

Un primer estudio del ruido en los actuales trenes de la red ferroviaria española

L. Faus.

*EUITT. "La Salle Bonanova". Universitat Ramon Llull.
J. Romero, A. Jiménez, A. Marin, A. Sanchis, S. Cerdá.
Grupo de Acústica Arquitectónica, Ambiental e Industrial.
Universidad Politécnica de Valencia.
e-mail: agjimenez@fis.upv.es*

PACS: 43.50.Lj

Resumen

En el estado español no existe ningún modelo de simulación sonora de tráfico ferroviario aceptado por la Administración, es por ello que en los estudios de impacto sonoro de nuevas vías de tráfico ferroviario se utilizan cualquiera de los modelos internacionalmente aceptados. Este trabajo es un primer estudio encaminado a obtener un modelo sencillo de predicción del ruido generado por los trenes que ya circulan en la red ferroviaria española. Se ha utilizado como referencia el modelo desarrollado en Francia y publicado en Guide du Bruit [1]. Al aplicar este modelo a las medidas realizadas, comprobamos la necesidad de utilizar valores diferentes a los parámetros de referencia del modelo francés. Concluimos la necesidad de una actualización de este modelo para que se pueda aplicar a los trenes de la red ferroviaria española.

Summary

In Spain does not exist any noise simulation model for railway traffic accepted by the Administration, therefore in sound impact studies of new traffic railways are used anyone of the internationally accepted models. This work is a first study routed to obtain a simple forecast model of the noise generated by the trains that already circulate in Spanish railway network. From the model developed in France and published in Guide du Bruit [1], we prove the need of using different values from the reference parameters of the French model. Thus is necessary an update of this model so that could be applied to the trains of the Spanish railway network.

1. Introducción

En el estado español no existe ningún modelo de simulación sonora de tráfico ferroviario aceptado por la Administración, es por ello que en los estudios de impacto sonoro de nuevas vías de tráfico ferroviario se pueden utilizar cualquiera de los modelos internacionalmente aceptados. Resulta evidente que el ruido generado por un tren no puede variar por el hecho de circular en uno u otro país, pero debemos ser conscientes que el ruido generado por el paso de un tren depende de algunos parámetros que si pueden variar en función del país. Dentro de estos parámetros se pueden mencionar aspectos como el estado de mantenimiento de las infraestructuras, la velocidad de circulación, la ocupación o peso de las diferentes unidades, etc.

Este trabajo se engloba dentro de un grupo de estudios encaminados a obtener un modelo sencillo de predicción del ruido generado por los trenes que ya circulan o circularán en los próximos años en la red ferroviaria española. A la hora de desarrollar un modelo de predicción sonora disponemos básicamente de dos posibilidades, modelos teóricos que contemplen la mayoría de los parámetros de los que depende el ruido y modelos pseudo-experimentales en donde conjugamos ciertos fundamentos teóricos con datos experimentales. En nuestra opinión, y pensando en un modelo de simulación de ruido ferroviario sencillo de utilizar y con un grado de precisión aceptable, la elección debe inclinarse claramente por un modelo pseudo-experimental. Como ejemplo de este tipo de modelos tenemos el modelo desarrollado en Francia y publicado en Guide du Bruit [1].

El primer paso a la hora de elaborar este tipo de modelos de predicción es caracterizar experimentalmente el ruido generado por cada uno de los trenes a los que posteriormente se aplicará el modelo. En la actualidad con la expansión de las líneas de alta velocidad (velocidades entorno o superiores a 300 km/h) y de velocidad alta (velocidades entorno a los 200 km/h) el número de trenes a considerar es relativamente amplio. En nuestro trabajo se han considerado un total de ocho tipos diferentes de trenes que incluyen las unidades AVE, Talgo-2000, Euromed, Talgo, Arco, Estrella, trenes Cortos y Mercancías. En posteriores trabajos se incluirán los trenes de la red de cercanías.

El motivo de centrar las medidas en los trenes de alta velocidad y de velocidad alta se debe a dos motivos básicos. El primero son los planes de futuro de las diferentes administraciones europeas para potenciar una red de trenes de alta velocidad. El segundo motivo es que este tipo de trenes presenta características específicas que no fueron contempladas en muchos de los modelos existentes en la actualidad y que difícilmente pueden ser aplicables en este tipo de trenes.

Para caracterizar el ruido generado por cada tipo de tren se han registrado aquellos parámetros que pueden influir en un primer orden de magnitud en el ruido final. Estos parámetros considerados han sido la velocidad y la longitud del tren. El conocimiento de estos parámetros es fundamental a la hora de establecer un nuevo modelo de simulación, o de valorar los modelos ya existentes.

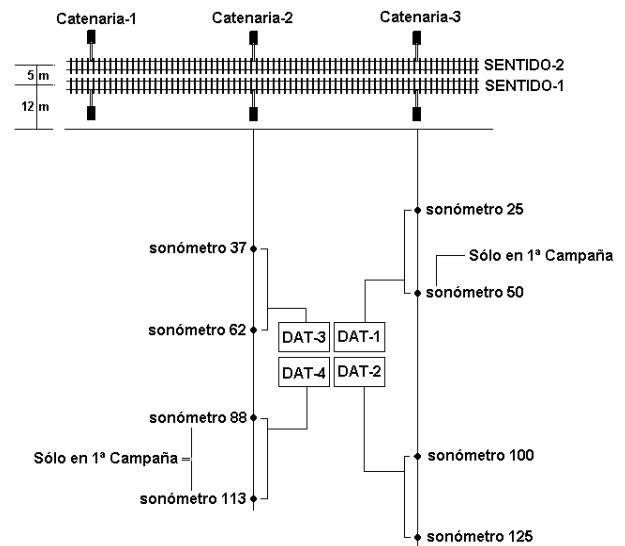
Una vez caracterizado el ruido generado por los trenes el siguiente paso es comprobar si con los actuales modelos es posible reproducir satisfactoriamente las medidas experimentales, y en caso negativo elaborar un modelo pseudo-experimental a partir de la caracterización de los niveles sonoros de los trenes. Por su simplicidad y facilidad de uso el modelo valorado ha sido el modelo francés presentado en Guide du Bruit publicación del MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU CADRE DE VIE en Noviembre de 1980 utilizado por la compañía francesa S.C.N.F. en sus estudios.

2. Descripción de las medidas

Para caracterizar los ocho tipos de trenes nos hemos visto en la necesidad de realizar dos campañas de medidas sonoras. La primera campaña se realizó en la línea Barcelona-Valencia entre las estaciones de Ulldecona-Alcanar, línea por la que circulan trenes Euromed, Talgo, Arco, Estrella, trenes Cortos y Mercancías. La segunda campaña se realizó en la línea de alta velocidad que une Madrid con Sevilla en el punto kilométrico PK 108. La elección de este emplazamiento es

evidente y se debe al hecho de que sólo en este trazado circulan unidades AVE a velocidades en torno o superiores a 275 km/h. En ambas campañas las localizaciones exactas presentaban las condiciones idóneas para registrar los niveles sonoros (zona amplia sin obstáculos orográficos, bajo ruido de fondo, visibilidad perfecta a gran distancia, máximas velocidades en el caso de los trenes Euromed, Talgo, Arco, Talgo-2000 y AVE).

En la primera campaña de medidas se han registrado simultáneamente los pasos de los diferentes trenes en ocho posiciones diferentes, mientras que en la segunda campaña sólo se registraron en cinco posiciones diferentes. Para ello se dispuso de ocho sonómetros y cuatro grabadoras digitales DAT. En cada DAT se registraron simultáneamente dos posiciones (siempre separadas 25 metros). Las posiciones en las que se registraron los niveles sonoros generados por el paso de los trenes incluyen distancias comprendidas entre 37 metros la más próxima hasta 142 metros la distancia más lejana. En la siguiente figura se detallan estas posiciones.



En función del sentido de circulación del tren las distancias de registro de los niveles sonoros son diferentes. En la tabla 1 se muestran sus valores, pero para concentrar las distancias de medida los valores registrados por los trenes circulando en el sentido 2 se han trasladado la distancia equivalente como si circularan en el sentido 1.

Además de registrar los niveles sonoros en DAT se registró en soporte videográfico el paso de los diferentes trenes. Los registros en vídeo se han realizado para poder obtener la velocidad y la longitud del tren. En estas grabaciones se registraba el paso de la cabeza y la cola del tren entre dos posiciones de las que se conocía su separación. A partir del

Tabla 1

Posición	Distancia (m)	
	Circulando Sentido-1	Circulando Sentido-2
25	37	42
37	49	54
50	62	67
62	74	79
88	100	105
100	112	117
113	125	130
125	137	142

tiempo de paso de cabeza y cola por estas dos posiciones se ha calculado tanto la velocidad como la longitud.

En la tabla 2 se presentan los valores obtenidos para el rango de velocidades y longitudes en los diferentes tipos de tren medidos.

Tabla 2

Tipo Tren	Velocidad (km/h)	Longitud (m)
AVE	278-307	200
Euromed	214-200	200
Talgo-2000	180-205	150
Talgo	180-204	135
Arco	173-200	125
Estrella	160	280
Corto	160	80
Mercancías	84-117	169-480

3. Descripción del modelo francés.

Este modelo fue publicado en el año 1980, y está basado en medidas experimentales de trenes de una década anterior. Aunque es muy posible que los datos experimentales en los que se basa estén obsoletos su planteamiento teórico es

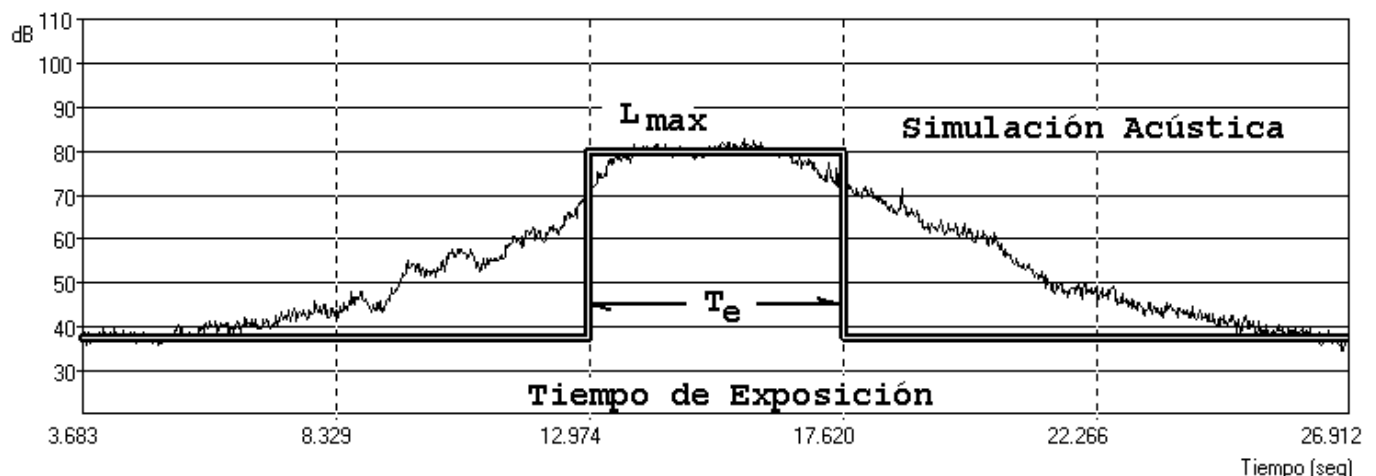
apropiado y por su simplicidad muy válido. Es por ello que uno de los objetivos de este trabajo es el valorar este modelo y en caso necesario reformularlo con medidas experimentales actualizadas. A continuación pasamos a describirlo brevemente.

El objetivo del modelo es calcular el nivel equivalente L_{eq}^{1tren} generado por el paso de un tren a partir del un nivel constante L_{max} que se mantiene durante todo el tiempo de exposición T_{exp} generado por el paso de un tren. Si conocemos el nivel sonoro equivalente L_{eq}^{1tren} que genera el paso de un único tren, el conocer el nivel sonoro equivalente $L_{eq}^{Tipo-tren}$ que genera el paso de n trenes del mismo tipo es tan simple como aplicar una corrección de $10 \log n$. Si por la vía en cuestión no sólo pasan trenes de un solo tipo sino que operan varios tipos de trenes, para calcular el nivel sonoro equivalente L_{eq} total bastará con sumar todas las contribuciones $L_{eq}^{Tipo-tren}$ de cada uno de los diferentes tipos de trenes que circulan por la vía. El grado de fiabilidad de este modelo vendrá marcado por la precisión con la que se calcula el nivel equivalente L_{eq}^{1tren} generado por el paso de un tren, o lo que es lo mismo con el grado de precisión con que se calcule el valor L_{max} que se mantiene durante todo el tiempo de exposición T_{exp} .

El parámetro L_{max} es función del tipo de tren, la distancia tren-observador y la velocidad a la que circula el tren. En el modelo el valor de L_{max} se obtiene a partir de medidas experimentales L_o realizadas a una cierta distancia observador-tren d_o y a una cierta velocidad del tren v_o . Para otras distancias y otras velocidades el modelo corrige estos valores según:

$$L_{max} = L_o - k \log \frac{d}{d_o} + 30 \log \frac{v}{v_o}$$

$$L_o = L_{max}(d_o, v_o)$$



donde k es el parámetro encargado de controlar la pérdida de energía del frente de ondas por divergencia geométrica. Si no consideramos absorción de energía por el medio, podemos afirmar que la constante k pasa a ser la constante que controla la atenuación del ruido con la distancia. En la tabla 3 se presentan los valores L_0 de referencia para diferentes trenes a diferentes distancias d_0 y diferentes velocidades v_0 , en el modelo francés.

Tabla 3

Tipo de Tren	Velocidad v_0 (km/h)	Nivel de referencia L_0 dB(A)		
		d_0 7.5 m	d_0 15 m	d_0 25 m
Tren Corto y Metros	60	79	75	72
Tren Pasajeros				
• rápidos	200	104	100	97
• expresos	140	97	94	92
Tren Mercancías				
• lentos	80	93	89	86
• rápidos	100	96	92	89
Locomotoras				
• Autoraíl	120	92	88	85
• ETG o RTG	155	96	91	89

El parámetro k adoptará valores en función del tipo de tren. Para entender el porqué de esta dependencia bastará con estudiar la propagación con la distancia de fuentes puntuales y de fuentes lineales. Para fuentes puntuales $k = 20$ (6 dB/doble distancia) mientras que para fuentes lineales $k = 10$ (3 dB/doble distancia). El modelo propone los siguientes valores:

Tabla 4

Tipo de tren	Valor k	dB/doble distancia
Trenes largos	12	3.6
Trenes medios	15	4.5
Metros largos	14-16	4.2-4.8
Metros cortos	16	4.8
Trenes cortos/ETG-RTG	17	5.1
Locomotoras	20	6

Por otro lado, para calcular el nivel equivalente L_{eq}^{1Tren} generado por el paso de un único tren es necesario conocer el tiempo de exposición en el receptor. Este tiempo será la duración entre el instante de aparición del ruido y su disipación. Este tiempo será función del ruido de fondo, así en ambientes ruidosos un tren generará un tiempo de exposición menor que el que generará el mismo tren en un ambiente silencioso. Es necesario establecer un convenio que nos permita determinar un tiempo de exposición indepen-

diente del ruido de fondo. Como convenio el modelo considera que el tiempo de exposición T_{exp} es el tiempo en que el nivel sonoro no difiere más de 10 dB(A) respecto el nivel máximo L_{max} . La elección del intervalo 10 dB(A) se debe a que la contribución al nivel total de niveles que presentan diferencias superiores a 10 dB(A) pueden despreciarse. El modelo propone para el cálculo del tiempo de exposición T_{exp} la expresión:

$$T_{exp} = \frac{3.6l}{v} + \frac{6d}{100}$$

donde l es la longitud del tren en metros, v velocidad del tren en km/h y d la distancia en metros del observador a la vía, y T_{exp} viene expresado en segundos. A partir de estos planteamientos, vemos que todo el modelo se basa en tres parámetros fundamentales, el valor asignado a L_{max} , el valor del tiempo de exposición T_{exp} y la constante k de control de atenuación con la distancia. La validez del modelo es función de la precisión con que se calculen estos datos para cada uno de los diferentes tipos de trenes.

4. Resultados

Caracterización de los niveles sonoros de los diferentes trenes

Los valores del tiempo de exposición T_e , el nivel sonoro máximo L_{max} y el nivel sonoro equivalente L_{eq} generado por cada paso de tren dependerán además del tipo de tren, velocidad y longitud del mismo, de la distancia relativa entre tren y observador. A continuación, y a modo de ejemplo, presentamos el espectro promedio para cada tipo de tren a una distancia de 37 m (distancia mínima medida entre tren y observador). Cada espectro promedio ha sido obtenido a partir del nivel sonoro equivalente generado por cada uno de los diferentes pasos de tren registrados.

Debemos resaltar que el número de trenes promediados para cada tipo de tren es diferente, ya que la frecuencia de paso de estos trenes por las localizaciones elegidas también lo es. En la tabla 5 se muestran los trenes utilizados para la obtención del espectro promedio de los niveles equivalentes.

En la tabla 6 se presentan los niveles sonoros equivalentes promedio de cada tipo de tren en términos de dB(A) para cada una de las distancias medidas.

Evaluación y actualización del Modelo Guide du Bruit

El siguiente paso es intentar reproducir los niveles sonoros medidos para cada uno de los ocho tipos de trenes.

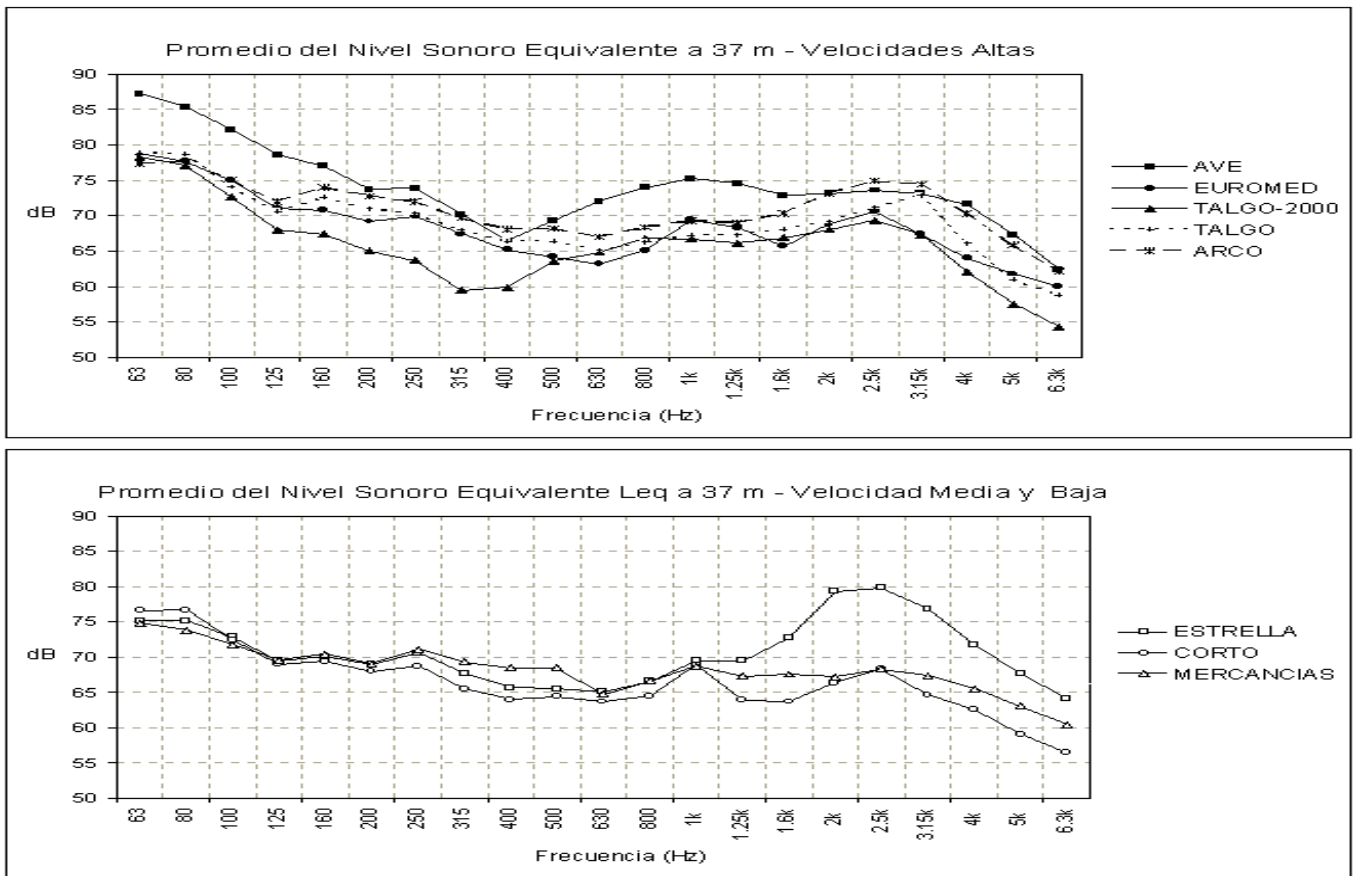


Tabla 5

Distancia	AVE	Euromed	Talgo-2000	Talgo	Arco	Estrella	Corto	Mercancías
37	16	11	6	5	7	4	4	8
49	-	11	-	5	7	4	4	8
62	17	11	6	4	7	4	3	8
74	15	10	6	4	7	4	3	8
100	-	6	-	4	5	3	2	7
112	13	9	3	4	7	4	4	7
125	-	6	-	4	5	3	2	7
137	13	9	3	4	7	3	2	7

Tabla 6

Tren	Nivel Sonoro Equivalente dB(A)							
	37m	49m	62m	74m	100m	112m	125m	137m
AVE	84.2	-	81.3	76.5	-	75.5	-	73.1
Euromed	78.6	74.9	71.3	70.5	65.5	63.8	64.8	60.8
Talgo-2000	77.6	76.5	75.0	73.5	-	68.5	-	64.7
Talgo	80.4	77.5	74.0	70.8	64.9	62.0	62.2	57.7
Arco	82.8	79.0	75.2	74.4	67.2	65.7	64.2	62.4
Estrella	86.0	82.9	76.0	77.2	68.0	67.5	65.7	64.3
Corto	76.6	69.6	65.2	65.9	59.7	55.8	58.1	56.8
Mercancías	78.8	76.2	72.0	72.0	65.8	62.9	63.2	61.3

nes con el modelo francés Guide du Bruit. De forma simultanea a esta evaluación podemos ajustar con expresiones idénticas, pero dejando libres las constantes del ajuste estos valores experimentales. Estas acciones nos proporcionarán unos nuevos valores de las constantes de ajuste del modelo que lo actualizarán para los trenes registrados.

Los datos experimentales han sido ajustados mediante una expresión como:

$$L_{\max} \equiv L_{\text{eq}} = L_0 - k \log \frac{d}{d_0}$$

donde d_0 toma un valor de 25 m y L_0 es el nivel sonoro equivalente a 25 m. En el ajuste no consideramos la influencia de la velocidad, ya que todos los trenes del mismo tipos circulan a velocidades similares, y en aquellos casos en los que la velocidad difiere de la del resto de pasos el tren es desechado y no incluido en el ajuste.

Aunque el modelo francés sólo ofrece valores en términos de dB(A), hemos ajustado los niveles sonoros también en bandas de 1/3 octava. Estos ajustes nos permitirán, utilizando la banda de 63 Hz (en donde las pérdidas por absorción tanto del suelo como del aire deben de ser mínimas) tener un conocimiento aproximado de cual puede ser la pérdida sólo por divergencia geométrica de cada uno de los tipos de tren. En la tabla 15 mostramos un resumen de la evaluación del modelo francés de los parámetros L_0 y k según el tipo de tren. El caso de los trenes de mercancías es de difícil evaluación ya que pasan trenes con muy diversas longitudes entre 170 m a 480 m, y un intervalo de velocidades entre 80 km/h y 100 km/h

De esta tabla podemos ver claramente que los niveles L_0 de referencia propuestos por el modelo francés deben ser actualizados, puede ser debido a que las velocidades ya pueden caer en una región alta donde no se puede aplicar el modelo, o puede que el motivo sea la renovación en estas casi dos décadas de los sistemas ferroviarios. Podemos

Tabla 7: Ajuste de los trenes Ave (92 medidas)

Hz	dBA	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k
L0	87.9	87.6	87	84.6	81.6	81.1	78.2	78.1	73.8	70.8	74.5	78.2	79.2	79.6	78.8	76.7	75.8	76.2	75.8	74.6	71.5	68.8
K	19.7	11.6	14.4	17.8	20.2	23.7	25.6	28.2	27.9	27.3	26.5	27.4	24.1	20.8	19	16.9	17.3	17.8	18.9	22.4	27.3	34.4
R	0.85	0.7	0.8	0.85	0.87	0.85	0.89	0.9	0.88	0.92	0.92	0.9	0.88	0.85	0.81	0.78	0.78	0.74	0.71	0.78	0.84	0.9
S	2.33	2.25	2.05	2.1	2.2	2.8	2.49	2.56	2.85	2.14	2.1	2.43	2.41	2.41	2.62	2.52	2.62	3.01	3.49	3.41	3.29	3.1

Tabla 8: Ajuste de los trenes Euromed (73 medidas)

Hz	dBA	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k
L0	84.7	81.9	80.8	79.1	75.3	75.4	74.3	75.4	73.9	72.2	70.8	69.5	70.9	75.7	75.1	71.9	75	77.2	74.5	71.7	70.1	69.5
K	30.7	16.9	18.5	20.6	20.5	21.7	23.6	24.9	27.8	30.1	30.3	29.8	29	30.5	31.8	29.5	31.9	35.4	36	36.5	39.3	44.8
R	0.92	0.95	0.95	0.95	0.92	0.9	0.92	0.91	0.92	0.93	0.93	0.94	0.95	0.95	0.9	0.9	0.88	0.87	0.89	0.91	0.92	0.93
S	2.44	1.1	1.15	1.31	1.7	2.06	1.96	2.17	2.18	2.19	2.27	2.07	1.72	1.98	2.99	2.7	3.35	3.76	3.45	3.13	3.23	3.29

Tabla 9: Ajuste de los trenes Talgo-2000 (27 medidas)

Hz	dBA	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k
L0	84.3	81.6	81.4	77.9	73.5	73.2	71.8	71.2	67.4	67.5	71.7	73.6	74.5	73.4	72.5	72.8	73.5	76.3	74.6	69.4	65.5	63.9
K	24.2	14.4	17.3	20.7	22.2	23.1	25.2	29.6	32	31.4	31.3	31.3	28.1	24.8	22.7	20.8	21.1	25.3	25.6	27.9	30.5	36.7
R	0.88	0.87	0.91	0.96	0.95	0.9	0.94	0.95	0.94	0.97	0.96	0.95	0.95	0.94	0.91	0.77	0.71	0.82	0.87	0.9	0.9	0.9
S	2.42	1.51	1.42	1.05	1.39	2.08	1.67	1.86	2.07	1.53	1.65	1.87	1.77	1.65	1.87	3.13	3.77	3.26	2.71	2.42	2.67	3.19

Tabla 10: Ajuste de los trenes Talgo (35 medidas)

Hz	DBA	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k
L0	88.9	81.2	82.1	79.3	76.1	78.6	77.6	76.9	75.1	73.7	73.6	72.4	74.3	75.8	76.1	77.4	78.5	81.1	82.4	75.9	71.5	70.4
K	39.9	17	19.5	24.1	25.8	28	29.8	30.7	32.8	33.2	33.9	34.2	36.2	38.1	38.6	41.4	42.5	44.8	45.3	44.1	45.8	51
R	0.93	0.76	0.85	0.92	0.92	0.93	0.9	0.93	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92	0.91	0.9	0.87	0.88	0.91	0.92	0.88	0.92	0.94
S	3.16	2.92	2.39	2.09	2.19	2.29	2.8	2.32	2.47	2.55	2.74	2.89	3.01	3.51	3.81	4.57	4.59	4.09	3.86	4.7	3.81	3.79

Tabla 11: Ajuste de los trenes Arco (44 medidas)

Hz	DBA	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k
L0	90	80.4	80.1	78.7	76.8	79.1	78.3	77.6	76.2	75.3	75.8	74.6	76.6	77	76.6	78	81	82.6	82.4	79.2	75.7	73.3
K	35.8	18.5	19.5	21.2	23	25.1	26.4	28	30.4	31.2	33.8	34.8	36.2	35	34.9	36	37.2	39.3	40.8	42.3	45.8	51
R	0.83	0.95	0.94	0.94	0.92	0.91	0.9	0.91	0.92	0.9	0.89	0.9	0.91	0.87	0.86	0.81	0.77	0.77	0.77	0.81	0.83	0.86
S	4.7	1.2	1.46	1.47	1.89	2.25	2.55	2.57	2.6	3.04	3.35	3.26	3.17	3.92	4.13	5.07	6.06	6.42	6.66	6.08	6.13	6.05

Tabla 12: Ajuste de los trenes Estrella (29 medidas)

Hz	DBA	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k
L0	94.6	77.7	78	76.4	74	74.8	73.8	76.4	74.6	72.8	72.6	72.2	73.8	76.4	76.5	80.6	88.1	89.1	86.6	82	78.6	75.6
K	40.8	15.2	17.5	19.3	20.7	21.4	21.9	25.7	29	30.6	31.7	32.1	32.8	31.8	32.8	38	42.3	44.3	46.4	46.4	47.6	52.4
R	0.95	0.86	0.84	0.81	0.91	0.92	0.88	0.92	0.94	0.93	0.88	0.89	0.91	0.91	0.93	0.95	0.94	0.94	0.94	0.95	0.95	0.96
S	2.44	1.71	2.14	2.7	1.8	1.71	2.27	2.02	2.06	2.26	3.29	3.15	2.83	2.81	2.49	2.3	2.93	3.09	3.12	2.98	2.88	2.89

Tabla 13: Ajuste de los trenes Corto (24 medidas)

Hz	DBA	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k
L0	82	79.1	79.4	76	73.2	74.3	73.3	74.5	71.7	70.6	70.8	70.1	70.6	74.3	68.8	69.4	71.7	73.5	70.6	69.5	67.3	66.4
K	38.1	19.4	23	24.9	26.9	29.7	31.3	33.2	35.7	36.6	38.6	39.9	38.6	40.2	34.9	39.3	41.7	44.6	45.8	48.2	51.1	56
R	0.89	0.94	0.95	0.96	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.9	0.88	0.87	0.87	0.85	0.72	0.8	0.8	0.8	0.8	0.83	0.85	0.89
S	3.67	1.35	1.44	1.44	1.7	2.12	2.07	2.22	2.64	3.28	3.98	4.2	4.13	4.69	6.33	5.55	5.95	6.34	6.48	6.21	5.88	5.41

Tabla 14: Ajuste de los trenes Mercancías (59 medidas)

Hz	dBA	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k
L0	85.6	77.4	76.7	75.5	74.2	75.6	74.9	77.4	76.1	75.3	75.3	71.7	73.7	75.9	74.2	74.9	74.2	74.9	74.2	73.4	72.2	70.5
K	32.1	15.2	17.5	19.7	21.8	23.8	25.9	28.2	30.4	30.7	31.6	32	31.9	32.6	32.1	32.8	32.9	33.7	34.5	37.9	42.4	47.9
R	0.8	0.65	0.7	0.77	0.82	0.84	0.79	0.83	0.84	0.84	0.8	0.9	0.89	0.85	0.83	0.77	0.74	0.74	0.73	0.75	0.77	0.78
S	4.52	3.39	3.36	3.12	2.94	2.88	3.8	3.61	3.77	3.79	4.49	2.89	3.18	3.88	4.04	5.17	5.7	5.8	6.22	6.39	6.77	7.28

apreciar que tan sólo en el caso de los trenes Estrella el modelo propone un nivel de referencia L_0 correcto, en el resto de los casos el modelo propone niveles sonoros que están entre 7 y 13 dB(A) por encima de los registrados experimentalmente.

En cuanto a la evaluación del parámetro k que controla la atenuación con la distancia debemos considerar por un lado la atenuación debida a la divergencia geométrica y por otro lado la atenuación con la distancia incluyendo todas las pérdidas reales (divergencia geométrica, absorción del

Tabla 15

Tipo de Tren	V (km/h)	L (m)	L_0^{teo}	L_0^{exp}	$L_0^{teo} - L_0^{exp}$	K_0^{teo}	K_{3Hz}^{exp}	$K_{dB(A)}^{exp}$
Ave	275	200	101	87.9	13.1	15	11.6	19.7
Euromed	200	200	97	84.7	12.3	15	16.9	30.7
Talgo-2000	200	150	97	84.3	12.7	15	14.4	24.2
TALGO	200	135	97	88.9	8.1	15	17.0	39.9
Arco	200	125	97	90.0	7.0	15	18.5	35.8
Estrella	160	280	94	94.6	-0.6	12	15.2	40.8
Corto	160	80	94	82.0	12.0	17	19.4	38.1
Mercancías	100	350	89	85.6	3.4	12	15.2	32.1

terreno, absorción del medio, condiciones climatológicas...).

Para calcular la atenuación debida a la divergencia geométrica podemos considerar el valor obtenido en el ajuste para la banda de 63 Hz $K_{63\text{Hz}}^{\text{exp}}$. En la banda de 63 Hz (la menor considerada) las atenuaciones debidas a otros aspectos que no sean la propia atenuación por divergencia geométrica deben de ser mínimos, es por tanto el parámetro que más se acerca al hipotético $K_{\text{divergencia geométrica}}$. Podemos apreciar que el parámetro $K_{63\text{Hz}}^{\text{exp}}$ correlaciona perfectamente con la longitud del tren, a mayor longitud menor $K_{63\text{Hz}}^{\text{exp}}$.

Tabla 16

Tipo de Tren	Longitud (m)	$K_{63\text{Hz}}^{\text{exp}}$
Mercancías	350	15.2
Estrella	280	15.2
Euromed	200	16.9
Talgo	135	17
Arco	125	18.5
Corto	80	19.4
Ave	200	11.6
Talgo-2000	150	14.4

Se aprecian diferencias claras entre los valores $K_{63\text{Hz}}^{\text{exp}}$ encontrados para las mismas longitudes en los dos emplazamientos de medida. En la línea Barcelona-Valencia el emplazamiento de medida estaba cubierto por maleza alta (1m) y poco tupida y las medidas se realizaron con temperaturas cercanas a los 20 °C, mientras que en la línea Madrid-Sevilla el emplazamiento de medida estaba desprovisto de vegetación y las medidas se realizaron con temperaturas cercanas a 10°C.

En la banda de 63 Hz (la menor considerada) las atenuaciones debidas a otros aspectos que no sean la propia atenuación por divergencia geométrica deben de ser mínimos, es por tanto el parámetro que más se acerca al hipotético $K_{\text{divergencia geométrica}}$. Podemos ver en la tabla que los valores teóricos y experimentales están próximos pero no coinciden plenamente. La atenuación con la distancia incluyendo todas las pérdidas reales viene dada por el valor obtenido en el ajuste en término de dB(A) $K_{\text{dB(A)}}^{\text{exp}}$. El modelo francés sólo propone valores para la atenuación por divergencia geométrica con lo que este valor no podrá ser evaluado, pero resulta interesante calcularlo.

Por último nos quedará estudiar el grado de validez de la expresión que calcula el tiempo de exposición, o lo que es lo mismo el tiempo en que el nivel sonoro registrado está comprendido entre el nivel sonoro máximo y el nivel sonoro

máximo menos 10 dB(A). Para evaluar la validez de la expresión utilizada por el modelo francés hemos ajustado nuestros datos experimentales utilizando la misma expresión, pero fijando la velocidad y la longitud de cada uno de los tipos de tren, es decir, cada uno de los tipos de tren medidos presenta una única velocidad y longitud con lo que podemos ajustar nuestros datos por medio de una recta como:

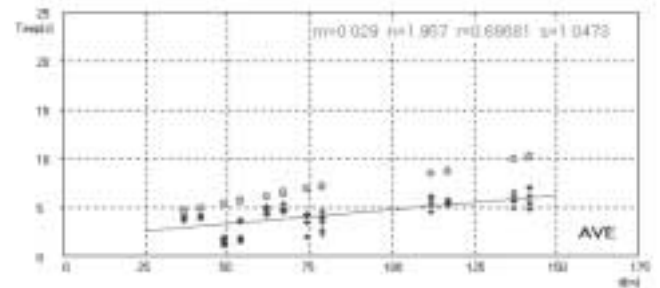
$$T_e = n_0 \frac{l}{v} + md$$

donde $n_0=3.6$ y $m = 0.06$ en el modelo francés. Si la longitud del tren l y la velocidad v de paso son únicas (l y v son constantes) para cada tipo de tren tenemos que la anterior expresión se transforma en la expresión de una recta:

$$T_e = n + md$$

En la siguiente figura mostramos como ejemplo el ajuste obtenido para el AVE, y a continuación una tabla con los valores obtenidos para los diferentes tipos de trenes estudiados.

Debemos recordar que según el modelo francés las constantes n_0 y m deberían ser independientemente del tipo de tren y tener unos valores de $n_0=3.6$ y $m=0.06$.



El caso de los trenes de mercancías no podemos aplicar el mismo criterio ya que dentro del grupo de trenes de mercancías se han registrados configuración dispares, presentándose desde trenes muy cortos de 170 m a trenes muy largos 480 m, y con un intervalo de velocidades entre 84 km/h a 117 km/h.

Tabla 17

Tipo de Tren	n_0	m	r	s
AVE	2.69	0.029	0.69	1.05
EUROMED	3.33	0.056	0.64	2.35
TALGO-2000	4.45	0.026	0.89	0.44
TALGO	0.72	0.048	0.79	1.33
ARCO	1.96	0.046	0.82	1.17
ESTRELLA	0.47	0.071	0.76	2.12
CORTO	1.43	0.069	0.85	1.44

5. Conclusiones

El objeto de este trabajo, además de la caracterización de los niveles sonoros de los trenes que circulan en la actualidad por la red ferroviaria española, es la evaluación y actualización del modelo francés publicado en Guide du Bruit [1]. La evaluación de los datos experimentales mediante el modelo francés ofrece como clara conclusión que los datos utilizados en este modelo deben actualizarse para el caso actual español. Se puede apreciar que exceptuando el tipo de tren ESTRELLA, en donde el nivel de referencia L_0 propuesto por el modelo es correcto (una diferencia de 0.6 dB(A)), en el resto de tipos de tren los valores de referencia L_0 propuestos son entre 7 dB(A) y 13 dB(A) mayores a los medidos experimentalmente.

El modelo francés considera unas atenuaciones con la distancia en donde sólo se consideran las pérdidas por divergencia geométrica, para poder evaluar este parámetro hemos utilizado el parámetro $K_{63\text{Hz}^{\text{exp}}}$ ya que en la banda de 63 Hz las pérdidas sonoras debidas a cualquier otro factor deben ser las mínimas posibles. Los valores propuestos por el modelo son algo inferiores a los obtenidos para el parámetro $K_{63\text{Hz}^{\text{exp}}}$.

En cuanto a los tiempos de exposición, podemos concluir que los valores teóricos propuestos por el modelo francés son

de forma sistemática superiores a los medidos experimentalmente. En los trenes del tipo CORTO, ARCO y EURO-MED las diferencias son mínimas entre 2 y 3 segundos, pudiéndose considerar como razonables los valores propuestos por el modelo. En el resto de trenes los valores medidos están claramente desplazados con respecto de los valores propuestos por el modelo con diferencias que en la mayoría de los casos superan los 5 segundos.

El modelo francés es un modelo extremadamente sencillo y fácil de utilizar, pero la evolución de las unidades ferroviarias con mayores velocidades de circulación hacen necesario actualizarlo con medidas sonoras para poder seguir utilizándolo. El inconveniente que presenta este tipo de modelos es que no podemos considerar con ellos los nuevos trenes de alta velocidad que circularán los próximos años. Evidentemente el basar un modelo teórico en medidas experimentales, hacen que los niveles predichos no sean fiables en todos aquellos trenes no considerados en las medidas y que presenten características significativamente diferentes con los medidos (mayores velocidades, diferentes sistemas de tracción, diferentes diseños aerodinámicos...).

Referencias.

- [1]. Guide De Bruit. Ministere de l'environnement et du cadre de vie. Nov. 1980.