

## SIMULACIÓN DEL RUIDO DE TRÁFICO RODADO EN CRUCES URBANOS CON REGULACIÓN SEMAFÓRICA

Joaquín Fernández<sup>a</sup>, Rubén Zurita<sup>b</sup>, Jorge L Parrondo<sup>b</sup>,  
Juan Antonio Álvarez<sup>a</sup>, Conrado Ferrera<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura.

E-mail ffrancos@unex.es, tel 34 924 289 611. Avda de Elvas s/n, 06006-Badajoz (SPAIN)

<sup>b</sup>Escuela Politécnica de Ingeniería, Universidad de Oviedo.

E-mail parrondo@uniovi.es, tel 34 998 182 097. Campus de Gijón, 33204-Gijón (SPAIN)

### Resumen

Se ha desarrollado un programa de cálculo para explorar los efectos de la regulación semafórica sobre los niveles de presión sonora debido al tráfico de vehículos rodados en cruces urbanos o plazas. El algoritmo combina: i) un modelo de tráfico dinámico, con la circulación de vehículos controlados por semáforos, ii) un modelo de generación de ruido basado en el método de ingeniería Harmonoise de ruido de tráfico, y iii) un modelo de propagación del ruido adecuado para la representación del sonido reflejado desde cada contorno, que se basa en el método de imágenes virtuales. Las predicciones obtenidas en términos de niveles  $L_{Aeq}$  y  $L_{10}$  para cuatro intersecciones de calles reales con diferentes características geométricas y de tráfico han resultado satisfactorias al compararlas con los datos experimentales. Como una aplicación, el programa fue utilizado para investigar los efectos de los parámetros de semáforo (tiempo de ciclo y fracciones verde - rojo) en los niveles de ruido inducido en uno de los sitios reales probados, aguas arriba del semáforo principal. Los resultados revelan diferencias de hasta 5 dBA tanto en  $L_{Aeq}$  como en  $L_{10}$ , función de los parámetros de control del semáforo.

**Palabras-clave:** ruido de tráfico urbano, microsimulación de tráfico, regulación semafórica.

### Abstract

A special calculation program has been developed to explore the effects of traffic light regulation on the sound pressure levels due to vehicle traffic at urban sites with street junctions or squares. The algorithm combines: i) a dynamic traffic model, with vehicle circulation controlled by traffic lights, ii) a noise generation model based on the Harmonoise engineering method for traffic noise, and iii) a sound propagation model adequate for intersecting canyon-like streets, which is based on the virtual images method. The predictions obtained in terms of  $L_{Aeq}$  and  $L_{10}$  levels for four real street intersections with different geometrical and traffic characteristics proved to be satisfactory when comparing them with experimental data. As an application, the program was used to investigate the effects of the traffic light parameters (cycle period and green-red fractions) on the noise levels induced at one of those real sites tested, upstream the main traffic light. The results reveal differences up to 5 dBA in both  $L_{Aeq}$  and  $L_{10}$  depending on the light control parameters.

**Keywords:** urban traffic noise; traffic microsimulation, traffic light regulation.

**PACS no. xx.xx.Nn, xx.xx.Nn**

## 1 Introducción

La estimación teórica de los niveles de ruido ambiental en áreas urbanas se ha convertido en un elemento esencial como complemento a medidas de sonómetros para obtener mapas de ruido y para evaluar los efectos de cualquier modificación propuesta que esté relacionada con la producción o transmisión de ruido [1]. Los parámetros de uso más frecuente para la cuantificación del ruido, incluyendo el parámetro  $L_{DEN}$  definido en la Directiva Europea para la gestión de ruido ambiental [2], se basan en niveles de ruido equivalente ( $L_{Aeq}$ ) durante diferentes periodos. No obstante, para un valor dado de  $L_{Aeq}$ , la molestia ocasionada por ruido depende también de la variabilidad temporal [3] y, en particular, de los niveles de ruido máximos percibidos [4], más que del número de acontecimientos ruidosos [5]. Por lo general, esta variabilidad temporal se caracteriza por medio de niveles percentiles  $L_X$  (por ejemplo  $L_{10}$ ) [3].

El ruido debido al transporte sobre la superficie fluctúa inherentemente debido al movimiento relativo de vehículos con respecto a receptores en estado de reposo. En áreas urbanas, sucede que las intersecciones de calle tipo “cañón” son puntos particularmente ruidosos tanto de ruido máximo como de ruido equivalente. Esto se debe a que:

- Se añade ruido procedente de vehículos situados en diferentes carriles
- Existe un periodo grande de espera de los vehículos en los semáforos en rojo y, por tanto, aumenta el periodo de emisión.
- El cambio a verde de los semáforos provoca una aceleración de los coches y por tanto un aumento del ruido.

Evidentemente, la regulación de la red de semáforos, impone una modulación en el paso de vehículos a través de las intersecciones de las distintas calles. Esto afecta a la producción de ruido medio y máximo, es decir, a la percepción de molestia [6,7].

A finales de los setenta del siglo pasado se realizaron, por medio de simulaciones numéricas, los primeros intentos para predecir el ruido en lugares con vehículos parados por el tráfico. En estas simulaciones se acompañan las firmas acústicas debidas al paso de un solo vehículo por las posiciones de los receptores. Las firmas acústicas podían ser calculadas para casos de propagación en campo libre [8] o medidas a partir de modelos a escala para áreas urbanizadas [9]. Los progresos posteriores se centraron en la descripción estadística del flujo de vehículos y su correspondiente producción de ruido [10,11]. Yamaguchi et al. [12] sugirieron el ajuste a distintas funciones de densidad de la probabilidad del ruido producido durante cada periodo de un ciclo de semáforo para estimar los niveles de ruido  $L_{Aeq}$  y  $L_{50}$ . Makarewicz et al. [13] formularon un modelo analítico simplificado para predecir el ruido de tráfico ( $L_{Aeq}$ ) en los alrededores del punto de parada asumiendo una potencia sonora proporcional a la velocidad de los vehículos y a patrones de aceleración y deceleración. Posteriormente, el modelo se extendió al caso de cruces, incluyendo también otros efectos como el flujo de vehículos ligeros y pesados y la absorción por el terreno [14].

En general, la estimación de los parámetros de ruido variables requiere una simulación con una evolución de una jornada completa del escenario de ruido, con la dinámica del tráfico representada por modelos de leyes de conservación o por modelos de seguimiento de coches, siendo la base metodológica para muchos desarrollos recientes. Parrondo et al. [15] consideró el caso de calles tipo cañón con un paso arbitrario de vehículos, calculando la distribución temporal del nivel de presión sonora mediante un método de trazas de rayos. Las predicciones resultantes de  $L_{10}$  y  $L_{Aeq}$  para varias configuraciones geométricas y de tráfico, comparadas con las medidas, tuvieron un error inferior a 2 dBA. Leclercq y Lelong [16,17] aplicaron un modelo para tráfico dinámico (representado como el flujo de un fluido compresible a través de la red de carreteras) con niveles de emisión sonora dependientes de la velocidad y la aceleración [18]. Obtuvieron

una descripción razonable de la variación temporal del ruido en el área cercana a un semáforo para una carretera con un tráfico de diferentes características, aunque no proporcionaron resultados acerca de los niveles percentiles de ruido. De Coensel et al. [19] combinó un simulador de tráfico dinámico en carreteras con un modelo de propagación de ruido basado en un método de trazado de haces en 2.5D, es decir, la transmisión de ruido para cada par emisor-receptor se analiza separadamente en planos vertical y horizontal. La potencia sonora se asignó a cada vehículo dependiendo de su clase y velocidad, utilizando la base de datos Nord 2000. Exploraron la aplicación del modelo para simular el paisaje sonoro de un área urbana, obteniendo una concordancia satisfactoria entre las predicciones en la distribución cumulativa de niveles sonoros ( $L_{Aeq, 1s}$ ) en seis puntos en el área y las medidas de sonómetros en dichos puntos. Este modelo se utilizó también para producir mapas de ruido dinámicos en las intersecciones con regulación por semáforos.

La microsimulación de tráfico dinámico para estimar la evolución de ruido en cruces fue también utilizada por van Leuwen [20], quién estudió el efecto de la parada de vehículos en un cruce, De Coensel et al. [21] propusieron estimar el ruido en cruces a partir de modelos de tráfico macroscópico y correcciones en el ruido del vehículo, y Chevalier et al. [22] compararon cruces y rotondas. Recientemente, Can et al. [23,24] han desarrollado estudios sobre la influencia de distintas representaciones de tráfico y de fuentes de ruido para estimar  $L_{Aeq}$  y los niveles percentiles, Can et al. [25] han analizado la evolución del espectro de ruido en un corredor urbano y De Coensel et al. [26] los efectos de la coordinación de señales luminosas a través de una carretera principal.

Siguiendo esta línea de investigación, este trabajo presenta un modelo para simular tanto la distribución espacial como la temporal de niveles de presión sonora provocados por el tráfico rodado, con especial interés en los cruces entre calles. En este modelo, las condiciones de tráfico instantáneas determinan el movimiento dinámico de cada vehículo, que se considera como un número de puntos-fuente cuyas propiedades de potencia espectral sonora y directividad son las recomendadas por el método de ingeniería Harmonoise [27]. El cálculo de propagación sonora se basa en el método de imágenes virtuales, con un algoritmo 2.5D, donde la posición de las fuentes en imágenes consecutivas se reduce a un plano horizontal. Las predicciones y los datos experimentales se muestran en valores de  $L_{Aeq}$  y  $L_{10}$  correspondientes a un número de cruces entre calles con diferente tráfico y geometría. Finalmente, también se analiza el efecto de la regulación de los semáforos en los niveles de ruido para los sitios examinados.

## 2 METODOLOGÍA

Dado el objetivo de este estudio, la distribución espacial de la presión sonora se va a obtener para instantes consecutivos de tiempo, es decir, para diferentes posiciones de cada uno de los vehículos en circulación, lo que implica una carga de cálculo enorme. Para poder combinar un modelo simple con una descripción razonable de las características físicas, se asume que el dominio geométrico está definido por varios conjuntos de edificios y bloques con fachadas altas y planas, es decir, sin balcones ni aleros. De ahí que no haya reflexiones hacia abajo, dispersión en la fachada ni difracción sobre la parte superior de los bloques. Además se excluye la refracción. Aunque estas consideraciones pueden limitar la fiabilidad de las predicciones obtenidas para un lugar real, no deberían afectar al análisis del aumento o la disminución en el ruido cuando se modifican parámetros de circulación del tráfico, como se pretende en este estudio. Los vehículos pueden moverse a través de diferentes caminos preestablecidos en el terreno. No se tienen en cuenta cambios de frecuencia por efecto Doppler ni el apantallamiento debido a otros vehículos en circulación.

Las indicaciones del método de ingeniería Harmonoise para el ruido por tráfico rodado [27] se consideran adecuadas para simular el nivel de emisión instantánea de los vehículos en función de la velocidad y la aceleración [20]. Se asume que cada uno de los vehículos que está circulando radia ruido

desde dos puntos situados a dos alturas sobre el suelo: 0.01 m y 0.30 m para vehículos ligeros y 0.01 m y 0.75 m para el resto. Cada fuente tiene un nivel de presión sonora que es una combinación ponderada entre el ruido procedente de la rodadura de neumáticos y el motor. La referencia [27] recopila datos para establecer la distribución espacial del nivel de potencia sonora tanto para el ruido procedente de los neumáticos como el de los motores de tracción en función del tipo de vehículo, velocidad, aceleración, superficie de la carretera y pendiente. Además se proporcionan correlaciones entre las correcciones tanto para directividad horizontal como vertical [27].

Cada vehículo está caracterizado por cuatro fuentes de ruido, dos en cada extremo del eje longitudinal del vehículo (Fig. 1). El ruido procedente de la rodadura de neumáticos se distribuye entre las cuatro fuentes mientras que el del motor se asigna al par de fuentes situadas en la parte frontal del vehículo. Esta aproximación es bastante diferente a otros procedimientos más comunes, en los que el tráfico se separa en fuentes lineales asociadas a un número variable de vehículos dependiendo de la densidad local de tráfico [23,24]. Sin embargo, la asignación de fuentes a cada vehículo es práctica para reproducir la dinámica de ruido asociada al movimiento de cada vehículo y, además, permite una mejor estimación del sonido en campos relativamente complejos, como los cruces, especialmente a distancias cortas sobre el pavimento, donde el ruido provocado por el tráfico es máximo.

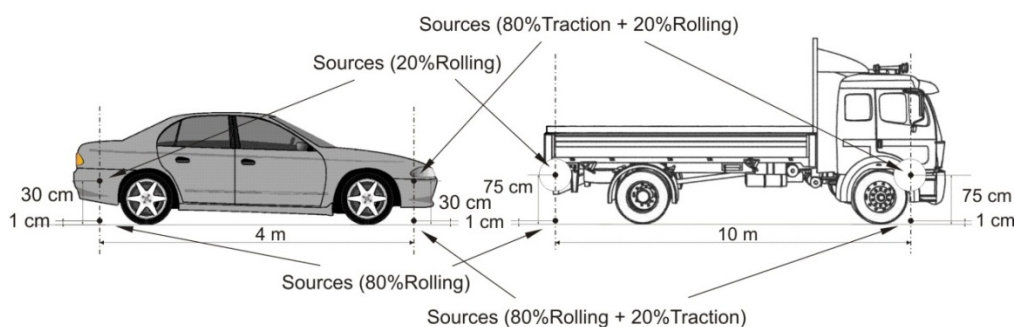


Figura 1. Localización de los puntos de emisión para vehículos ligeros y pesados

En el dominio considerado, la propagación del ruido originada por cada fuente en el vehículo, cuando está localizada en una posición determinada, depende de la reflexión sonora en las fachadas de los edificios y en el terreno, la difracción en las esquinas de los edificios y la absorción debida al aire. Para modelar estos fenómenos de transmisión, se desarrolló un algoritmo basado en el método de imágenes virtuales, simplificando el proceso de generación de imágenes virtuales a un análisis bidimensional en un único plano horizontal, cuyas fuentes y receptores son proyectadas verticalmente y los edificios son simplificados en polígonos. Los cálculos se realizan en tres pasos:

- 1º) Se asigna un valor de referencia de la potencia sonora para cada banda de frecuencia (tercios de octava) a los dos tipos de fuentes puntuales que simulan cada vehículo. A continuación, se genera un vector fuente a partir de las fuentes primarias. Para una fuente dada, el algoritmo explora la exposición sonora relativa de cada polígono (es decir, cada fachada de cada edificio). Para el caso de verificación de exposición directa, se añade una nueva fuente virtual al vector, que incluye:
  - posición y sentido del movimiento si se considera simetría óptica con respecto a la fachada,
  - potencia sonora corregida por absorción en las fachadas, y
  - ventana de emisión, es decir, el segmento del lado del polígono sujeto a exposición directa de la fuente principal (Fig. 2).

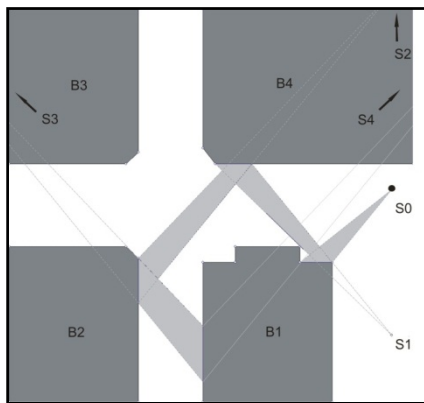


Figura 2. Generación de imagen virtual desde una fuente real 'S0' en un dominio con cuatro edificios

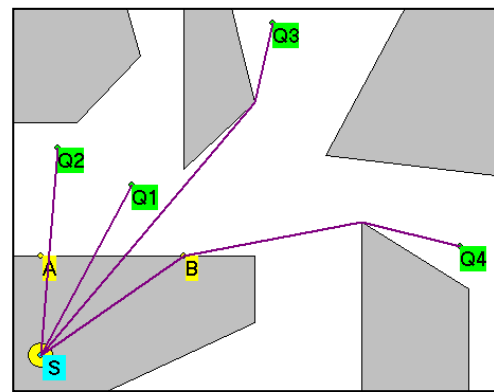


Figura 3. Tipos de exposición a una fuente S: exposición directa (Q1), zona brillante (Q2), difracción (Q3) y difracción múltiple (Q4).

2º) Las características de exposición de cada posición del receptor y cada una de las fuentes en el vector fuente, bien sea real o virtual, se analizan desde el plano horizontal de referencia. Este análisis se basa en la derivación de la polilínea más corta que conecta la fuente y el receptor sin cruzar edificios. Los casos posibles son (Fig. 3): exposición directa como en campo libre, zona de brillo de una esquina (es decir, número de Fresnel negativo), difracción simple en una esquina, difracción múltiple (en dos o más esquinas) y sin exposición [27].

3º) La contribución de cada fuente al nivel de presión sonora en el receptor se calcula por separado para cada banda de tercio de octava. Este cálculo se realiza, dependiendo del tipo de exposición, después de corregir las distancias relevantes con la diferencia en altura entre el receptor y la fuente sonora real, para obtener distancias 3-D. La potencia sonora de referencia de la fuente también debe corregirse para incluir el efecto de la absorción por el aire, y, especialmente, el efecto de los patrones de directividad horizontal y vertical, que dependen de la posición relativa del receptor con respecto a la fuente y a la dirección de su movimiento. De hecho, este cálculo de la contribución de la presión sonora para cada par fuente-receptor se debe realizar dos veces: una sin tener en cuenta la reflexión sobre el terreno y otra considerándola asumiendo una fuente imagen por debajo del nivel del terreno.

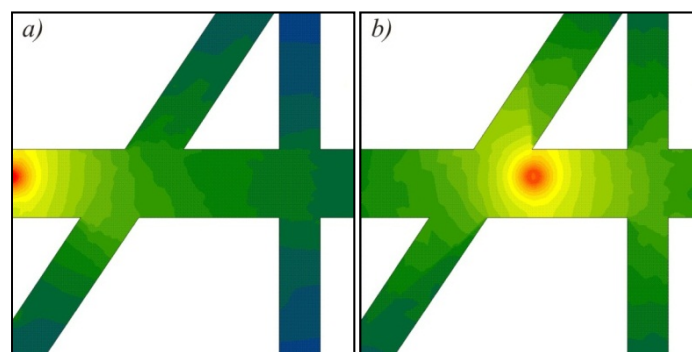


Figura 4. Ejemplos precalculados en  $z=1$  m: a) fuente en posición (0,0),  $z=0.01$  m,  $f=50$  Hz; b) fuente en posición (2,2),  $z=0.30$  m,  $f=6.3$  kHz

Los valores finales para la presión sonora de cada tercio de octava en cada receptor se obtienen añadiendo las contribuciones de cada fuente. Finalmente, el espectro de presión sonora calculado para todos los receptores se almacena en ficheros de datos previos al cálculo. Concretamente, uno para cada posición

particular de la fuente primaria utilizada en los cálculos. En la Fig. 4 se presentan los resultados obtenidos para la distribución espacial de ruido en un lugar de estudio determinado, tanto para bandas de baja como de alta frecuencia, mostrando que el efecto de la difracción detrás de las esquinas posee una magnitud muy diferente.

El algoritmo incorpora un modelo de tráfico que simula el movimiento de cada vehículo con respecto al tiempo. Las características básicas de este modelo son:

- Los vehículos circulan a través de rutas preestablecidas en el dominio, compuestas por varios segmentos consecutivos, los cuales pueden pertenecer simultáneamente a rutas diferentes, de forma que los vehículos que se aproximan a un cruce pueden continuar rectos o cambiar de dirección. Las calles tienen varios carriles paralelos, representados por rutas diferentes. Cada ruta se asocia a un flujo de vehículos y a una velocidad nominal, para cada tipo de vehículo. Cada segmento se asocia a una pendiente y a un tipo de pavimento.
- Existen semáforos con periodos predefinidos de verde y rojo que regulan el paso de vehículos a través de los segmentos de las rutas (normalmente en los cruces).
- Los vehículos se introducen paulatinamente en las rutas a ritmo constante o de modo aleatorio (función de densidad de probabilidad uniforme), con un valor de probabilidad acorde al flujo de vehículos. A cada vehículo nuevo se le asigna una velocidad de referencia que se obtiene combinando la velocidad nominal de la ruta con una fluctuación aleatoria.
- La posición, velocidad y aceleración de cada vehículo se actualiza continuamente dependiendo de la localización relativa de los otros vehículos y del estado de los semáforos. Además de la señal roja, que provoca la formación de colas, las restricciones del movimiento de los vehículos incluyen una distancia de separación mínima entre vehículos consecutivos (dependiendo de la velocidad del vehículo), unos valores de aceleración máximos o el bloqueo de la ruta debido a un atasco en otra ruta que la cruce.

Los cálculos para obtener la evolución de los niveles de presión sonora en el dominio se realizan en dos pasos separados. Primero se realiza una serie de cálculos previos de acuerdo con el siguiente proceso:

- En cada segmento de la ruta se selecciona un número de nodos equiespaciados.
- Para cada nodo y banda de frecuencia, se calcula la distribución de presión sonora asumiendo una potencia sonora de referencia en la posición del nodo. Este paso se repite tres veces, para cada una de las alturas de las fuentes que representan la emisión sonora de los vehículos (Fig. 1).
- Los resultados obtenidos en cada nodo y para cada altura se almacenan en ficheros independientes de cálculos previos.

Segundo, comienza el procedimiento para simular el movimiento de vehículos. Se deja que el tráfico evolucione durante un cierto periodo para que alcance un régimen regular. A continuación, se ejecuta la siguiente secuencia en intervalos de tiempo constantes:

- La posición, velocidad y aceleración instantáneas de cada vehículo presente en el dominio de estudio se utilizan para determinar la potencia sonora correspondiente a sus fuentes primarias [27].
- Para cada una de las fuentes primarias en cada vehículo, se compara la posición actualizada con los nodos de la misma sección para los que haya cálculos previos disponibles. Se abren los ficheros de cálculos previos asociados a los dos nodos más cercanos a la posición del vehículo fuente y se obtiene la presión sonora en cada receptor y para cada banda de frecuencia mediante interpolación lineal entre los valores correspondientes en los dos ficheros de cálculos previos. Los valores de presión sonora resultantes se multiplican por el cociente entre la potencia sonora de la fuente primaria del vehículo con la potencia sonora de referencia.

- Los valores de la presión sonora global en cada receptor y para cada banda de frecuencia, en el instante de tiempo considerado, se obtienen sumando cada una de las contribuciones de las fuentes primarias de todos los vehículos en el dominio, almacenándose en un fichero de datos específico las distribuciones espectrales de ruido y la presión total resultante (Fig. 5).

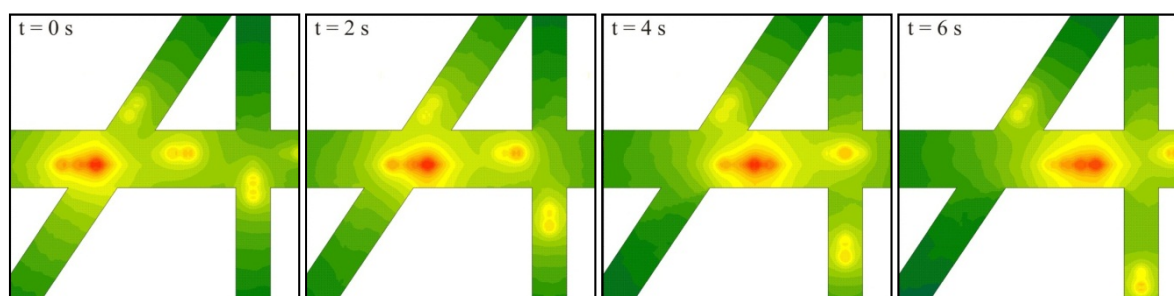


Figura 5. Nivel de presión sonora (dB(A) en diferentes incrementos de tiempo ( $z=1$  m)

Después de un periodo de simulación suficientemente largo, se disponen de datos de ruido para un receptor dado y, a partir de estos, se pueden calcular los niveles de ruido equivalente  $L_{Aeq}$  y estadísticos  $L_x$ .

Tabla 1. Datos de tráfico general y del ciclo de semáforos para las intersecciones examinadas

Intersección	Calle	Veh/h	Datos de tráfico general				Ciclo de semáforo	
			% Veh Pesados	Vref (km/h)	Carriles	Pen (%)	Ciclo (s)	Verde(s)
a) Avda Costa-Felipe V	Avda Costa	840	7.0	40	2	0	125	80
	FelipeV	24	0	30	1	0	-	-
b) Feijoo - Suárez Valdés	Feijoo	650	0	40	3	3	110	47
	Suárez Valdés	460	3.3	40	2	3	110	57
c) M. Llaneza-Palencia	M. Llaneza	1855	0	40	3	3	110	63
	Palencia	142	0	30	1	4	110	39
	Juan XXIII <sup>(1)</sup>	-	-	-	-	-	-	-
d) M. Llaneza-Schultz	M. Llaneza	890	4.3	40	2	0	95	55
	Schultz <sup>(2)</sup>	38	50.0	45	2	0	95	34
	Electra	76	0	30	1	0	95	28

<sup>(1)</sup> Calle peatonal, <sup>(2)</sup> Calle con tráfico en ambos sentidos

### 3 RESULTADOS NUMÉRICOS Y CONTRASTE EXPERIMENTAL

De acuerdo a los modelos descritos en la sección precedente, se desarrolló un programa para simular la evolución de la presión sonora en los cruces entre calles. En primer lugar se aplicó a cuatro sitios regulados por semáforos en la ciudad de Gijón (España), con geometría diferente (Fig. 6) y condiciones de tráfico resumidas en la tabla 1. Las figuras 7 y 8 muestran las predicciones de  $L_{Aeq}$  y  $L_{10}$  para estos cuatro lugares. En cada caso, los valores más altos de ruido, parecen corresponder a la proximidad de semáforos en las calles con alta densidad de tráfico. En particular, en la sección de las calles donde los vehículos parecen acelerar tras una parada por semáforo en rojo. Esto es algo esperable en términos tanto de  $L_{10}$  como de  $L_{Aeq}$ , ya que la velocidad media de los vehículos en un entorno urbano es lo suficientemente pequeña para que predomine el ruido procedente del motor.



Figura 6. Lugares de test con indicación de la posición de los semáforos y de la dirección del tráfico. 'M'= posiciones de medida; 'R'= posición de referencia (sección 4)

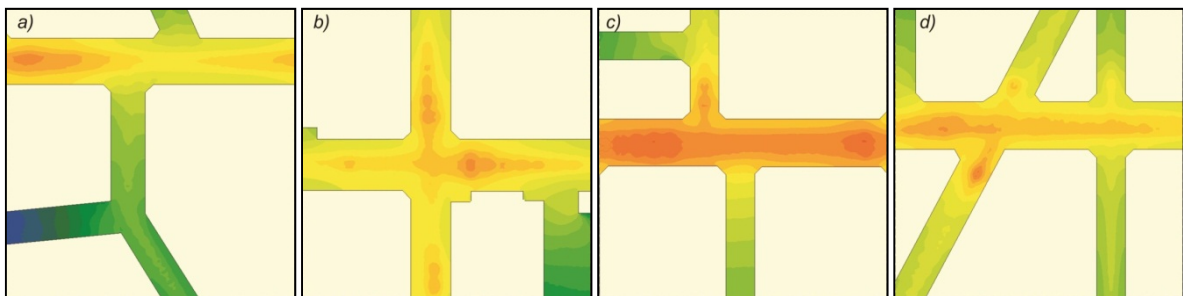


Figura 7. Predicción del  $L_{Aeq}$  para los cuatro lugares examinados

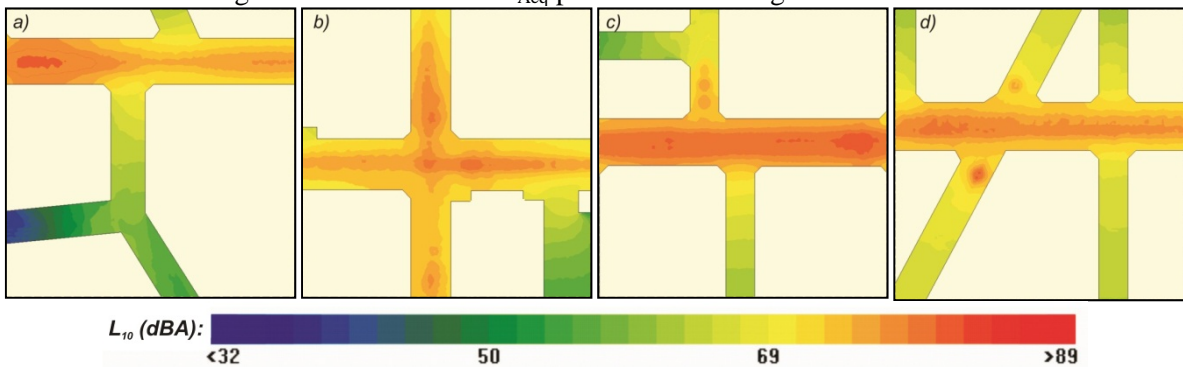


Figura 8. Predicción de  $L_{10}$  para los cuatro lugares examinados

Las medidas experimentales se tomaron utilizando un analizador 01dB Symphonie, situado en un lugar concreto para cada uno de los cuatro sitios (etiquetado como 'M' en los mapas de la Fig. 6). Las figuras 9 y 10 comparan las distribuciones espectrales de  $L_{Aeq}$  y  $L_{10}$  medidas con respecto a los valores predichos por el programa de simulación. Se puede ver que las predicciones son superiores para el rango de 80-200 Hz y, para todo el rango de frecuencias altas (2 kHz y superior). Con respecto a las frecuencias medias (desde 250 Hz hasta 1 kHz), son bajas (1-3 dB). A pesar de esto, la forma general del espectro simulado reproduce razonablemente bien la forma de las medidas.

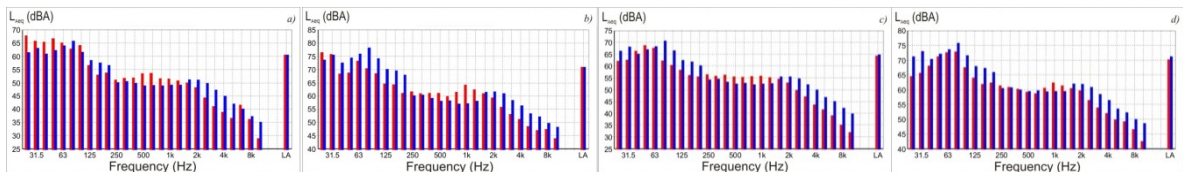




Figura 9. Espectro experimental y calculado  $L_{Aeq}$  (dB) en la posición ‘M’ (fig. 6) para lugares desde a) hasta d). LA=nivel total de ruido (dBA). ■ Experimental. ■ Predicho

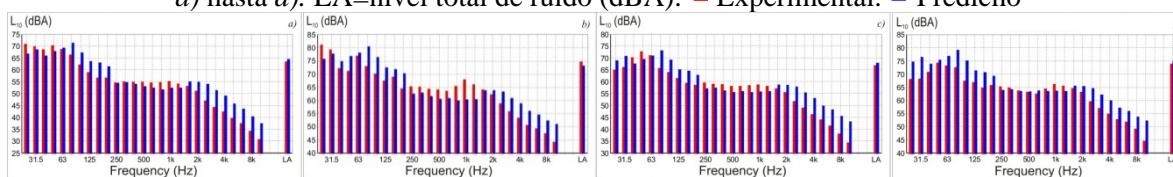


Figura 10. Espectro experimental y calculado  $L_{10}$  (dB) en la posición ‘M’ (fig. 6) para lugares desde a) hasta d). LA=nivel total de ruido (dBA). ■ Experimental. ■ Predicho

Por otro lado, las diferencias entre las medidas y las predicciones, si se tienen en cuenta los valores totales de ruido (tabla 2), son más bien pequeñas: el error máximo en  $L_{Aeq}$  es 1 dBA para el lugar ‘d’ y el error máximo en  $L_{10}$  es 1.6 dBA para el lugar ‘b’. Incluso se pueden considerar aceptables los errores en la predicción para  $L_{50}$ , con menos de 3 dBA excepto para el caso ‘b’. El incremento en la incertidumbre cuando se predicen niveles percentiles para ruido bajo es esperable ya que los niveles de ruido cercanos al ruido de fondo pueden estar influenciados por otros factores, como, la presencia de otras fuentes distintas al tráfico rodado, las distorsiones geométricas que se acumulan cuando se calcula la propagación de ruido a largas distancias en el modelo, o el ritmo de entrada de vehículos en el dominio modelado. Además, debe notarse que, contrariamente a lo que ocurre en sitios reales, la entrada de vehículos en la región modelada no está sujeta a las modulaciones inducidas por un sistema de semáforos externo. A pesar de que el modelo trabaja como una isla, las predicciones tanto de  $L_{10}$  como de  $L_{Aeq}$  son satisfactorias.

Tabla 2. Medidas y predicciones del nivel de ruido para varias intersecciones

Intersección	Medidas (dBA)			Cálculos (dBA)		
	$L_{Aeq}$	$L_{10}$	$L_{50}$	$L_{Aeq}$	$L_{10}$	$L_{50}$
a) Costa-Felipe V	60.6	63.8	58.1	60.6	64.5	56.9
b) Feijoo-Suárez Valdés	70.9	74.6	65.3	71.0	73.0	70.1
c) M. Llaneza-Palencia	64.4	67.0	62.9	64.8	67.9	63.2
d) M. Llaneza-Schultz	70.2	73.9	65.7	71.2	74.9	68.3

Para concluir esta comprobación experimental, se puede considerar que las predicciones del programa de simulación desarrollado son lo suficientemente precisas como para explorar los efectos de los semáforos en el ruido inducido en los cruces a partir de la comparación de los niveles  $L_{Aeq}$  y  $L_{10}$  para esquemas de regulación diferentes. Un ejemplo de esta aplicación se muestra en la próxima sección.

## 4 EFECTO DE LA REGULACIÓN POR SEMÁFOROS

El programa de simulación descrito se utilizó para investigar los efectos de la regulación de los semáforos en la intersección entre las calles Feijoo-Suárez Valdés, que es el lugar ‘b’ en la figura 6. Es un cruce relativamente simple entre dos calles perpendiculares. Se llevaron a cabo una serie de simulaciones bajo variaciones sistemáticas del ciclo del semáforo (desde 30 s a 210 s) y para fracciones de verde-rojo. En todos los casos, se impuso un retardo de dos segundos cada vez que las luces rojas pasaban a verdes. Otros parámetros del tráfico, como la densidad y velocidad de los vehículos, se impusieron teniendo en cuenta datos generales de tráfico bajo las condiciones reales mostradas en la tabla 1. La entrada de vehículos en las dos calles del dominio se realizó a ritmo constante, es decir, que no hubo modulación previa asociada a semáforos. Para cada caso, se dejó al sistema evolucionar durante varios ciclos (al menos durante cuatro minutos), mientras se calculaban los niveles de ruido. El resultado fueron los niveles

$L_{Aeq}$  y  $L_{10}$  en la posición de referencia etiquetada con ‘R’ en la Fig. 6, que está en el margen derecho, 25 m delante del semáforo de la calle Feijoo (próxima a la posición de medida ‘M’). Por tanto, la posición ‘R’ se puede considerar representativa de las secciones de calle donde los vehículos se acumulan antes de un semáforo en rojo. Las predicciones obtenidas se muestran en las Fig. 11 y 12. En estos diagramas, el parámetro de la fracción de verde se refiere a la calle Feijoo. El rango de la fracción de verde compatible con las densidades de tráfico a través de ambas calles varía desde el 20% al 75%.

La figura 12 muestra que el nivel  $L_{Aeq}$  en ‘R’ aumenta cuando aumenta el ciclo del periodo y cuando disminuye la fracción de verde. Esto se debe a que para estas dos acciones provocan colas mayores que cuando el semáforo en la calle Feijoo está en rojo, por lo que hay más vehículos en línea parados cerca de la posición ‘R’ y, lo que es más importante, hay más vehículos que pasan por ‘R’ acelerando cuando el semáforo cambia a verde. La diferencia entre los valores máximo y mínimo es de 5 dBA.

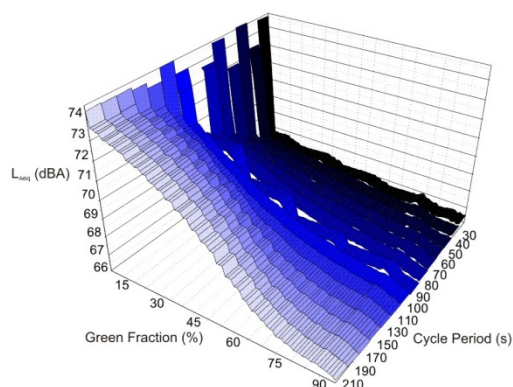


Figura 12.  $L_{Aeq}$  (dBA) estimado en la posición de referencia ‘R’ (Figure 6, lugar *b*) en función del periodo de duración del ciclo del semáforo y de la fracción de verde (ligero en la calle Feijoo)

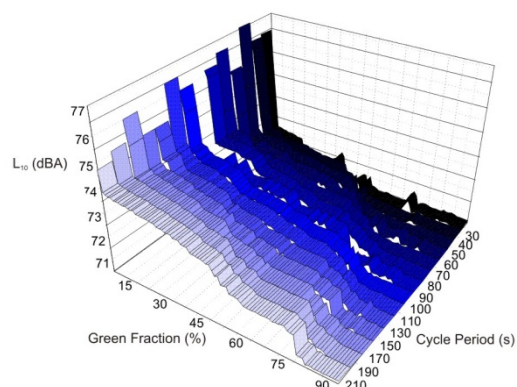


Figura 13.  $L_{10}$  (dBA) estimado en la posición de referencia ‘R’ (Figure 6, lugar *b*) en función del periodo de duración del ciclo del semáforo y de la fracción de verde (ligero en la calle Feijoo)

La figura 13 muestra una estructura bastante similar para el nivel  $L_{10}$ , excepto que, para el rango bajo de la fracción de verdes, el  $L_{10}$  nivel verde se vuelve máximo en periodos de ciclo sobre 110 s. Este máximo es sobre 5.5 dBA mayor que los valores correspondientes a fracciones de verde grandes, para las que  $L_{10}$  es mínimo sin tener en cuenta el periodo del ciclo. El motivo de este comportamiento es el que se describe a continuación. Para grandes periodos de ciclo con pequeñas fracciones de verde, la cola de los vehículos parados sobrepasa la posición ‘R’. Los valores máximos de  $L_{10}$  en ‘R’ se pueden atribuir a que los vehículos pararon ligeramente antes de la posición ‘R’, porque con luz verde pasan por ‘R’ a baja velocidad pero acelerando, es decir, inducen un valor de ruido alto durante un intervalo de tiempo lo suficientemente largo para determinar el nivel  $L_{10}$ . Bajo densidad de tráfico constante, periodos de ciclo más largos proporcionan colas más largas pero también pocas colas por hora. Por este motivo, la fracción de vehículos que comienza a acelerar delante de ‘R’ se reduce y de ahí que el nivel  $L_{10}$  baje.

Como conclusión, para mantener niveles de ruido relativamente bajo en términos de los niveles  $L_{Aeq}$  y  $L_{10}$  en las secciones de calle anteriores a semáforos, las colas de los vehículos deberían ser cortas. Esto implica que: i) las fracciones de verde-rojo deberían asignarse proporcionalmente a la densidad de tráfico por carril en las calles que se cruzan; y ii) el periodo del ciclo de los semáforos debería ser tan corto como se pueda en función de otros requisitos como el cruce de peatones o el acoplamiento de la red de tráfico. El primero es una práctica común en la regulación de los semáforos, porque de otra forma el número actual de vehículos no alcanzaría una densidad de tráfico específica. Sin embargo, intentar reducir el periodo del ciclo no es una prioridad normal, ya que, provoca una mayor importancia relativa de los retardos de

seguridad con todas las luces en rojo que preceden a cada cambio a verde, de forma que la densidad máxima del tráfico en el cruce sea menor. Casualmente, el periodo del ciclo entre medidas en el cruce examinado fue de 110 s y la fracción de verde en la calle Feijoo fue de un 43% (Tabla 2), lo que prácticamente coincide con las condiciones más ruidosas para la posición de referencia 'R'.

## 5 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un programa especial de cálculo para simular la evolución temporal de los niveles de presión sonora debidos al tráfico de vehículos en zonas urbanas con intersecciones o plazas. Se pretende que este programa explore los efectos de la regulación del tráfico ligero en los niveles de ruido medio y percentiles. El algoritmo combina un modelo de microsimulación de tráfico, con la circulación de tráfico controlada por semáforos, un modelo de generación de ruido basado en el método de ingeniería Harmonoise para ruido de tráfico y un modelo de propagación de sonido adecuado para calles canyon-like, que se basa en generación virtual de imágenes.

Las predicciones de este software con respecto a  $L_{Aeq}$  y  $L_{10}$  en cuatro puntos reales pudieron ser contrastadas, con éxito, con datos procedentes de medidas con sonómetro. Además, los calculos reprodujeron, razonablemente bien, la estructura del espectro de presión sonora medido, aunque, especialmente a altas frecuencias, se observaron algunas variaciones sistemáticas. A continuación, el programa fue utilizado para investigar los efectos del ciclo del semáforo y las fracciones de verde en el ruido inducido en uno de los puntos de test situado delante del principal semáforo. Los resultados muestran como los niveles máximos instantáneos se asocian a vehículos que aceleran después de un cambio a luz verde. En este punto, el  $L_{Aeq}$  siempre aumenta para ciclos periódicos mayores y para fracciones reducidas de verde, con diferencias de hasta 5 dBA entre los valores máximo y mínimo. El  $L_{10}$  se comporta de un modo similar, aunque los valores máximos de ruido parecen corresponder a un ciclo de tiempo intermedio.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del Gobierno de Extremadura y FEDER mediante el proyecto GR10047 y también del Ministerio de Ciencia e Innovación mediante el proyecto DPI 2010-21103-C04-04.

## Referencias

- [1] I. Wilmink, P. Goodman, M. Bell, E. Versteegt, The role of ITS in noise mapping and noise action planning, in 5th European Congress and Exhibition on ITS, Hannover, Germany, 1-3 June 2005.
- [2] Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002, relating to the assessment and management of environmental noise, Off. J. Eur. Commun., L189/12 of 18 Jul 2002.
- [3] C. Marquis-Favre, E. Premat, D. Aubree, M. Vallet, Noise and its effects. a review on qualitative aspects of sound. Part II: Noise and annoyance, Acta Acust. united Ac. 91 (2005) 626–642.
- [4] T. Sato, T. Yano, M. Bjorkman, R. Rylander, Road traffic noise annoyance in relation to average noise level, number of events and maximum noise level, J. Sound Vib. 223 (1999) 775–784.
- [5] N.J. Versfeld, J. Vos, A-weighted equivalent sound level as predictor of the annoyance caused by road traffic consisting of various proportions of light and heavy vehicles, J. Sound Vib. 253 (2002) 389–399.
- [6] R.R.K. Jones, D.M. Waters, Traffic noise annoyance near light controlled intersections, Appl. Acoust. 14 (1981) 7–13.

- [7] L. Nijs, The increase and decrease of traffic noise levels at intersections measured with a moving microphone, *J. Sound Vib.* 131 (1989) 127–141.
- [8] B. Favre, Noise at the approach to traffic lights: result of a simulations programme, *J. Sound Vib.* 58 (1978) 563–578.
- [9] L.J.M. Jacobs, L. Nijs, J.J. Van Willigenburg, A computer model to predict traffic noise in urban situations under free flow and traffic light conditions, *J. Sound Vib.* 72 (1980) 523–537.
- [10] M. Ohta, Y. Mitani, A prediction method for road traffic noise generated from arbitrary non-Poisson type traffic flow based on an approach equivalent to that for a standard Poisson type traffic flow, *J. Sound Vib.* 118 (1987) 11–21.
- [11] S. Yamaguchi, Y. Kato, A prediction method of non-stationary road traffic noise based on fluctuation patterns of an average number of flowing vehicles, *Appl. Acoust.* 27 (1989) 103–118.
- [12] S. Yamaguchi, Y. Kato, S. Ishihara, A fundamental consideration on evaluating noise produced by road traffic controlled by traffic signals. *Appl. Acoust.* 42 (1994) 55–73.
- [13] R. Makarewicz, M. Fujimoto, P. Kokowski, A model of interrupted road traffic noise, *Appl. Acoust.* 57 (1999) 129–137.
- [14] R. Makarewicz, Noise from a road intersection, *Acta Acust. united Ac.* 89 (2003) 844–847.
- [15] 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, in *Proc. Sixth Int. Cong. on Sound and Vibration*, Lingby, Denmark, 1999, vol. 6, pp. 1409–1416.
- [16] L. Leclercq, J. Lelong, Dynamic evaluation of urban traffic noise, in *Proc. 17<sup>th</sup> Int. Cong. of Acoustics*, Rome, Italy, 2001.
- [17] L. Leclercq, *Modelisation dynamique du trafic et applications a l'estimation du bruit routier*, Doctoral Thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2002.
- [18] J. Lelong, M.C. Berengier, Noise radiated by vehicles moving in urban areas, in *Proc. 17<sup>th</sup> Int. Cong. of Acoustics*, Rome, Italy, 2001.
- [19] B. De Coensel, T. De Muer, I. Yperman, D. Botteldooren, The influence of traffic flow dynamics on urban soundscapes, *Appl. Acoust.* 66 (2005) 175–194.
- [20] H.J.A. van Leeuwen, Road traffic noise in urban areas—annoyance and reduction measures, in *Proc. Int. Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*, Inter Noise 2006, Honolulu, USA, 3-6 December 2006.
- [21] B. De Coensel, D. Botteldooren, F. Vanhove, S. Logghe, Microsimulation based corrections on the road traffic noise emission near intersections, *Acta Acust. united Ac.* 93 (2007) 241–252.
- [22] E. Chevalier, A. Can, M. Nadjji, L. Leclercq, Improving noise assessment at intersections by modelling traffic dynamics, *Transport. Res. D-Tr. E.* 14 (2009) 100–110.
- [23] A. Can, L. Leclercq, J. Lelong, Dynamic estimation of urban traffic noise: influence of traffic and noise source representations, *Appl. Acoust.* 69 (2008) 858–867.
- [24] A. Can, L. Leclercq, J. Lelong, Selecting noise source and traffic representations that capture road traffic noise dynamics near traffic signals, *Acta Acust. united Ac.* 95 (2009), 259–269.
- [25] A. Can, L. Leclercq, J. Lelong, D. Botteldooren, Traffic noise spectrum analysis: Dynamic modeling vs. experimental observations, *Appl. Acoust.* 71 (2010) 764–770.
- [26] B. De Coensel, A. Can, B. Degraeuwe, I. De Vlieger, D. Botteldooren, Effects of traffic signal coordination on noise and air pollutant emissions, *Environ. Modell. Softw.* 35 (2012) 74–83.
- [27] Harmonoise project, work package WP3, Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning, Technical Report HAR32TR-040922-DGMR20, Deliverable 18. 2005.