



## LA INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN IN SITU DE BARRERAS ACÚSTICAS MEDIANTE RUIDO DE TRÁFICO<sup>1</sup>

pacs: 43.50.Yw

Alfonso Rodríguez Molares, Manuel A. Sobreira Seoane  
Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Grupo Sonitum ®  
E.T.S.I. de Telecomunicación, Universidad de Vigo  
Campus de la Universidad de Vigo,  
36200 Vigo  
email: [amolares@gts.tsc.uvigo.es](mailto:amolares@gts.tsc.uvigo.es); [msobre@gts.tsc.uvigo.es](mailto:msobre@gts.tsc.uvigo.es)

### ABSTRACT

The “in situ” performance of a noise barrier can be evaluated according to the ISO standard 10847 [1]. The traffic noise can be used as noise source for this measurement and the standard does not provide relevant information of the factors contributing to the measurement uncertainty. Not only the temporal characteristics of the traffic flow, but also its average spatial position can lead to high dispersion on the measurements results. In this paper a evaluation of the measurement uncertainty with a MonteCarlo scheme based on BEM calculation is presented.

### RESUMEN

La norma ISO 10847:1997 describe la medición in situ de las pérdidas por inserción de una barrera acústica. La norma admite que puede utilizarse como fuente el propio ruido existente en la zona aunque reconoce que la inestabilidad de éste puede suponer un problema. Esto es especialmente cierto en el caso del ruido de tráfico, donde existe no sólo una variación temporal y de intensidad, sino que la variación de la distribución espacial del paso de vehículos deriva en importantes desviaciones en la medición. Esta comunicación presenta un modelo computacional basado en simulaciones BEM que estima dicha incertidumbre teniendo en cuenta variables espaciales, temporales y de intensidad de tráfico.

---

<sup>1</sup> Este trabajo ha sido llevado a cabo dentro de la agenda del Grupo de Trabajo en propiedades acústicas de dispositivos reductores de ruido, que pertenece al Subcomité 6 del Comité Técnico 135 de AENOR

## INTRODUCCIÓN

Una vez realizados los mapas de ruido de las grandes infraestructuras con más de 6000000 de desplazamientos por año, como parte de los planes de acción se requiere la instalación de barreras acústicas en muchos de los tramos. El subcomité 6 del grupo 135 de AENOR ha recibido el encargo elaborar un protocolo de medida que sirva para la evaluación “in-situ” de la pérdida de inserción de barreras acústicas. Para ello ha tomado como referencia la norma ISO 10847.

### La Determinación In Situ De Las Pérdidas De Inserción De Una Barrera Acústica Conforme A La Norma ISO 10847

La norma ISO 10847 [1] especifica dos métodos para la determinación de las pérdidas de inserción de barreras acústicas in-situ. El método directo se puede utilizar cuando la barrera aún no ha sido instalada, y se puede evaluar el nivel de presión sonora en los puntos de referencia y los puntos situados detrás de la barrera, tanto antes como después de que esta sea instalada. Para este método, la pérdida de inserción de la barrera se define como:

$$D_{IL} = (L_{ref,A} - L_{ref,B}) - (L_{r,A} - L_{r,B}) \quad (1)$$

donde,

- $L_{ref,B}$ : es el nivel de presión sonora en el punto de referencia antes de instalar la barrera
- $L_{ref,A}$ : es el nivel de presión sonora en el punto de referencia después de instalar la barrera
- $L_{r,B}$ : es el nivel de presión sonora en el punto de referencia antes de instalar la barrera
- $L_{r,A}$ : es el nivel de presión sonora en el punto de referencia después de instalar la barrera

El punto de referencia debe estar libre de la influencia de la difracción de la barrera, y debe situarse en un punto situado al menos a 1.5 metros sobre la barrera, en un plano vertical que contenga el borde de difracción de la barrera más próximo a la fuente. La función de este punto es monitorizar la fuente sonora durante las medidas realizadas antes y después de la instalación de la barrera y minimizar la influencia de las posibles variaciones.

El método indirecto se utiliza cuando la barrera ya ha sido instalada y no hay forma de desmontarla temporalmente. En esta situación, la presión sonora antes de la instalación de la barrera no puede ser evaluada, y la norma indica que debería realizarse esta medida en un sitio con condiciones acústicamente equivalente, es decir: con gran similitud en el perfil del terreno en las condiciones físicas del suelo y en las características de la barrera y suelo. El comité ha descartado este método por la gran dificultad práctica en la localización de ese lugar alternativo con características acústicamente equivalente, centrándose por tanto en el análisis y desarrollo del método directo.

La norma además define el concepto de “fuente equivalente”, y describe tres tipos de fuente para la realización de este tipo de medidas: fuentes naturales, fuentes naturales controladas y fuentes artificiales. Señala que la mejor opción sería la utilización de la fuente natural (la que se supone debe apantallar la barrera). Indica además que para valorar la incertidumbre de la medida debe procederse a la realización de repeticiones. La norma no indica un número mínimo de mediciones ni las condiciones en las que deben realizarse las repeticiones. En función de la naturaleza temporal de la fuente (que puede ser de cualquier naturaleza, no necesariamente tráfico), la norma incluye una tabla que aquí reproducimos como tabla 1, que sugiere una duración mínima de período de evaluación del  $Leq$  en función de la naturaleza temporal de la fuente sonora.

Naturaleza temporal	Duración sugerida		
	Rango de variación dB		
	10	10-30	30
Estacionario	2 min	No aplicable	
No estacionario, fluctuante	5 min	15 min	30 min
No estacionario intermitente	Al menos 10 eventos		
No estacionario, impulsivo y ráfagas aisladas			
No estacionario, cíclico	3 ciclos on/off		

**Tabla 1:** Duración sugerida de la medida en función de la naturaleza temporal de la fuente sonora.

## Discusión

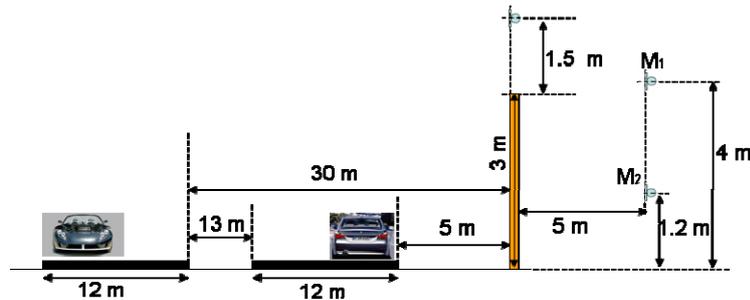
Cuando la norma ISO 10847 habla de “fuente natural”, no se centra específicamente en ningún tipo de fuente en concreto: cualquier tipo de fuente natural sería válida para realizar las medidas, hecho que carece de sentido ya que una barrera puede ser instalada tanto para apantallar el ruido procedente de una autopista como de una actividad industrial. Además de la posible naturaleza temporal existe una gran diferencia entre ambas situaciones: mientras la distancia de la barrera a la fuente sonora es fija en el caso de fuentes de tipo industrial, en tráfico puede haber una gran variación de distancia entre la barrera y la fuente sonora, especialmente cuando se trata de autopistas de varios carriles por sentido, con lo que se añade una fuerte componente de incertidumbre en este caso. En función de la hora del día seleccionada para acometer una medición, la distribución de tráfico en los carriles de una autopista puede variar drásticamente: de tener mayoritariamente el tráfico concentrado en los carriles más próximos a la barrera a tenerlo justamente en sentido contrario. Incluso las distribuciones de tráfico no tienen por qué ser las mismas en el momento de medir antes y después de la instalación de la barrera, aunque registremos el mismo número de vehículos. A priori, por tanto, parece que la distribución de tráfico en el momento de medir, va a jugar un papel importante en la incertidumbre de medida. El mero hecho de repetir medidas para evaluar la incertidumbre no parece suficiente. Surgen varias preguntas por tanto a las que buscamos dar respuesta mediante el análisis de la incertidumbre del proceso de medida de la pérdida de inserción de barreras “in-situ” que iniciamos con este artículo. Como además de la naturaleza temporal del tráfico puede influir de forma determinante en el resultado su distribución, parece que la tabla 1 debe ser desarrollada con más detalle para su aplicación en el caso de utilizar el tráfico como fuente natural no controlada.

## Escenario de Referencia

Para la evaluación de la incertidumbre de medida, el grupo de trabajo acordó un escenario de referencia con las siguientes características:

- Autopista de doble calzada y dos carriles por sentido
- Velocidad media de 120 km/h para vehículos ligeros y 90 km/h para pesados
- 10 % de vehículos pesados con una densidad media total, IMH=3200 vehículos/hora.
- Rango de frecuencia para la evaluación: de 100 a 5000 Hz.

- Los datos geométricos, ancho de la calzada, posición de los micrófonos y dimensiones de la barrera se incluyen en la figura 1.
- Velocidad del viento de 0 m/s (no se analiza en este trabajo la contribución en la medida de las condiciones atmosféricas)
- Asfalto bituminoso
- El micrófono de referencia se sitúa de acuerdo con las recomendaciones de la norma ISO 10847



**Figura 1.** Escenario para la evaluación de la incertidumbre en la medida de barreras acústicas.

Este escenario ha sido utilizado por nuestro grupo para elaborar un entorno de simulación que permite realizar la evaluación de la incertidumbre de medida mediante el método Monte Carlo. Se simula para ello todo el proceso físico de la medición, calculando la presión sonora difractada por la barrera mediante el método de elementos de contorno (B.E.M.).

## EL ENTORNO DE SIMULACIÓN MONTE CARLO

La figura 2 muestra el diagrama de bloques que constituye el entorno de simulación que se ha desarrollado para reproducir el proceso de medidas de la pérdida de inserción de barreras acústicas. Este escenario ha sido utilizado por nuestro grupo para elaborar un entorno de simulación que permite realizar la evaluación de la incertidumbre de medida mediante el método Monte Carlo. Se simula para ello todo el proceso físico de la medición, calculando la presión sonora difractada por la barrera mediante el método de elementos de contorno (B.E.M.).

El *generador de eventos* se encarga de sintetizar una secuencia de vehículos, con un tanto por ciento de vehículos pesados de acuerdo con las especificaciones. Para el caso definido se generan vehículos pesados con una probabilidad  $p=0.1$ . La secuencia se genera con la intensidad especificada (3200 vehículos/hora) de tal manera que se reproduce el efecto temporal de la fuente.

El *generador de espectro* conforma la secuencia de tráfico asignando el modelo espectral correspondiente para vehículos ligeros y vehículos pesados, siguiendo el modelo detallado por Sandberg en [2].

El *distribuidor de intensidad de tráfico* distribuye los 3200 vehículos hora de forma aleatoria en los carriles de la autopista, en función de la distribución seleccionada, es decir, se asignará tráfico a un carril conforme a la probabilidad de que un vehículo circule por un carril. Además, la posición de un vehículo dentro de un carril también es aleatoria. En media, a largo plazo, el tráfico discurrirá por el centro de un carril pero durante un período de evaluación corto no tiene por qué ser así, contribuyendo también por tanto al factor de incertidumbre debido a la posición de la fuente con respecto a la barrera. De esta forma, incluso en vías de sentido único de un único carril, el sistema podría evaluar la contribución de este factor a la incertidumbre final.

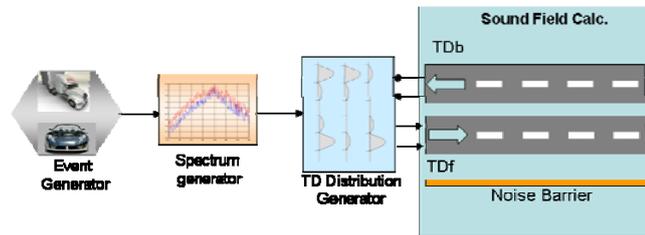


Figura 2. Diagrama de bloques del entorno de simulación.

La potencia acústica total de la fuente se obtiene a partir de la integración de la emisión de cada uno de los eventos (vehículo a vehículo) y la presión difractada por la barrera se asocia a la posición de cada evento y es integrada en el tiempo para obtener el  $L_{eq}$  en el período de medida. Mediante este esquema, no solo podemos evaluar la incertidumbre debida a la posición de la fuente sonora, sino que se puede también determinar la contribución del intervalo de medida en función de la densidad de tráfico. El nivel de presión sonora en las posiciones de los micrófonos (referencia y receptores) se calcula utilizando una extensión del BEM 2D [3-4] en el que se ha incluido modelos de divergencia, atenuación atmosférica y efecto Doppler (ya que supone una variación del espectro de emisión a medida que la fuente se aleja o se acerca a los micrófonos de medida).

### Cálculos mediante BEM de las funciones de transferencia fuente-receptor.

Para una posición determinada de un evento,  $x_i$ , el nivel de presión sonora se puede calcular a partir de la expresión:

$$P(x_i, f) = S(x_i, f) \cdot H(x_i, f) \quad (2)$$

Donde  $S(x_i, f)$  es el espectro emitido por la fuente situada en el punto  $x_i$ .  $H(x_i, f)$  es la función de transferencia entre la posición de la fuente y el receptor, y  $P(x_i, f)$  es la presión sonora evaluada en el receptor.

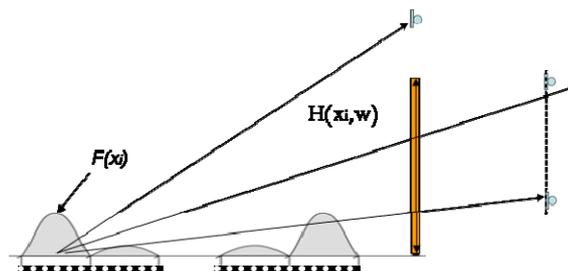
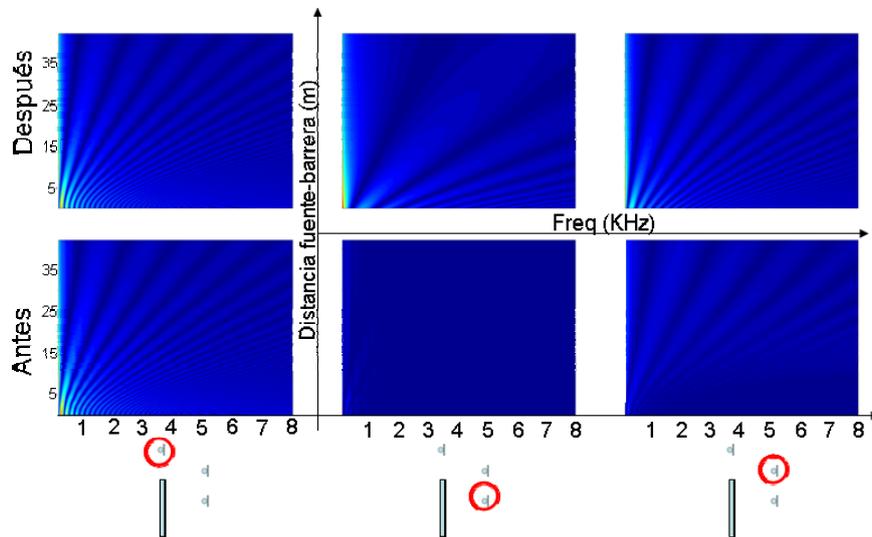


Figura 3. Funciones de transferencia entre la posición de la fuente y los receptores

Las funciones de transferencia  $H(x_i, f)$  se calculan utilizando BEM 2D. Para el escenario propuesto se necesitan calcular 6 funciones de transferencia para calcular la pérdida de inserción de la barrera: los cálculos correspondientes a la presión en el micrófono de referencia y en los micrófonos receptores M1 y M2 para las situaciones "antes de" y "después de" instalar la barrera. El punto de emisión se selecciona aleatoriamente conforme a la función de distribución de probabilidad asignada. Para ello se ha muestreado la calzada tomando un punto cada 10 cm lo que supone 420 posibles posiciones de fuente y el cálculo de 2520 funciones de transferencia. La evaluación de todas las funciones de transferencia se representan

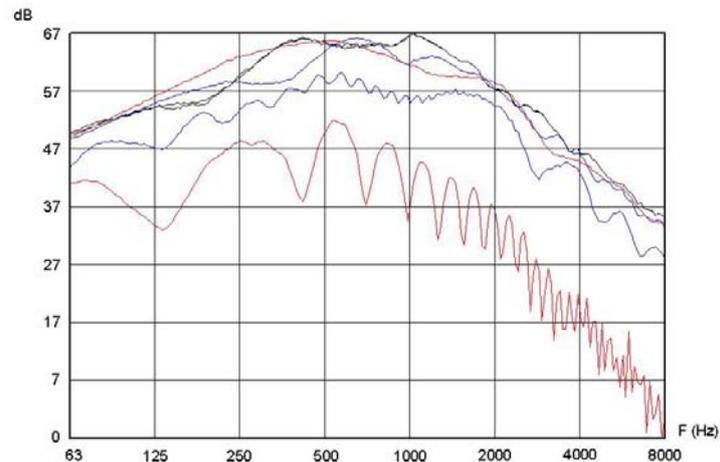
gráficamente en la figura 4. Puede comprobarse la efectividad de la barrera en cada posición de micrófono.



**Figura 4.** Cálculos de las funciones de transferencia entre las posiciones de la fuente y los receptores. Eje x: representa las frecuencias de cálculo de 100 a 5000 Hz . Eje y: distancia fuente-barrera.

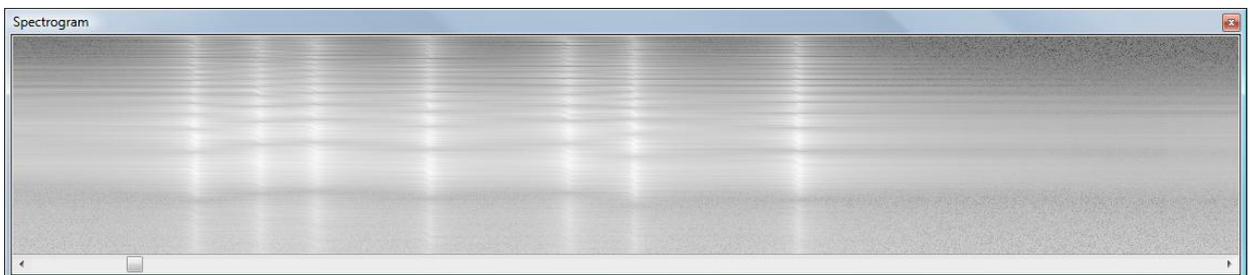
La figura 5 muestra las seis funciones de transferencia calculadas para el paso de un vehículo a 6 m de la barrera, después de proceder al promediado temporal del espectro de emisión de la fuente multiplicado por las funciones de transferencia calculadas con BEM. Las curvas dibujadas en color negro corresponden con la presión Sonora en el micrófono de referencia, antes y después de la instalación de la barrera. Puede comprobarse como estas curvas son prácticamente coincidentes, con lo que claramente resultase verifica el requerimiento de que el punto de referencia debe estar situado en un punto libre de la influencia de la barrera. Las curvas en rojo son las calculadas para la posición M2, el micrófono receptor situado a menor altura y en una zona apantallada por al barrera, mostrando una reducción importante del nivel de ruido recibido. Las curvas azules corresponden con la evaluación de la presión Sonora en el punto M1, y muestran una pérdida de inserción muy baja.

Los resultados mostrados en la figura 5 corresponden únicamente con a evento. El objetivo que se planteó en este estudio es reproducir el proceso de medida, donde se pueda apreciar incluso el paso simultáneo de varias fuentes a la vez y el efecto de un número finito de pasos de vehículos pesados en función de la intensidad de tráfico. Los resultados resultantes del cálculo BEM 2D se han extendido a un dominio 3D transitorio mediante un modelo de propagación fuera del plano de cálculo, incluyendo básicamente un modelo de rayos con divergencia, la atenuación atmosférica y el efecto Doppler. De esta forma, un intervalo de tiempo se divide en pequeñas fracciones. Para cada pequeña fracción de tiempo (quantum), la posición del vehículo en la carretera se recalcula de acuerdo a su distancia y a la velocidad asignada. Los resultados de los cálculos BEM se modifican entonces mediante el modelo de propagación y la señal recibida para cada micrófono es almacenada en memoria.



**Figura 5.** Cálculos de las funciones de transferencia entre las posiciones de la fuente y los receptores. – Micrófono de referencia. - Micrófono M2. - Micrófono M1.

Como ejemplo, la figura 6 muestra el espectrograma del paso de 7 vehículos. En él pueden observarse los efectos de la divergencia y del modelo de propagación introducido.



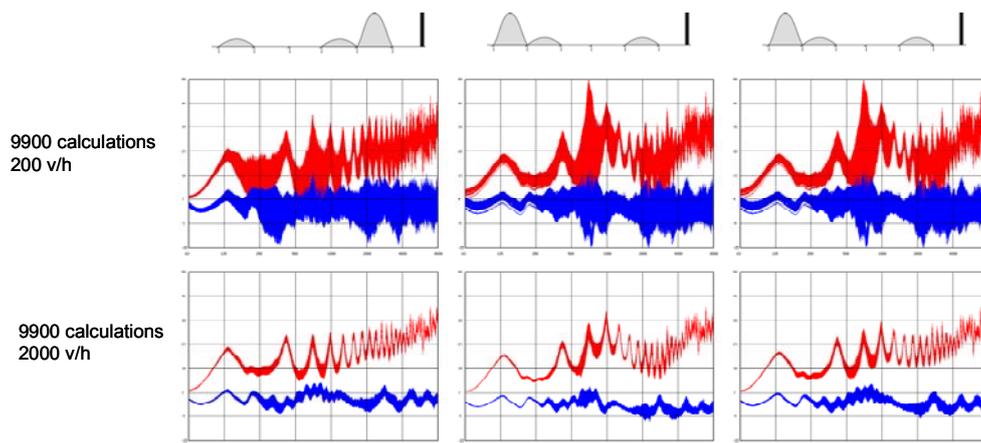
**Figura 6.** Cálculos de las funciones de transferencia entre las posiciones de la fuente y los receptores. – Micrófono de referencia. - Micrófono M2. - Micrófono M1.

El resultado en un cierto intervalo de medida, se integra y se calcula el espectro. De esta forma se calcula una realización de la medida de la pérdida de inserción de la barrera. Repitiendo el proceso un número suficiente de veces, se proceder al tratamiento estadístico de los resultados y analizarlos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados preliminares y una primera discusión. La pérdida de inserción de la barrera en el escenario propuesto en la figura 1 se ha calculado con diferentes densidades y distribuciones de tráfico. La figura 7 muestra los resultados de 9900 cálculos con densidad baja y alta de tráfico y diferentes distribuciones: una distribución simétrica con la misma densidad en ambos sentidos, una distribución con concentración de tráfico en la proximidad de la barrera y una distribución con el tráfico mayoritariamente circulando por el carril más alejado. Puede comprobarse, como muestra la figura, como para un intervalo de medida dado, existe una clara dependencia de la intensidad de tráfico. Puede comprobarse también como existen diferencias significativas en la IL entre las distribuciones

más extremas, mientras que los resultados de la distribución simétrica se aproximan a los de la distribución correspondiente a la concentración en la proximidad de la barrera. La dependencia de la intensidad de tráfico mostrada en la figura 7 no es directa. La principal causa de incertidumbre que está dominando la desviación de las medidas es, como se discutirá posteriormente, el número de vehículos registrados durante el intervalo de medida.



**Figura 7.** Pérdida de Inserción calculada a partir de la realización de 9900 cálculos en tres distribuciones de tráfico diferentes y dos densidades diferentes. En rojo se representa la evaluación en M2 y en azul la IL correspondiente al micrófono M1.

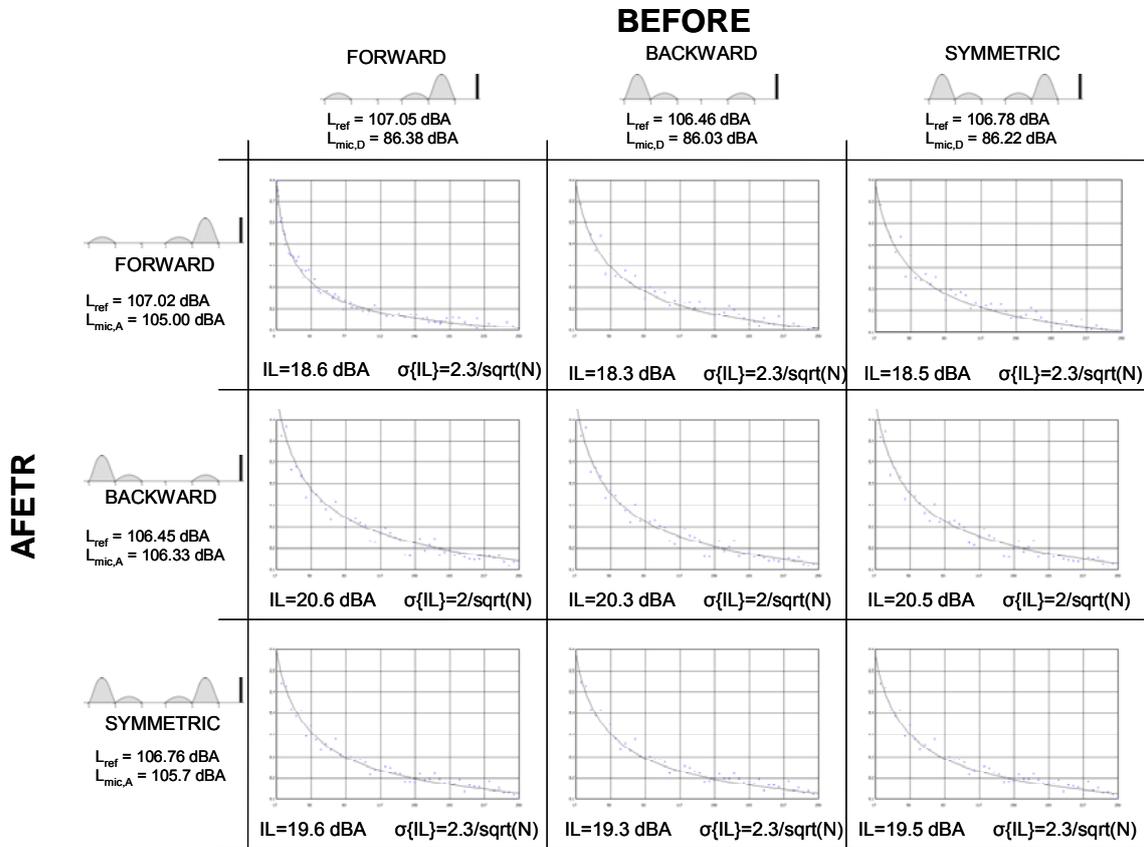
Incluso con densidades de tráfico pequeñas se puede obtener una incertidumbre adecuada simplemente incrementando el tiempo de medida hasta en media hora. Puede observarse también en la figura 7 que el micrófono M1, situado por encima del borde de la barrera, presenta un valor de pérdida de inserción que están en el rango de la incertidumbre de medida.

Si examinamos la dependencia de la incertidumbre de medida en función del número de vehículos, la tabla 1 se podría simplificar si se incluyen especificaciones concretas para la medición de la pérdida de inserción cuando se utiliza el tráfico como fuente natural no controlada. La figura 8 presenta algunos cálculos de IL en función del número de vehículos. Claramente muestra la misma naturaleza, una exponencial decreciente, que la incertidumbre de la evaluación del  $L_{eq}$  en medidas de ruido de tráfico [5]

La desviación estándar de la IL en función del número de vehículos se puede aproximar por la expresión:

$$u[IL(dbA)] = \frac{C}{\sqrt{N}}, \quad (3)$$

donde C es una constante que depende del escenario de medida y de la distribución espacial de tráfico. N es el número de vehículos registrados. La constante C se evalúa calculando la IL en diferentes condiciones de tráfico. Puede suponerse a priori que la mayor fuente de incertidumbre puede provenir de la posibilidad de que existen diferentes distribuciones de tráfico antes y después de las medidas. Para resolver esta cuestión, se evaluó la IL en la posición M2 utilizando una matriz de distribuciones, tal como representa la figura 8.



**Figura 8.** Cálculo de la IL en función de las distribuciones de tráfico “antes” y “después de la instalación de la barrera.

En contra de lo que a priori se esperaba, la matriz no es en absoluto simétrica. Para una distribución de tráfico “antes de” la instalación de la barrera determinada, la diferencia entre los resultados para varias distribuciones “después de”, es menor (entre 0.3 dB y 0.1 dB) que si fijamos la distribución “después de la instalación”, ya que en este caso observamos variaciones de resultados entre 1 y 2 dB. Esto implica que en el ámbito de la evaluación que se está llevando a cabo únicamente la contribución de la distribución de tráfico durante la medida después de la instalación de la barrera es importante. Así, si la medición “después de”, se realiza en unas condiciones que no son representativas del tráfico habitual, el error cometido puede ser del orden de 1 o 2 dB. Sin embargo, si la medición “antes de” la instalación de la barrera se realiza en una distribución que no es representativa supondrá un error inferior a 0.3 dB.

Este interesante comportamiento puede predecirse a partir de las funciones de transferencia BEM mostradas en la figura 4. Cuando el micrófono receptor está suficientemente bien apantallado por la barrera, el nivel de ruido recibido después de instalar la barrera será mucho menos dependientes de la distribución especial de tráfico, por tanto la influencia sobre la pérdida de inserción será principalmente debida a las condiciones del tráfico “después de” instalar la barrera, donde hay una fuerte influencia de la distribución espacial. Esta situación no es la misma para micrófonos expuestos, como el M1, donde existe también una influencia de la distribución espacial de tráfico, pero para este tipo de localizaciones el valor de la IL es del orden de la incertidumbre de medida y por tanto no se pueden obtener conclusiones claras.

La constante  $C$  de la expresión (3) se puede calcular a partir de los resultados mostrados en la figura 8, mostrando que únicamente depende de la situación del tráfico después de instalar la barrera, tomando los valores:  $C=2.3$  en el caso de distribución simétrica o con tráfico concentrado en la proximidad de la barrera y  $C=2$  para una distribución con el tráfico alejado de la barrera.

## CONCLUSIONES

Se han presentado los primeros resultados sobre la evaluación de la incertidumbre de medida “in-situ” de la pérdida inserción de barreras acústicas, cuando se utiliza el propio tráfico como fuente natural no controlada. Los resultados discutidos en este artículo y sus conclusiones únicamente aplican al escenario definido en la primera sección.

Se ha elaborado un entorno de simulación BEM-Monte Carlo que permite calcular la incertidumbre de la medida de la pérdida de inserción de barreras acústicas; para ello se han utilizado tres tipos diferentes de distribución especial y se ha evaluado su influencia en la IL, concluyendo que la tabla 1, procedente de la norma ISO 10847, debería actualizarse e incluir la dependencia de la incertidumbre con el número de pasos de vehículos y reflejar que la mayor contribución a la incertidumbre procede, en micrófonos en la zona cubierta por la barrera, de la medición realizada antes de la instalación de la barrera.

Se necesita más trabajo para extender estas conclusiones a otros escenarios más próximos a los reales. Está claro que cualquier cambio en las condiciones geométricas, como la situación de barreras a ambos lados de la calzada, cambios en la forma del terreno, etc., van a afectar a los resultados. Una vez se hayan obtenido las conclusiones pertinentes, se proporcionará una metodología general para evaluar la pérdida de inserción “in-situ” de barreras acústicas debería. Esta metodología debe incluir:

- Recomendaciones generales para el emplazamiento del micrófono de referencia en función de la geometría de la barrera.
- Recomendaciones para el emplazamiento de micrófonos receptores en zonas donde la IL sea mayor que la incertidumbre esperada.
- Especificaciones sobre el mínimo número de pasos de vehículos requeridos para mantener la incertidumbre por debajo de unos valores determinados.
- Deben considerarse otros factores de incertidumbre, como la contribución de las condiciones meteorológicas. Para ello deben tomarse como referencia las indicaciones de la norma 1996-2:2007 [5].

## REFERENCIAS

- [1] ISO standard 10847 :1997(E) “Acoustics - In-situ determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types.”
- [2] Ulf Sandberg. “The Multi-Coincidence Peak around 1000 Hz in Tyre/Road Noise Spectra”. Proceedings Euronoise 2003. Naples.
- [3] Peter M. Juhl. “The boundary element method for sound field calculations” J. Acoust. Soc. Am. Volume 96, Issue 4, pp. 2595-2595 (October 1994)
- [4] Quirós, F. Jacobsen, P. M. Juhl and V. Cutanda. “A BEM approach to validate a model for predicting sound propagation over non-flat terrain”. Applied Acoustics 64 (2003) pp 781-791.
- [5] ISO 1996-2:2007. “Acoustics □ Description, measurement and assessment of environmental noise □ Part 2: Determination of environmental noise levels.”