fernández, J. González, S. Velarde, "Prediction of noise indexes in urban streets with fluctuating vehicle traffic, based on the acoustic ray method", Proc. 6th int. cong. on Sound and Vibration (Lyngby, 1999), vol. 3, 1409-1416 (1999).
- [5] "Guide du Bruit des Transports Terrestres: Prévision des niveaux sonores". Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie, Ministère des Transports (1980).
- [6] Norma Francesa NF S.31 "Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement", (1985).
- [7] C.M. Harris (ed.), "Manual de medidas acústicas y control del ruido" (3^a ed.), McGraw-Hill (1995).