



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

ESTUDIO DE RUIDO DEL FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD ENTRE LA MECA Y MEDINA (HARAMAIN HIGH SPEED RAILWAY NOISE STUDY)

PACS: 43.50.Rq.

Grijota Chousa, Juaco¹; Berd Gómez, Rachid².

¹ Juaco Grijota, consultor ambiental
Canal de Isabel II, 14. 28189 Patones (Madrid). España
Tel:+34 667 655 281
E-Mail: juaco@juacogrijota.es

² Consultrans
Serrano, 10. 28001 Madrid. España
Tel:+34 91 575 46 16
E-Mail: rachid.berd@consultrans.es

Palabras Clave: mapa de ruido, ferrocarril, alta velocidad, Arabia Saudí

ABSTRACT

The noise map of the high speed line between Makkah and Madinah (Saudi Arabia) is presented, 450 km long, made with European standards to comply with the Saudi norm of protection against noise. Technical aspects are detailed (cartographic bases, construction of the 3D model, rolling stock, impact treatment, corrective measures) and the peculiarities of the work.

RESUMEN

Se presenta el mapa de ruido de la línea de alta velocidad entre La Meca y Medina (Arabia Saudita), de 450 km de longitud, realizado con estándares europeos para dar cumplimiento a la norma saudí de protección frente al ruido. Se detallan aspectos técnicos (bases cartográficas, construcción del modelo 3D, material rodante, tratamiento de impactos, medidas correctoras) y las peculiaridades del trabajo.

INTRODUCCIÓN

La línea de alta velocidad *Haramain High Speed Railway* (HHSR, 445 km más un ramal de 8 km a aeropuerto), entre las ciudades santas y de peregrinación para los musulmanes de La Meca y Medina, está diseñada para facilitar los viajes en este corredor religioso de importancia internacional, pasando por la metrópolis de Yeda que, con 3,8 millones de habitantes (3,4 en la propia ciudad), es el principal polo económico de la costa oeste de la península arábiga y cuenta con aeropuerto internacional (*KAIA airport*). El organismo responsable de la infraestructura es la compañía estatal *Organización de Ferrocarriles Saudí* (SRO).

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre



Ilustración 1. Localización de la línea ferroviaria

El proyecto se ha diseñado en 2 fases, la primera, en la que participan compañías saudíes junto a varias europeas y chinas, cubre la construcción de la plataforma y las estaciones. La segunda fase consiste en la ejecución de la superestructura, puesta en servicio de la línea y suministro del material rodante, así como la operación de la línea durante 12 años prorrogables a 17. Ha sido adjudicada a un consorcio hispano-saudí, *Al Shoula Group*, en el que participan varias empresas españolas: ADIF, Renfe Operadora, INECO, Talgo, Cobra, Consultrans, Copasa, Dimetronic, Inabensa (Abengoa), Imathia, Indra y OHL. Consultrans es la encargada de la vigilancia ambiental de las obras, incluyendo el control del ruido generado en el futuro por el tráfico ferroviario.

El estudio acústico de la línea de alta velocidad ha sido realizado entre los años 2014 y 2016. Dentro de las mejoras de la oferta del Consorcio Al Shoula se incluyó la realización de un mapa de ruido del proyecto de tren con los estándares europeos de control de la contaminación acústica [1]. Esta cuestión es clave, dado que la norma saudí de lucha contra la contaminación acústica [2] exige expresamente a las infraestructuras públicas ferroviarias de verse sometidas a control de sus emisiones acústicas.

MARCO LEGAL DE ACTUACIÓN

El reglamento de ruido saudí [3] contempla en su artículo IV *Community noise* proteger la calidad de vida de los ciudadanos.

IV.1.a) *Ruido de vecindario* se define como el ruido emitido por todas las fuentes excepto las de carácter industrial. Se contemplan fuentes tales como locales comerciales (incluidos

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18- 24 al 26 de octubre

restaurantes, cafeterías y lugares de velada), sistemas de ventilación, vecindario, eventos deportivos, transporte y procesos de fabricación livianos en áreas residenciales.

Se definen tres zonas acústicas según la sensibilidad de uso:

- A - Zonas tranquilas
- B - Áreas mixtas
- C - Áreas no sensibles

Designation	Day $L_{Aeq,T}$ (dB)	Evening $L_{Aeq,T}$ (dB)	Night $L_{Aeq,T}$ (dB)
A	50	45	40
B	55	50	45
C	60	55	50

Tabla 1. Límites de ruido exterior en campo libre permitidos para el ruido de vecindario, medidos en cualquier propiedad sensible al ruido dentro de la denominación del área apropiada

Los límites presentados en esta tabla se aplican tanto para fuentes de ruido individuales como para la emisión simultánea de una combinación de fuentes de sonido. Los períodos de referencia establecidos por las regulaciones estatales son los siguientes: *Día*: el período entre las 7.00 y las 19.00 h; *Tarde*: el período entre las 19.00 y las 23.00 h y *Noche*: el período entre las 23.00 y 7.00 h.

Las áreas A son las más restrictivas ya que están asociadas con usos que requieren tranquilidad (centros de culto, atracciones turísticas, terrenos de parques recreativos y aquellas áreas que rodean escuelas, hospitales y hábitats naturales sensibles al ruido). El tipo B es principalmente para zonas residenciales (incluidos albergues y hoteles), y el tipo C especifica áreas mixtas donde se encuentran viviendas y negocios.

Los municipios saudíes atravesados por HHSR no contaron en el momento del estudio con una zonificación acústica definida de sus territorios, lo que significa que esta cuestión solo pudo ser resuelta por el uso predominante de los edificios potencialmente afectados. En general, el Tipo C es el que mejor se adapta a la realidad de las áreas urbanas en contacto con la traza y es el seleccionado para proteger a la población de los impactos de ruido de HHSR.

Los límites estipulados en la regulación nacional saudí para el tipo C contemplan los mismos valores límite utilizados en Europa para nuevas infraestructuras ferroviarias en áreas residenciales para períodos diurno y nocturno [4] y, en correspondencia con la misma zonificación, son más restrictivos en el periodo *Tarde*.

Hay un caso particular en el diseño de la actuación, para el cual el ruido de carretera también ha sido modelado. Este es el tramo de HHSR compartido con la autopista de gran capacidad *Haramain Road* dentro de la ciudad de Yeda (Pk. 80-110, 3 a 5 carriles por sentido), donde la línea de tren discurre por la mediana de la carretera. El objetivo en este caso ha sido determinar la responsabilidad del ruido vial percibido por los receptores adyacentes en el estado "preoperativo", es decir, existente a día de hoy, antes de que entre en funcionamiento el proyecto HHSR. En ese momento, la responsabilidad por el ruido incidente en los edificios adyacentes a la traza se compartirá entre las dos fuentes, la carretera y el ferrocarril. Para caracterizar el ruido de la carretera se tomaron mediciones de ruido a pie de la carretera con un sonómetro de clase I y, una vez calculada la potencia acústica de la fuente con el apoyo de aforos de tráfico, se aplicó al modelo de propagación.

Se ha marcado como objetivo que la adición del ruido del tren al ruido de fondo existente, generado por el tráfico de la autopista no debe exceder en más de 3 dBA los niveles de ruido incidente en fachadas de uso sensible (residencial o de culto) expuestas en el tramo en cuestión, ya que excediendo este rango, el ruido se duplicaría. A nivel europeo, este criterio se aplica en los casos en que pueden producirse efectos sinérgicos entre las fuentes. Si en el modelo se superan como rango aceptable los 3 dBA de ruido incidente en fachada, el gestor

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

del tren, que se está incorporando como fuente sonora después de la carretera, sería responsable de presentar su propia medida correctora dentro del segmento compartido.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los datos propios del proyecto fueron facilitados por el equipo de ingeniería y la operadora del del Consorcio:

- Levantamiento topográfico propio del proyecto a escala 1:5000 (fase 1), equidistancia de las curvas de nivel: 0,5 m.
- Planos en 3D de la plataforma, incluyendo puentes y viaductos.
- Material rodante: configuración típica de 2 cabezas tractoras y 13 vagones.
- Velocidades. Gráficas de velocidad, 300 km/h es la velocidad máxima de proyecto.
- Tráfico en estaciones. Velocidad máxima 40 km/h.
- Obstáculos: Edificaciones situadas a menos de 500 m del eje de la traza, incluyendo nº de pisos y el uso principal.
- Aforos de tráfico de la autopista *Haramain Road*. Se cuenta con dos aforos, uno en la parte central de Yeda, con cerca de 200.000 vehículos diarios, un 15% de pesados y una velocidad media de 51 km/h (se permiten 100 km/h, lo que da una idea de su gran calibre y su saturación constante), y otro en los suburbios del norte de la ciudad, con unos 20.000 vehículos diarios (15% de pesados) y 89 km/h de velocidad media.
- Datos de superestructura. La mayor parte de HSR discurre sobre bloques de cemento en cama de balasto, existiendo vía en placa en determinadas zonas con dunas de arena, enlace con el aeropuerto KAIA y estaciones.

TRAIN TRAFFIC

SECTION	DAY PERIOD	EVENING PERIOD	NIGHT PERIOD
Makkah-Jeddah	103.1	27.4	8.3
Jeddah-KAIA south node	106.1	29.7	9.1
KAIA south link	30.6	8	1.8
Internode Jeddah-KAEC	72.7	19	6.4
KAIA-KAEC north link	23	8	1
KAIA north node -KAEC	95.7	27	7.4
KAEC-Madinah	46.9	14	4.6

Tabla 2. Tráfico de trenes circulando por el eje de la traza en un día típico (ida+vuelta)

Una de las dificultades encontradas ha sido la falta de una base cartográfica oficial de la que extraer un modelo digital del terreno a escala adecuada para poder cubrir un pasillo mínimo de 500 m a cada lado del eje del trazado, dado que el levantamiento topográfico propio es de menor amplitud, insuficiente para cubrir de forma correcta la propagación del ruido en todo el ancho de banda. Para solventarlo se ha acudido al modelo ASTER Global DEM [5]. El tamaño de píxel proporcionado por esta fuente es de 25x25 m y el contorno obtenido de este modelo digital de elevaciones es de 2 m de equidistancia entre curvas de nivel.

Para evitar errores en el escenario debido a la superposición del DEM de ambas fuentes (topografía propia y ASTER), se establece un área de transición neutra de 20 m de ancho entre ambos modelos.

Así mismo, los edificios existentes a una distancia mínima de 350 m de la traza no cubiertos por el levantamiento topográfico propio se han digitalizado en un Sistema de Información Geográfica (GIS) utilizando mapas BING como base [6]. En los trabajos de campo realizados por Consultrans se han comprobado sus alturas y el uso.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Los detalles tridimensionales (3D) de HHSR y las secciones de plataforma adaptadas para su incorporación al terreno actual, tales como movimientos de tierra (taludes, terraplenes y trincheras) se han obtenido a partir de los planos de planta y los perfiles de proyecto de HHSR, proporcionados por el equipo de diseño de la Fase 1 y validados por la Fase 2.

Software de cálculo: *Predictor-LimA 9.11* de Softnoise, con soporte de Brüel & Kjaer.

Modelos de cálculo aplicados

Tráfico ferroviario. Método de cálculo neerlandés "Standaard-Rekenmethode II" (SRM-II), publicado por el Ministerio de Vivienda y Planificación Territorial, 20/11/1996 en «Reken-en Meetvoorschrift Railverkeerslawai'96» (Guías para el cálculo y medición del ruido del transporte ferroviario 1996). Las categorías acústicas aplicadas a los trenes de HHSR, según el modelo holandés, son la nº 8 (intercity con frenos de disco) para trenes circulando por debajo de 160 km/h y la nº 9 (alta velocidad) para velocidades superiores. La aplicación del método de cálculo SRM-II requiere la entrada del número total de unidades de cada categoría de tren (parámetro Q_c) en la composición de referencia de los diferentes modelos del tren de alta velocidad español [7], lo que ha permitido el ajuste optimizado de los niveles de ruido que surgen con la categoría asignada.



S-102

S-112

Ilustración 2. Modelos españoles de locomotora equivalentes al material rodante de HHSR

Tráfico de carretera. El método para calcular los niveles de sonido para el ruido del tráfico es el método de cálculo nacional francés "NMPB-Routes-96 (SETRA-LCPC-CSTB-CERTU)" mencionado en el "Arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières, Journal du 10 mai 1995, artículo 6", y el estándar francés XPS 31-133.

En ambos casos se trata de los métodos provisionales de cálculo contemplados en la recomendación de la Comisión Europea [8], corrección de condición a largo plazo.

Otros datos de tipo técnico aplicados al modelo: Absorción del suelo por defecto ($G=0,4$), reflexión de los edificios por defecto $R=0,79$, 1 orden de reflexión, altura de la malla de receptores 4 m, paso de la malla de receptores 10 m, condiciones favorables de propagación según recomendación de la UE (Día: 50%; Tarde 75%; Noche 100%). Los datos meteorológicos han sido obtenidos del estudio de impacto de HHSR (no publicado): Yeda: 27.7°C, humedad relativa 59%, Medina: 28.0°C, HR 29%, La Meca: 30.7°C, HR 47%.

RESULTADOS

Los resultados de la campaña de medición realizada para la calibración del modelo de carretera han indicado que el ruido emitido por el tráfico rodado es mayor que el correspondiente al modelo con la intensidad y velocidad media del aforo, ello es debido a la existencia de bandas longitudinales de alerta en cada carril, lo que eleva el nivel de ruido significativamente al cambiar de carril. Por esta cuestión se ha penalizado la fuente sonora con 3 dBA.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

A lo largo de toda la ruta HHSR, se han tomado en consideración 4.336 edificios individuales en el búfer de 350 m a cada lado del eje de la línea central. Se han agrupado en 1.495 bloques homogéneos (mismo uso, misma altura) en el escenario al que se aplica el modelo de ruido. Sus características detalladas son:

- Vivienda: 3.258 edificios residenciales, agrupados en 1.020 bloques, repartidos casi al 50% entre edificios multifamiliares unifamiliares. Esta es la clase más abundante en el búfer (el 75% de los edificios individuales y alrededor de dos tercios de todos los bloques tienen este uso). El 77% de los edificios residenciales se concentran en el área metropolitana de Yeda (Pk. 65 a 121).
- Comercial: 537 edificios agrupados en 251 bloques en el escenario. Este uso es menos sensible al ruido que a la vivienda, incluso a veces actúa como una fuente de ruido y atrae el tráfico hacia ellos mismos.
- Industria: 481 edificios agrupados en 175 bloques. Por su uso no se consideran receptores sensibles y sirven como obstáculos para la propagación del ruido en el modelo.
- Centro de salud: 2 edificios ubicados en la ciudad de Yeda.
- Centro de culto: 48 mezquitas agrupadas en 44 bloques. Están particularmente concentrados en la ciudad de Yeda (44 edificios agrupados en 41 bloques), pero también se han localizado 3 en La Meca (dos bloques) y otro edificio en Medina.
- Educativo: 10 edificios agrupados en 3 bloques, todos dentro de la ciudad de Yeda.

Las tres últimas categorías son usos de máxima sensibilidad frente al ruido.

Mapas de conflicto

Las áreas de conflicto son aquellas superficies donde el modelo indica que los valores límite de la inmisión pueden excederse potencialmente. Se marcan en los contactos con las líneas de fachada de los edificios (receptores sensibles) situados a menos de 350 m del eje de HHSR.

Cada isófona en contacto con el perímetro de los edificios indica el nivel de ruido incidente más el ruido reflejado. Los mapas incorporan una leyenda que indica un "posible" impacto en la fachada. La palabra "posible" se acentúa porque, como se ha mencionado, el nivel de ruido indica "ruido incidente + ruido reflejado", y no es hasta que se realiza un análisis de ruido con receptores específicos ubicados en fachada cuando se delimita el impacto real, que está causado solo por el ruido incidente.

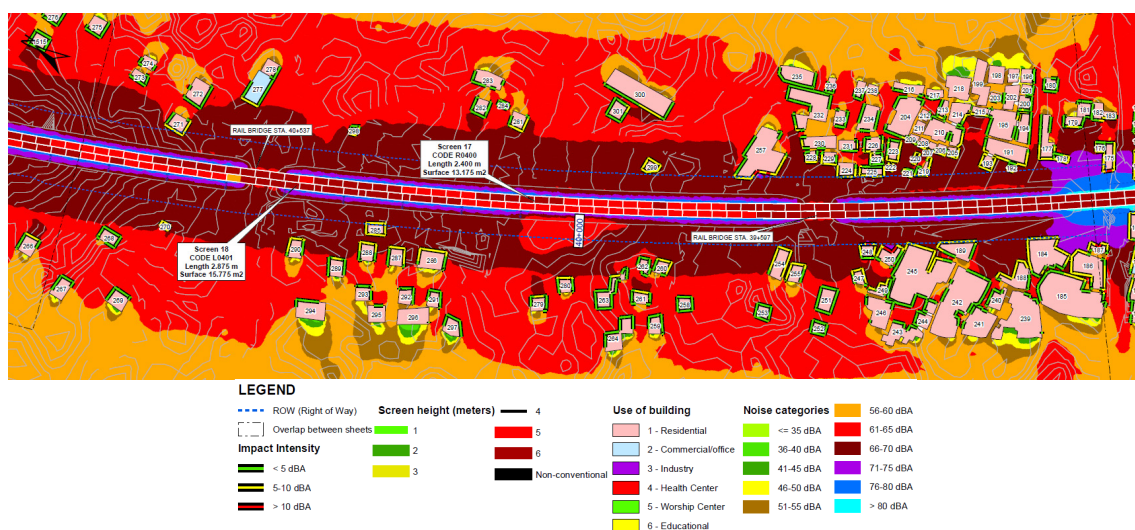


Ilustración 3. Mapa de ruidos y propuesta de medidas

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

La concentración principal de impactos potenciales en receptores se localiza en el tránsito de HHSR por la ciudad de Yeda, especialmente en los dos extremos de la ciudad, justamente por donde el tren circula a mayores velocidades alejado de la estación. Debe tenerse en cuenta que la extensión de la metrópolis de Yeda supera los 50 km de línea férrea, pues se trata del típico modelo moderno de urbanismo expandido. También existe una importante afección, por su intensidad más que por el nº de habitantes afectados, en la localidad suburbana de Bahrah, situada entre La Meca y Yeda. En este lugar la velocidad del tren es de 300 km/h.

Grade	Intensity of impact	Ld	Le	Ln	Summa
1	Less than 5 dBA	593	737	554	1,884
2	5-10 dBA	352	641	498	1,491
3	More than 10 dBA	7	235	27	269
TOTAL		952	1,613	1,079	3,644

Tabla 3. Resumen de impactos en los receptores (*) por nivel de ruido

(*) Las baterías de los receptores ubicados en fachadas de edificios no coinciden con el número de edificios, pues se asigna un receptor por piso.

Del total de 1.495 bloques construidos que se consideran en el buffer de traza, 624 (42%) se ven afectados al exceder los niveles de ruido de los límites. La *Tarde* es el período en el que se produce la mayor cantidad de impactos y los casos que superan los 10 dBA.

La alta intensidad del impacto (grado 2 y sobre todo grado 3) requiere barreras de ruido significativamente más altas, estableciendo el límite técnico en 6 m de altura para pantallas verticales simples. También se puede complicar o hacer técnicamente inviable en otros casos las posibilidades de medida correctora en el entorno de la fuente, especialmente en puentes o en áreas donde la plataforma ferroviaria discurre a menor altura que el receptor (trincheras, taludes, etc.), una situación en la que se produce la exposición directa del receptor al emisor de ruido (como ocurre en los anfiteatros). En estos casos, se deben aplicar medidas correctoras en el receptor.

Los edificios más severamente afectados se concentran principalmente en los primeros 110 km de la ruta, en los tramos en los trenes superan los 160 km/h (suburbios de la metrópolis de La Meca y Yeda, coincidiendo con áreas de gran expansión urbana). Esta parte inicial de la ruta coincide así mismo con la mayor intensidad de tráfico de trenes (La Meca-Yeda).

También es digno de mención el efecto en los pisos superiores de algunos edificios altos de Yeda, ya que estos edificios requieren acciones en fachada al no ser viable construir pantallas que la protejan en su totalidad.

Impacto acumulativo

Dentro de la ciudad de Yeda (Pk. 76-110) se ha obtenido un mapa de ruido de *Haramain Road*, calibrado mediante la campaña de medición, para establecer los niveles de ruido existentes en los receptores ubicados en el tramo compartido entre HHSR y la carretera.

En el tramo de línea compartida con *Haramain Road* el efecto pantalla de las paredes de la plataforma HHSR es significativo para las emisiones de ruido de la carretera, ya que separan el ruido emitido por el tráfico de ambos sentidos. Sin embargo, sus efectos no alteran apenas el ruido de la propia HHSR, ya que la plataforma está elevada por encima de las calzadas. Las ruedas del tren permanecen a menos de 50 cm por debajo de la parte superior de esas paredes. El único tramo donde estos muros de seguridad producen un efecto de apantallamiento acústico se encuentra en los puntos de intersección entre las dos infraestructuras.



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Los resultados indican que el ruido proveniente de la adición de tráfico desde HHSR a la situación actual (exceder en 3 dBA) solo afecta a 16 edificios ubicados a lo largo del tramo final que cruza la ciudad, alrededor del Pk. 108 a 109 en el enlace de la línea de ferrocarril con la carretera.

Medidas correctoras

Dependiendo de la intensidad del impacto, se requieren medidas correctivas más exigentes, desarrolladas básicamente alrededor de la altura de las barreras acústicas. En el grado 3, la condición es grave y no siempre es posible encontrar soluciones con las mejores técnicas disponibles para mitigar el impacto en el transmisor, lo que significa que se deben considerar otras técnicas basadas en el aislamiento de los receptores.

Se ha aplicado la herramienta de optimización de pantallas del software de cálculo, sobre segmentos de 25 m de longitud y una altura máxima permitida de 6 m. Finalmente, para dar cumplimiento a la norma de referencia, se ha obtenido la necesidad de implementar 56 km de pantallas acústicas entre ambos lados de la traza, y una superficie total de apantallamiento de 226.000 m². Así mismo, se ha visto la necesidad de construir 200 m lineales de pantallas no convencionales. Como alternativa para este último caso, se ha planteado actuar sobre las fachadas de los receptores afectados mediante medidas de aislamiento acústico.

REFERENCIAS

[1] Directiva Europea 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. DO L 189 de 18/7/2002.

[2] Presidency of Meteorology and Environment (PME). General Environmental Regulations and Rules of Implementation (October, 15th 2001, specifically document number 1409-01).

[3] Presidency of Meteorology and Environment (PME). The General Environmental Standard for Noise (March, 24th 2012G). Environmental Standards. Environmental Noise.

[4] Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. BOE 254, de 23/10/2007.

[5] U.S. Geological Survey. Routine ASTER Global Digital Elevation Model. <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/> [consulta en línea 01/02/2014]

[6] BING Maps <http://www.bing.com/maps/> [consulta en línea 01-19/02/2014]

[7] ADIF. Caracterización de la emisión acústica de trenes utilizados en el sistema ferroviario español. Actualización 21/11/2012.

[8] Recomendación de la Comisión, de 6 de agosto de 2003, relativa a las orientaciones sobre los métodos de cálculo provisionales revisados para el ruido industrial, procedente de aeronaves, del tráfico rodado y ferroviario, y los datos de emisiones correspondientes. DO 212, de 22/08/2003.