CONAMA 2026

Medidas mitigadoras de ruido en infraestructuras lineales: decisión multicriterio mediante Python y QGIS

Una herramienta en Python y QGIS basada en CNOSSOS-EU para el anteproyecto de ferrocarriles y carreteras

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor principal de la comunicación: Juan Casteres Cortiñas. Estudiante del Grado en Ingeniería Civil y Territorial. ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

Otros autores: Rodrigo Ladrón de Guevara Solera. Estudiante del Grado en Ingeniería Civil y Territorial. ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

Índice

Resumen 1

1. **Introducción** 2
2. **Objetivos** 3
3. **Marco normativo y método de cálculo** 3
4. **Descripción de la herramienta** 4
5. **Verificación** 12
6. **Casos de aplicación** 13
7. **Discusión y limitaciones** 22
8. **Conclusiones y líneas futuras** 23

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial 24

Bibliografía 24

Resumen

Este trabajo nace de una asignatura del grado de Ingeniería Civil y Territorial de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid. Al estudiar cómo limita Japón el ruido del Shinkansen y comparándolo con las medidas aplicadas en el ferrocarril español, surgió la pregunta de fondo: ¿cómo decide un ingeniero qué medida de mitigación de ruido conviene en un tramo concreto antes de encargar un estudio acústico completo? No se encontró una herramienta abierta que uniera el cálculo acústico normativo con la comparación y elección de medidas, y se optó por construirla. Los autores no son especialistas ni se dedican profesionalmente a la acústica: el resultado procede de la curiosidad y del interés del grupo por profundizar.

Se presenta un programa en Python, integrado en QGIS, que evalúa y compara medidas de mitigación del ruido de infraestructuras lineales (ferrocarril y carretera) en las fases iniciales de proyecto. A partir de las capas habituales de un proyecto (eje de la infraestructura, tráfico y edificación catastral), aplica el método CNOSSOS-EU en la versión vigente en España (Anexo II del RD 1513/2005 y sus modificaciones de 2018 y 2022): emisión de trenes y vehículos de carretera, propagación por bandas de octava con efecto suelo, difracción y reflexiones en pantallas, e índices Lden, Ld, Le y Ln. Con ello genera el mapa estratégico de ruido, asigna la población a las fachadas de los edificios, comprueba los objetivos de calidad acústica del RD 1367/2007 y traza la frontera del límite legal.

El cálculo se repite para un catálogo de medidas modelizadas físicamente (pantallas, tratamiento de vía, pavimentos, velocidad, flota y suelo absorbente) y para sus combinaciones, necesarias cuando concurren varias fuentes. Las alternativas se ordenan mediante un análisis multicriterio con pesos libres (población afectada, severidad del exceso, usos sensibles, integración urbana y coste de inversión), contrastado con TOPSIS. Una simulación de Monte Carlo mide la estabilidad de la recomendación.

El núcleo de cálculo es independiente de QGIS y está cubierto por más de 280 pruebas automáticas. Frente a los casos de ensayo ISO/TR 17534-4 y a NoiseModelling, las diferencias son inferiores a 0,1 dB en los casos comparables, salvo una diferencia de interpretación normativa, documentada, en el ruido de impacto. Cada dato remite a su fuente y la estructura modular permite añadir fuentes, medidas o criterios. La herramienta no busca sustituir el estudio acústico de detalle: ofrece un primer tanteo rápido, trazable y reproducible.

En un corredor sintético mixto, ninguna medida aislada consigue que un edificio cumpla, mientras que la combinación de pantallas en ambas infraestructuras reduce Ln en 9,9 dB. En un tramo real de la línea de alta velocidad Madrid-Zaragoza a su paso por Terrer (Zaragoza), dos edificios superan el objetivo diurno en 0,7 y 2,0 dB, dentro de la incertidumbre del método. Por ello, se recomienda confirmar el incumplimiento con mediciones antes de elegir entre dos pantallas a medida. Adicionalmente, se trata de una herramienta construida únicamente mediante datos abiertos.

Palabras clave: ruido ambiental; CNOSSOS-EU; QGIS; Python; infraestructuras lineales; mitigación del ruido; decisión multicriterio; mapa estratégico de ruido.

1. Introducción

El ruido ambiental es uno de los principales factores ambientales de riesgo para la salud en Europa. La Agencia Europea de Medio Ambiente estima que la exposición prolongada causa cada año unas 12 000 muertes prematuras y contribuye a 48 000 nuevos casos de cardiopatía isquémica, y que 113 millones de personas soportan niveles Lden de al menos 55 dB debidos al tráfico viario y 22 millones debidos al ferrocarril (EEA, 2020). El tráfico viario y el ferroviario son las principales fuentes de exposición al ruido.

En España, la Ley 37/2003 del Ruido se desarrolla en dos reglamentos complementarios. El RD 1513/2005 regula los mapas estratégicos de ruido y la exposición de la población mediante los índices Lden y Ln, y su Anexo II fija desde la Orden PCI/1319/2018 el método común europeo CNOSSOS-EU (Directiva (UE) 2015/996), modificado después por la Orden PCM/80/2022. El RD 1367/2007 establece la zonificación acústica, los objetivos de calidad y los valores límite de inmisión para infraestructuras nuevas, expresados en Ld, Le y Ln. Un proyecto de ferrocarril o de carretera debe, por tanto, calcular cuatro índices y compararlos con tablas distintas según se trate de una infraestructura nueva o existente.

Las medidas de mitigación pueden actuar en el origen (vehículo, vía, pavimento, velocidad), en la transmisión (pantallas, suelo) o en el receptor (aislamiento de fachada). En las fases iniciales de un proyecto, cuando todavía es posible elegir entre ellas, el ingeniero rara vez dispone del programa comercial y del tiempo que exige un estudio acústico completo, y es habitual recurrir a franjas de distancia fija o a criterios de experiencia. Además, la mejor medida acústica no siempre es la mejor solución: el rechazo municipal a las pantallas proyectadas entre València y Castelló obligó a Adif a redefinir el proyecto (Valencia Plaza, 2024; Castellón Plaza, 2025). La decisión es, en el fondo, multicriterio.

Existen herramientas abiertas para el cálculo del ruido ambiental. NoiseModelling implementa CNOSSOS-EU dentro de un SIG (Bocher et al., 2019). De igual manera, la elección de medidas se ha abordado con análisis coste-beneficio (CEDR, 2017) y con métodos multicriterio aplicados a la carretera (Ruiz-Padillo et al., 2016; D'Alessandro et al., 2022). Sin embargo, no se ha encontrado una herramienta abierta que reúna en el SIG del proyectista el cálculo según la normativa española, la comprobación de objetivos por tipo de área acústica y la comparación de medidas con una medida de la estabilidad de la recomendación. Las aportaciones son tres: CNOSSOS-EU verificado en Python dentro de QGIS, la evaluación automática de combinaciones de medidas y un análisis multicriterio con su estabilidad cuantificada.

Este trabajo surgió en una asignatura del grado universitario, al comparar el enfoque europeo, basado en niveles promediados a largo plazo, con el japonés para el Shinkansen, que limita el nivel máximo de cada paso. La herramienta que se presenta intenta responder, con el método oficial y con software abierto, a una pregunta práctica: cómo comparar de forma rápida, trazable y conforme a la norma las medidas posibles en un tramo concreto, automatizando la comparación de alternativas para el proyectista de una obra lineal.

2. Objetivos

El objetivo general es disponer de una herramienta de apoyo a la decisión, integrada en el entorno SIG del proyectista, que lleve el método oficial de cálculo hasta la elección de medidas. Los objetivos específicos son:

- **Rigor normativo:** determinar Lden, Ld, Le y Ln con CNOSSOS-EU en su versión vigente en España, calculando la emisión y la propagación, en lugar de asignar niveles por bandas de distancia fija.
- **Población y cumplimiento:** estimar los habitantes por banda de exposición, comprobando los objetivos acústicos por tipo de área acústica, y trazar la isolínea del valor límite o del objetivo de calidad aplicable.
- **Medidas modelizadas físicamente:** evaluar un catálogo de medidas y sus combinaciones en ferrocarril, en carretera y en corredores mixtos, considerando los parámetros aplicables a cada caso y su coste, con indicación de la fuente de cada dato.
- **Decisión transparente:** ordenar las alternativas con pesos libres, contrastar el resultado con un segundo método y medir su estabilidad.
- **Trazabilidad y escalabilidad:** que cada cifra remita a su dato, su fórmula y su fuente, y que la arquitectura del programa admita nuevas fuentes, medidas y criterios y se adapte a cada caso.

3. Marco normativo y método de cálculo

3.1. Índices y objetivos de calidad

El programa calcula los cuatro índices de ruido. Ld, Le y Ln son los niveles equivalentes a largo plazo de los periodos día (7-19 h), tarde (19-23 h) y noche (23-7 h). Lden se obtiene de ellos según el Anexo I del RD 1513/2005, que penaliza la tarde en 5 dB y la noche en 10 dB:

$$L_{\mathrm{den}} = 10\lg\left[\frac{1}{24}\left(12\cdot 10^{\frac{L_{\mathrm{d}}}{10}} + 4\cdot 10^{\frac{L_{\mathrm{e}}+5}{10}} + 8\cdot 10^{\frac{L_{\mathrm{n}}+10}{10}}\right)\right] \quad (1)$$

donde L_{d}, L_{e} y L_{n} son los niveles equivalentes a largo plazo de los periodos día, tarde y noche, respectivamente, en dB(A).

Los niveles se evalúan a 4 m de altura sobre el terreno. Para la población se usan receptores en las fachadas, como máximo cada 5 m, y los habitantes de cada edificio se reparten entre ellos (Anexo II, §2.8, del RD 1513/2005). La exposición se informa en bandas de 5 dB a partir de 55 dB en Lden y de 50 dB en Ln. El cumplimiento depende del caso, que el usuario elige al iniciar el cálculo: infraestructura nueva (valores límite de la tabla A1 del Anexo III del RD 1367/2007) o

situación existente (objetivos de calidad de la tabla A del Anexo II). El Cuadro 1 recoge ambas tablas.

Cuadro 1. Valores límite de inmisión para infraestructuras nuevas (tabla A1) y objetivos de calidad acústica para áreas urbanizadas existentes (tabla A), en dB(A).
Fuente: RD 1367/2007, Anexo III, tabla A1, y Anexo II, tabla A (texto consolidado, BOE).

Tipo de área acústica	A1: Ld	A1: Le	A1: Ln	A: Ld	A: Le	A: Ln
e) Uso sanitario, docente y cultural	55	55	45	60	60	50
a) Uso residencial	60	60	50	65	65	55
d) Uso terciario	65	65	55	70	70	65
c) Uso recreativo y de espectáculos	68	68	58	73	73	63
b) Uso industrial	70	70	60	75	75	65

3.2. El método CNOSSOS-EU

Para calcular esos índices, la normativa española adopta el método CNOSSOS-EU, que separa la **emisión** de la **propagación**. En el ferrocarril (§2.3), la potencia sonora por metro de vía se calcula por banda y para dos alturas de fuente (0,5 y 4,0 m) a partir de la rugosidad combinada de carril y rueda, de las funciones de transferencia de la vía y del vehículo y de las fuentes de impacto, chirrido, tracción y aerodinámica. Esta última se considera por encima de 200 km/h. En la carretera (§2.2), cada vehículo emite ruido de rodadura y de propulsión según su categoría, su velocidad, el pavimento, la temperatura, la pendiente longitudinal de la vía y la proximidad a intersecciones.

La propagación (§2.5) se calcula por bandas de octava de 63 Hz a 8 kHz para cada par fuente-receptor, con la fuente lineal dividida en fuentes puntuales equivalentes. Intervienen la divergencia geométrica, la absorción atmosférica (ISO 9613-1), el efecto del suelo, la difracción y las reflexiones, en condiciones homogéneas y favorables que se combinan según su probabilidad en cada periodo.

4. Descripción de la herramienta

4.1. Flujo de trabajo

El programa responde a una pregunta de anteproyecto: dado un tramo y su entorno edificado, ¿qué medida, o qué combinación de medidas, conviene, a cuánta población protege, cuánto cuesta y qué grado de seguridad ofrece esa recomendación? Para ello encadena seis etapas (Figura 1). Todas trabajan sobre copias de las capas del usuario, que nunca se modifican.

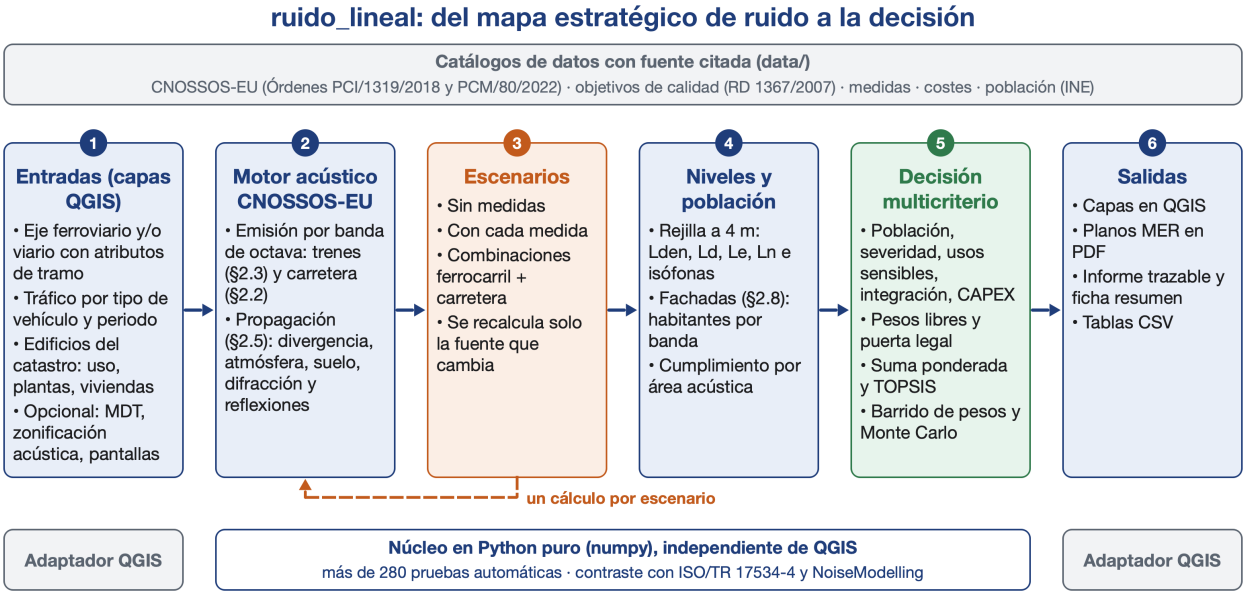


Figura 1. Flujo de cálculo del programa. Las etapas 2 a 5 forman el núcleo de cálculo. QGIS solo interviene al leer las entradas y al presentar los resultados. Cada escenario (sin medidas, con cada medida o con una combinación) se calcula con el mismo motor acústico.
Fuente: Elaboración propia.

4.2. Arquitectura y criterios de diseño

Para que cada etapa pueda probarse por separado, el núcleo físico y de decisión está escrito en Python puro con numpy y no depende de QGIS, lo que permite probarlo de forma automática. QGIS solo entra en los adaptadores de capas, estilos, interfaz e informes (Figura 2). Los datos normativos, los catálogos y los costes no están en el código, sino en archivos de datos donde cada valor lleva su fuente. Los que no se han podido verificar quedan marcados y el programa avisa al usarlos.

Antes de programar el motor acústico se valoró integrar NoiseModelling, la implementación abierta de CNOSSOS-EU de la Université Gustave Eiffel (2026). Se descartó como motor por tres razones. En primer lugar, requiere Java y una base de datos espacial y no se ejecuta en la consola de Python de QGIS. En segundo lugar, su base de material rodante es francesa. Los datos españoles debe aportarlos el usuario en ambos casos, y el programa los separa en archivos de datos con su fuente. Por último, la evaluación de decenas de escenarios para el análisis de sensibilidad exige un motor rápido y trazable dentro del propio programa. Se optó por reimplementar el método a partir del texto oficial y usar NoiseModelling como referencia independiente de verificación (apartado 5).

4.3. Datos de entrada

En cuanto a las entradas, los nombres de capa y de campo se definen en un archivo de configuración, no en el código. El programa reproyecta a un sistema métrico y se detiene con un mensaje claro si falta una capa, un campo o el sistema de referencia.

- **Eje de la infraestructura**, ferroviario, viario o ambos, con atributos de tramo: rugosidad de carril, tipo de vía, viaducto, pavimento, pendiente longitudinal o temperatura.

- **Tráfico** por tramo y tipo de vehículo, en vehículos por hora en día, tarde y noche.
- **Edificios del catastro**, con uso, altura o número de plantas y viviendas cuando existen.
- **Opcionales:** modelo digital del terreno, usos del suelo, zonificación acústica (tipos a-g) y pantallas existentes. Si faltan, se aplican los valores por defecto de la norma y el informe lo indica.

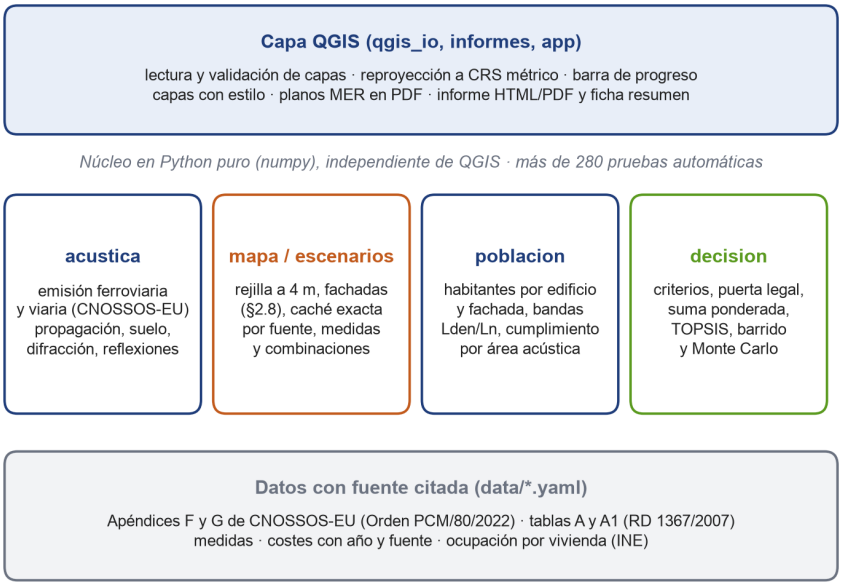


Figura 2. Arquitectura en capas del programa.
Fuente: Elaboración propia.

4.4. Motor acústico

A partir de esas entradas, el motor calcula la emisión y la propagación. La Figura 3 muestra dos resultados del módulo de emisión. En el vehículo de alta velocidad del ejemplo (Figura 3a), el ruido de rodadura es la fuente principal hasta unos 310 km/h, umbral a partir del cual pasa a predominar el ruido aerodinámico. Por ello, la renovación de flota y la reducción de velocidad tienen una eficacia distinta según el tramo de vía. En la carretera (Figura 3b), el pavimento drenante PA1 reduce a 90 km/h la emisión de cada vehículo en 1,9 dB(A) para los ligeros y en unos 3 dB(A) para los pesados, dentro de su intervalo de validez de 50 a 130 km/h.

La propagación incorpora el efecto del suelo, la difracción en pantallas, edificios y relieve, la primera reflexión en pantallas y las reflexiones múltiples entre el tren y la pantalla, que la Orden PCM/80/2022 introduce para pantallas próximas a la vía. Cuando hay ferrocarril y carretera, sus contribuciones se suman energéticamente en cada receptor y periodo, según la ecuación (2):

$$L = 10\lg\left(\sum_{k=1}^{K} 10^{\frac{L_k}{10}}\right) \quad (2)$$

donde L_k es el nivel de presión sonora, en dB(A), que aporta la fuente k en el receptor y K es el número total de fuentes que se combinan. Dado que la energía acústica con ponderación A es aditiva, el programa almacena la contribución de cada infraestructura sobre cada fachada. De este modo, en los escenarios en los que solo varía la emisión de una de las fuentes, recalcula únicamente esa componente, con un resultado idéntico al del cálculo completo y en menos tiempo.

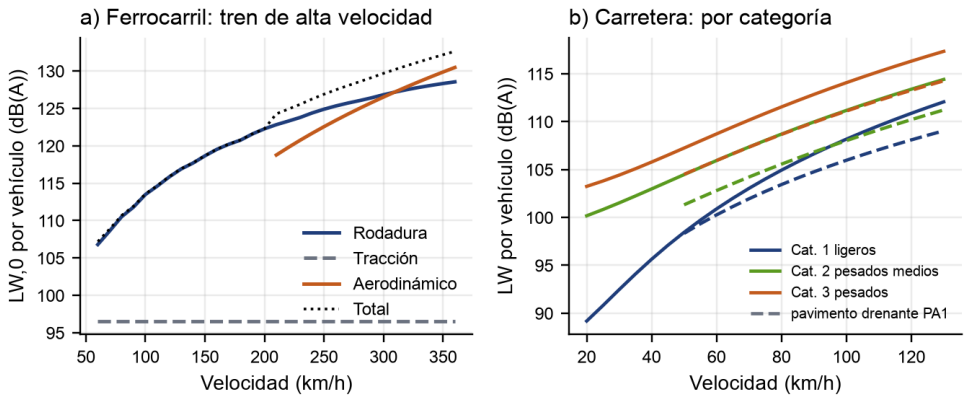


Figura 3. Emisión por vehículo en función de la velocidad: a) componentes de un tren de alta velocidad de ejemplo sobre vía con rugosidad media; b) categorías de carretera sobre el pavimento de referencia y sobre pavimento drenante PA1, en su intervalo de validez de 50 a 130 km/h.
Fuente: Elaboración propia con el programa (cuadros F y G de la Orden PCM/80/2022).

El tiempo de cálculo se concentra en la propagación. Para reducirlo sin alterar los resultados, el programa aplica dos técnicas. En primer lugar, las atenuaciones de cada trayecto entre la fuente y el receptor no dependen de la emisión. Por ello, las medidas que solo modifican la emisión (vía, flota, velocidad o pavimento) se evalúan todas en una única pasada de propagación. En segundo lugar, el cálculo de cada receptor es independiente del resto, de modo que los receptores pueden repartirse entre varios núcleos del procesador y calcularse de forma simultánea. En ambos casos, las pruebas automáticas comprueban que el resultado coincide exactamente con el del cálculo secuencial.

4.5. Catálogo de medidas y combinaciones

Sobre ese mismo motor se evalúan las medidas. Cada una modifica el término físico que le corresponde (Cuadro 2): las pantallas y las franjas de suelo modifican la propagación, y las medidas de vía, flota, velocidad y pavimento, la emisión. El aislamiento de fachada actúa sobre el nivel interior, no sobre el exterior, y se evalúa aparte como último recurso. El coste de inversión (CAPEX) de cada medida se obtiene como producto del coste unitario por la medición, con el precio de cada fuente actualizado a euros de 2025 mediante el índice de precios de consumo armonizado (IPCA) de Eurostat (2026), según la ecuación (3):

$$\mathrm{CAPEX} = \sum_{p} c_p \cdot q_p \cdot \frac{\mathrm{IPCA}_{2025}}{\mathrm{IPCA}_{a_p}} \qquad (3)$$

donde c_p es el coste unitario de la partida p en euros del año a_p de su fuente, q_p su medición (metros de pantalla, kilómetros de vía, vagones o metros cuadrados de pavimento) e IPCA el valor del índice en el año indicado. En las pantallas, el coste por metro crece linealmente con la altura h, $c = a + b \cdot h$, con los coeficientes a y b de la fuente citada en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Catálogo de medidas evaluadas.
Fuente: Elaboración propia; costes en data/costes.yaml.

Medida	Obra	Término que modifica	Coste unitario (fuente)
Pantalla de 3 m absorbente (A3)	FC / CA	Difracción y reflexión	€/m según altura (Clausen et al., 2012)
Pantalla baja junto al carril (0,75 m)	FC	Difracción	€/m (Scossa-Romano y Oertli, 2012)
Amolado acústico del carril	FC	Rugosidad de carril	€/km (estimación de los autores, sin fuente verificada)
Lubricación en curvas	FC	Chirrido	sin coste con fuente
Almohadilla rígida (M/H)	FC	Transferencia de la vía	sin coste con fuente
Zapatas de material compuesto	FC	Rugosidad de rueda	€/vagón (Clausen et al., 2012)
Reducción de velocidad (−20 km/h)	FC / CA	Emisión según velocidad	sin inversión (explotación no incluida)
Franja vegetal de 20 m	FC	Suelo absorbente (G = 1)	€/planta (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024)
Pavimento drenante PA1 o capa fina A	CA	Corrección de pavimento	€/m² (CEDR, 2017)
Restricción nocturna de pesados	CA	Tráfico de categorías 2 y 3	sin inversión (explotación no incluida)
Aislamiento de fachada	—	Nivel interior (DB-HR; MITMA, 2019)	€/vivienda (Clausen et al., 2012)

En los corredores de transporte mixtos, donde coexisten infraestructuras ferroviarias y viarias, una medida de mitigación aislada suele resultar insuficiente, ya que solo actúa sobre una de las fuentes emisoras de ruido. Para abordar esta limitación y evaluar el efecto conjunto, el programa genera de forma automática escenarios combinados. Por defecto, empareja una actuación ferroviaria con una viaria, siempre que la atenuación de cada medida por separado supere un umbral de 0,1 dB. Adicionalmente, el usuario puede definir otras combinaciones.

Las medidas del catálogo se aplican por defecto a todos los tramos y a ambos lados del eje. Cuando la afección se concentra en un punto, esa disposición sobredimensiona la actuación y su coste. Para evitarlo, el proyectista puede definir medidas propias del proyecto, por ejemplo una pantalla situada únicamente en el lado de los edificios afectados y con una longitud acotada frente a ellos. El coste se mide siempre sobre la actuación resultante.

La reducción de velocidad y la restricción de pesados no requieren inversión, pero sí tienen un coste de explotación (tiempo de viaje, capacidad y desvío del tráfico) que la versión actual no incluye. Por ello, el criterio de coste las favorece de forma sistemática y su posición en el ranking debe leerse como un límite superior.

Durante este proceso, el programa descarta las actuaciones físicamente incompatibles o mutuamente excluyentes, como la instalación de dos pantallas acústicas en una misma alineación o la aplicación de dos pavimentos distintos en un mismo tramo. En cuanto a la viabilidad económica, el coste de inversión (CAPEX) de cada combinación se calcula de forma aditiva, como suma de los costes de sus componentes. De igual manera, su valoración de integración urbana se obtiene sumando las bonificaciones y penalizaciones paisajísticas de cada actuación.

4.6. Población, cumplimiento y frontera legal

Una vez calculados los niveles, los habitantes de cada edificio residencial se estiman según el Anexo II, §2.8, del RD 1513/2005. Si se conoce el número de viviendas, se aplica la ecuación (4). En caso contrario, la superficie útil se deduce de la construida y se divide entre la superficie útil por habitante, según la ecuación (5):

$$\mathrm{Inh} = N_{\mathrm{viv}} \cdot o_{\mathrm{m}} \tag{4}$$

$$\mathrm{Inh} = \frac{0{,}8 \cdot A \cdot N_{\mathrm{pl}}}{\mathrm{FSI}} \tag{5}$$

donde N_{viv} es el número de viviendas y o_{m}, la ocupación media por hogar, para la que se toma como referencia el valor nacional del INE (2024) de 2,5 personas por vivienda, sustituible por el dato municipal. La geometría del edificio queda definida por A, la superficie en planta, y N_{pl}, el número de plantas. Si este último dato se desconoce, se estima a partir de la altura, con 3 m por planta. La constante 0,8 es el factor de conversión de superficie construida a útil, y la superficie útil por habitante, FSI, debe introducirla el usuario.

Cuando se desconoce la distribución interior de las viviendas, se aplica el método b de la norma. Los receptores de fachada del edificio se ordenan según su nivel sonoro y, si su número es impar, se descarta el de menor nivel. Finalmente, los habitantes del edificio se reparten a partes iguales entre la mitad más expuesta de los receptores, según la ecuación (6):

$$\mathrm{Inh}_r = \frac{\mathrm{Inh}}{\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor} \tag{6}$$

donde n es el número de receptores del edificio. Los demás receptores no reciben habitantes. Los usos docente, sanitario y cultural se tratan aparte, con su propio objetivo. Cada edificio se compara con el objetivo de su área acústica en Ld, Le y Ln, y la isolínea de ese objetivo dibuja la frontera del límite legal: los usos situados del lado de la infraestructura lo superarían. Se usa ese nombre por

brevedad. En una infraestructura nueva es la isolínea del valor límite de la tabla A1. En una existente es la del objetivo de calidad de la tabla A, que no tiene la misma naturaleza jurídica.

4.7. Análisis multicriterio

Con los resultados acústicos, de población y de coste, las alternativas se comparan con los criterios del Cuadro 3. El proyectista asigna un peso p_j a cada criterio j y el programa lo normaliza a 100 % con la ecuación (7). Los perfiles predefinidos son solo un atajo.

$$w_j = \frac{p_j}{\sum_{k=1}^{m} p_k} \tag{7}$$

Cada criterio se normaliza entre su mínimo y su máximo según su orientación, de beneficio o de coste (ecuación 8), y las alternativas se ordenan por la suma ponderada de la ecuación (9):

$$r_{ij} = \begin{cases} \dfrac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} & \text{si el criterio es de beneficio} \\ \dfrac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} & \text{si el criterio es de coste} \end{cases} \tag{8}$$

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} w_j r_{ij} \tag{9}$$

donde x_{ij} es el valor de la alternativa i en el criterio j, $x_j^{\min}$ y $x_j^{\max}$ son el mínimo y el máximo de ese criterio entre las alternativas comparadas y m es el número de criterios. Un criterio con el mismo valor en todas las alternativas no discrimina y el programa lo advierte. La severidad del Cuadro 3 es el exceso medio sobre el objetivo ponderado por los habitantes, según la ecuación (10):

$$E = \frac{\sum_b \mathrm{Inh}_b \cdot \max(0, \Delta L_b)}{\sum_b \mathrm{Inh}_b} \tag{10}$$

donde Inh_b son los habitantes del edificio residencial b y ΔL_b, su mayor exceso, en dB, sobre los objetivos de Ld, Le y Ln de su área acústica.

Como contraste se aplica TOPSIS (Hwang y Yoon, 1981), que ordena las alternativas por su cercanía relativa a una alternativa ideal y su lejanía de la anti-ideal. Los valores de cada criterio se normalizan por su norma euclídea y se ponderan (ecuación 11). Después se calculan las distancias de cada alternativa a la ideal y a la anti-ideal (ecuación 12) y su cercanía relativa (ecuación 13):

$$v_{ij} = w_j \cdot \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{l=1}^{n} {x_{lj}}^2}} \tag{11}$$

$$d_i^{\pm} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(v_{ij} - v_j^{\pm}\right)^2} \tag{12}$$

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \tag{13}$$

donde v_j^+ es el mejor valor ponderado del criterio j (el máximo si es de beneficio y el mínimo si es de coste), v_j^- es el peor y n, el número de alternativas. Si ambos métodos coinciden, la recomendación es más sólida.

Cuadro 3. Criterios del análisis multicriterio y pesos del caso de ejemplo.
Fuente: Elaboración propia.

Criterio	Orientación	Unidad	Peso del ejemplo
Habitantes en edificios sobre el objetivo	coste	habitantes	25 %
Severidad: exceso medio ponderado por habitante	coste	dB	10 %
Usos sensibles sobre el objetivo	coste	edificios	15 %
Integración urbana (altura, longitud, efecto barrera, vistas, ocupación de suelo)	beneficio	nota 0-10	25 %
Coste de inversión (CAPEX)	coste	€ de 2025	25 %

Los pesos del ejemplo son ilustrativos. En un proyecto real deberían acordarse con el promotor y con las administraciones afectadas. La nota de integración urbana parte de 10 y resta o suma los términos del Cuadro 4, con el resultado acotado entre 0 y 10. Sus coeficientes son criterio de los autores, a falta de una referencia normativa, y pueden editarse.

El cumplimiento legal actúa como una puerta configurable y visible: en modo restricción, las alternativas que incumplen se excluyen del ranking (si ninguna cumple, se ordenan todas y se avisa). En modo penalización, la puntuación de las que incumplen se multiplica por un factor φ, que figura en el informe (ecuación 14):

$$S_i' = \varphi \cdot S_i, \quad C_i' = \varphi \cdot C_i \tag{14}$$

con φ = 0,5 por defecto. El modo de restricción es el predeterminado y el que se usa en este trabajo. La estabilidad se mide con un barrido de cada peso de 0 a 100 % y con una simulación de Monte Carlo de 10 000 muestras. En cada muestra varían los pesos (distribución uniforme de ±20 %), los niveles y los costes (distribuciones triangulares con los intervalos de cada fuente). El error de nivel es único en cada muestra y común a todos los receptores, con distribución uniforme de ±2 dB(A), que es el criterio de calidad de la emisión de la Directiva. Se trata así como un error sistemático y no como ruido independiente en cada fachada.

Cuadro 4. Cálculo de la nota de integración urbana (valor inicial de 10).
Fuente: Elaboración propia (data/integracion.yaml del programa; criterio de los autores).

Medida	Término	Puntos
Pantalla	Altura por encima de 1 m (la mitad si es transparente)	−1,5 por metro
Pantalla	Pantallas de más de 1 m a ambos lados (efecto barrera)	−1
Pantalla	Edificios residenciales a menos de 50 m de la pantalla	−2 × fracción de edificios
Franja vegetal	Ocupación de suelo	−0,5 por cada 10 m de ancho
Franja vegetal	Mejora paisajística	+1
Aislamiento de fachada	Obras dentro de las viviendas	−2
Vía, flota y velocidad	Sin efecto visible	0
Cualquiera	Afección a un bien patrimonial	−2

4.8. Resultados que entrega

- **Capas en QGIS** con estilo: mapas de Lden, Ld, Le y Ln, isófonas, frontera del límite legal, receptores de fachada y estado de cada edificio con la medida propuesta.
- **Serie de planos** del mapa estratégico (formato PDF, tamaño A3). Incluyen cajetín, plano de situación y leyenda temática por bandas de 5 dB.
- **Informe** HTML y PDF, ficha resumen y tablas CSV. Cada valor indica el dato, la fórmula y la fuente de que procede, junto con la versión del programa, la normativa aplicada y las hipótesis.

5. Verificación

Antes de aplicar la herramienta, se comprobó que reproduce el método oficial. Para ello, la verificación combina pruebas de propiedades físicas, casos de referencia publicados y el contraste con una implementación independiente (Cuadro 5 y Figura 4). La emisión ferroviaria se comparó con NoiseModelling 6.0.0 en 720 combinaciones de vía, vehículo, velocidad y fuente, de las que 286 emiten energía (las demás corresponden a fuentes que no actúan en esa combinación). Sin juntas de carril, la diferencia máxima es de 0,05 dB(A). Con juntas, ambos programas leen de forma distinta la ecuación 2.3.11 en lo relativo al filtro de contacto del ruido de impacto y la diferencia llega a 3,6 dB(A). El programa sigue la letra de la norma y ofrece la otra lectura como opción, con la que la diferencia baja a 0,04 dB. La propagación reproduce los casos TC01 a TC15 de ISO/TR 17534-4: la atenuación difiere menos de 0,02 dB en los casos de suelo (TC01 a TC04) y 0,04 dB como máximo en los de difracción (TC05 a TC15).

Cuadro 5. Resumen de la verificación.
Fuente: Elaboración propia (docs/VALIDACION.md del programa).

Comprobación	Referencia	Resultado
Emisión ferroviaria (720 combinaciones)	NoiseModelling 6.0.0	≤ 0,05 dB(A) sin juntas; 3,6 dB(A) con juntas por interpretación del impacto
Emisión viaria (12 casos)	NoiseModelling 6.0.0	Coinciden con los mismos coeficientes; diferencias documentadas donde NoiseModelling se aparta del BOE
Suelo y meteorología (TC01-TC04)	ISO/TR 17534-4	< 0,02 dB en la atenuación; < 0,1 dB en niveles
Difracción (TC05-TC15)	ISO/TR 17534-4	≤ 0,04 dB
Absorción atmosférica	ISO 9613-1	≤ 0,042 dB
Propiedades físicas	Teoría	3 dB por duplicación de distancia en fuente lineal; más barrera, menos nivel
Caché por fuente en combinaciones	Cálculo completo	diferencia 0 dB

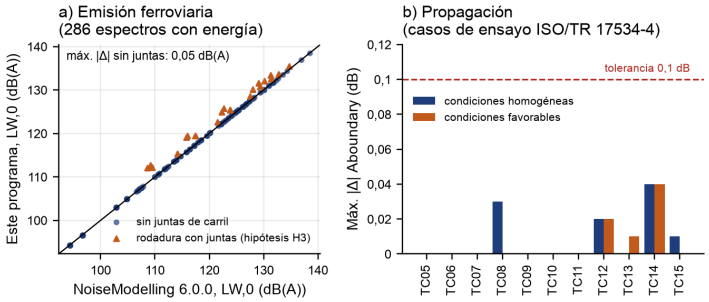


Figura 4. Verificación: a) emisión ferroviaria frente a NoiseModelling 6.0.0; b) diferencia máxima en la atenuación de contorno en los casos de difracción de ISO/TR 17534-4.
Fuente: Elaboración propia (pruebas automáticas del programa).

6. Casos de aplicación

6.1. Caso sintético de verificación

6.1.1. Descripción

Para mostrar el funcionamiento se usa un caso sintético, con datos inventados con fines de verificación. Un tramo de ferrocarril de 900 m, en dos subtramos sobre balasto y sobre placa, soporta de día 12 automotores eléctricos por hora y de noche 20 vagones de mercancías por hora (el método cuenta vehículos, no trenes). Una carretera paralela, a 130 m, lleva de día 900 vehículos ligeros y 100 pesados por hora. En su entorno, 14 edificios con uso residencial, docente o industrial

se sitúan a ambos lados de la vía, que cuenta con una pantalla existente de 3 m en 200 m. Se aplica el caso de infraestructura nueva (tabla A1) y una rejilla de 10 m hasta 250 m del eje.

6.1.2. Mapa estratégico sin medidas

En la situación de partida, la superficie con Lden de al menos 55 dB es de 0,73 km² y la de al menos 65 dB, de 0,19 km² (Figura 5). Los 190 habitantes evaluados superan el objetivo nocturno de Ln en su fachada más expuesta: 141 de ellos están en la banda de 55 a 59 dB. La frontera de Ln = 50 dB para uso residencial llega prácticamente al borde del pasillo calculado, por lo que en un estudio real convendría ampliarlo.

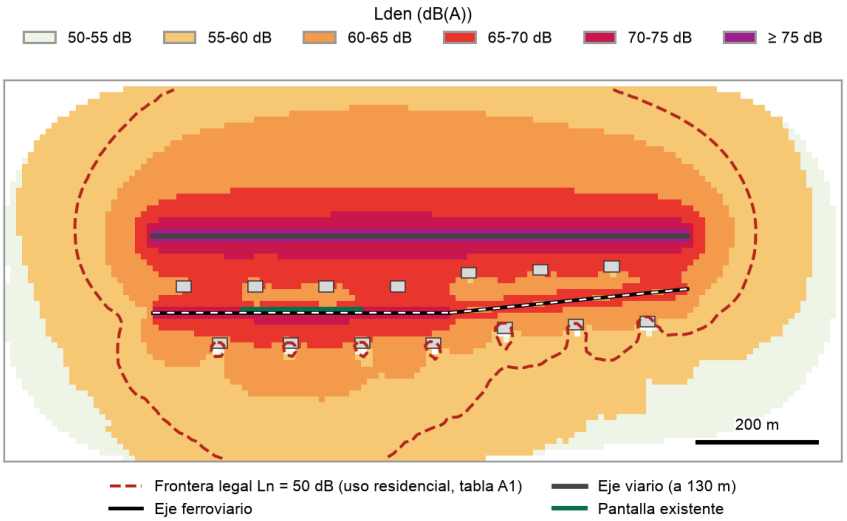


Figura 5. Mapa estratégico de ruido (Lden) sin medidas y frontera del límite legal nocturno para uso residencial.
Fuente: Elaboración propia con el programa (caso sintético de ejemplo, v3.5).

6.1.3. Comparación de medidas y combinaciones

A partir de esa situación, se evaluaron 13 medidas individuales y 35 combinaciones. Ninguna medida aislada deja a un solo edificio por debajo del objetivo: la mejor, una pantalla ferroviaria de 3 m, reduce Ln en 4,1 dB de media, pero la carretera aporta una parte comparable de la energía que llega a las fachadas. Solo al combinar pantallas en ambas infraestructuras la reducción supera los 9 dB y 10 edificios dejan de superar el objetivo (Cuadro 6 y Figuras 6 a 8).

Cuadro 6. Resultados de los escenarios más representativos.
Fuente: Elaboración propia con el programa (caso sintético de ejemplo, v3.5).

Escenario	ΔLden (dB)	ΔLn (dB)	Habitantes sobre el objetivo de Ln
Sin medidas	—	—	190
Mejor medida aislada (pantalla ferroviaria de 3 m)	−3,0	−4,1	146
Pantalla ferroviaria de 3 m + pantalla viaria de 3 m	−9,7	−9,9	13
Zapatas compuestas + pantalla viaria de 3 m	−6,1	−6,1	99
Reducción de 20 km/h en ambas infraestructuras	−2,0	−1,9	184

La distribución por bandas (Figura 6) muestra el mismo efecto: con las dos pantallas, ningún habitante queda por encima de 59 dB en Lden, mientras que la reducción de velocidad apenas desplaza a unos pocos habitantes. La Figura 8 traslada el resultado a cada edificio.

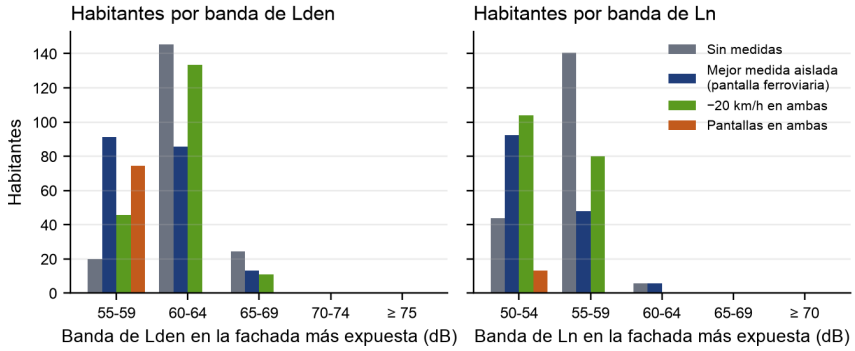


Figura 6. Habitantes por banda de exposición en cuatro escenarios.
Fuente: Elaboración propia con el programa (caso sintético de ejemplo, v3.5).

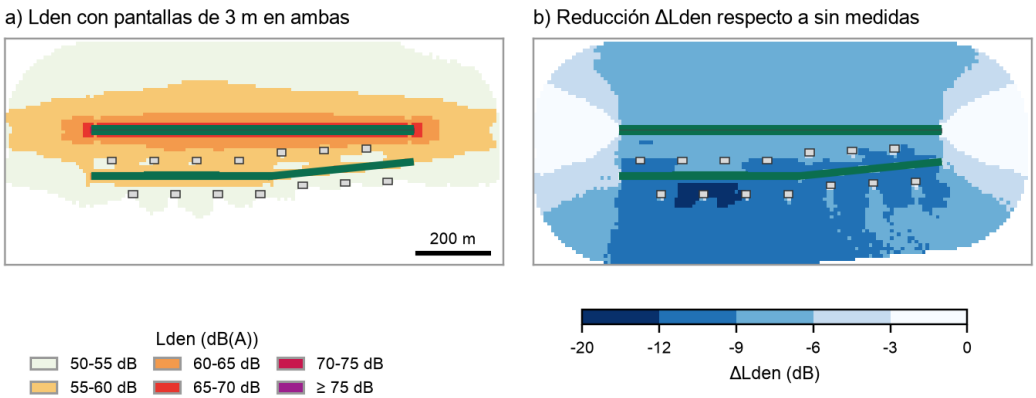


Figura 7. a) Lden con pantallas de 3 m en el ferrocarril y en la carretera; b) reducción respecto a la situación sin medidas.
Fuente: Elaboración propia con el programa (caso sintético de ejemplo, v3.5).

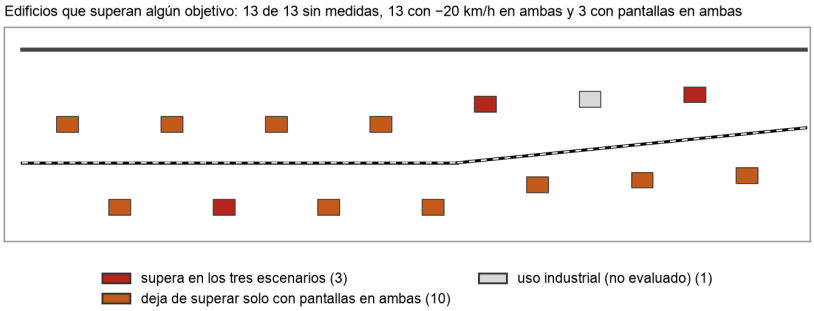


Figura 8. Edificios según el escenario en que dejan de superar algún objetivo de calidad.
Fuente: Elaboración propia con el programa (caso sintético de ejemplo, v3.5).

6.1.4. Decisión y sensibilidad

En cuanto a la decisión, el programa advierte que ninguna alternativa cumple todos los objetivos, ya que el edificio docente supera el suyo en todos los escenarios analizados, por lo que la puerta legal no excluye ninguna alternativa. Con los pesos del ejemplo, que asignan un 25 % al coste y otro 25 % a la integración urbana, la alternativa mejor valorada, también por TOPSIS, es la reducción de velocidad en ambas infraestructuras. Aunque solo protege a seis habitantes, se impone por carecer de coste de inversión y de impacto visual. En contraste, la combinación de pantallas, la medida más eficaz contra el ruido, cae al puesto 31 por su elevado presupuesto (6,7 millones de euros) y su penalización paisajística. De las 48 alternativas evaluadas, 41 entran en el ranking. Quedan fuera la lubricación en curvas, la almohadilla rígida y las cinco combinaciones que la incluyen, por carecer de un coste con fuente. El resultado depende, además, de que la reducción de velocidad figura con coste nulo, porque no se cuantifica su coste de explotación.

La matriz de decisión de la Figura 9 explica este resultado. Las alternativas mejor situadas obtienen la valoración máxima en integración urbana y en CAPEX, que suman la mitad del peso total, y la mínima en población sobre el objetivo, porque apenas reducen el número de habitantes afectados. La combinación de pantallas presenta el perfil opuesto: es la mejor en población y en severidad, pero la peor en integración urbana y casi la peor en coste. Adicionalmente, el criterio de usos sensibles toma el mismo valor en todas las alternativas, porque el edificio docente supera su objetivo en todas ellas, de modo que no discrimina y su peso del 15 % no altera el orden.

El análisis de sensibilidad matiza esa recomendación: la reducción de velocidad gana solo en el 16,5 % de las muestras por suma ponderada y en el 27,8 % por TOPSIS (Figura 11b), y el barrido de pesos (Figura 10) muestra que la combinación de pantallas pasa a ser la preferida cuando el peso de la población afectada supera el 35-40 %. La herramienta no impone una respuesta: hace explícito el compromiso entre protección acústica, coste e integración urbana y muestra a partir de qué valoración cambia la decisión.

	Población sobre objetivo	Severidad del exceso	Usos sensibles	Integración urbana	CAPEX	Suma ponderada
Peso w_j	25 %	10 %	15 %	25 %	25 %	
1.ª −20 km/h ferrocarril + −20 km/h carretera	0,00	0,26	1,00	1,00	1,00	0,68
2.ª −20 km/h ferrocarril + Pesados de noche −50 %	0,00	0,24	1,00	1,00	1,00	0,67
3.ª −20 km/h ferrocarril + Pavimento drenante PA1	0,00	0,27	1,00	1,00	0,98	0,67
4.ª −20 km/h ferrocarril + Capa fina A	0,00	0,26	1,00	1,00	0,98	0,67
5.ª Zapatas compuestas + −20 km/h carretera	0,00	0,39	1,00	1,00	0,93	0,67
6.ª Zapatas compuestas + Pesados de noche −50 %	0,00	0,36	1,00	1,00	0,93	0,67
7.ª Zapatas compuestas + Pavimento drenante PA1	0,00	0,40	1,00	1,00	0,91	0,67
8.ª Zapatas compuestas + Capa fina A	0,00	0,39	1,00	1,00	0,91	0,67
9.ª −20 km/h ferrocarril	0,00	0,12	1,00	1,00	1,00	0,66
10.ª Amolado acústico + −20 km/h carretera	0,00	0,11	1,00	1,00	1,00	0,66
⋮						
25.ª Pantalla baja junto al carril + −20 km/h carretera	0,00	0,39	1,00	1,00	0,48	0,56
30.ª Zapatas compuestas + Pantalla viaria 3 m	0,18	0,82	1,00	0,57	0,45	0,53
31.ª Pantalla ferroviaria 3 m + Pantalla viaria 3 m	1,00	1,00	1,00	0,00	0,04	0,51

Figura 9. Matriz de decisión del caso sintético: valor normalizado de cada criterio (ecuación 8; 1 = mejor alternativa y 0 = peor), peso de cada criterio y suma ponderada (ecuación 9) para las diez primeras alternativas del ranking, la mejor con pantalla baja, la mejor con pantalla de 3 m y la combinación de pantallas.
Fuente: Elaboración propia con el programa (caso sintético de ejemplo, v3.5).

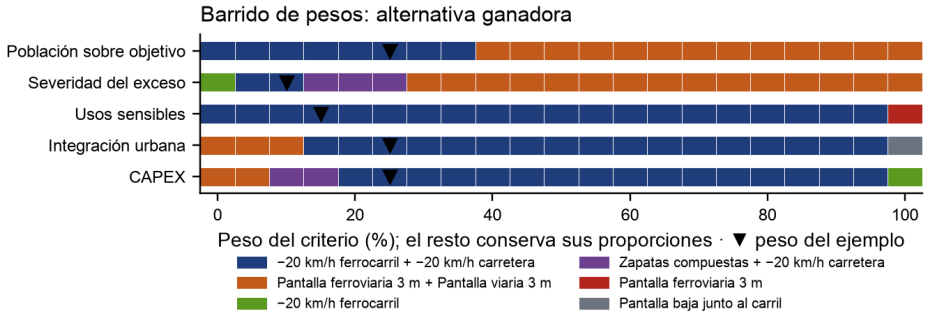


Figura 10. Alternativa ganadora al variar el peso de cada criterio.
Fuente: Elaboración propia con el programa (caso sintético de ejemplo, v3.5).

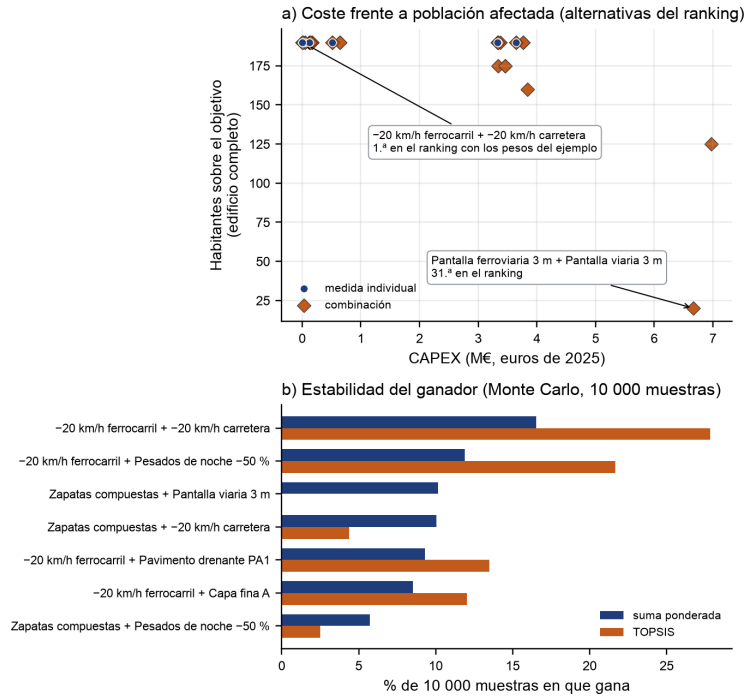


Figura 11. a) Coste de inversión frente a población afectada; b) porcentaje de muestras del Monte Carlo en que gana cada alternativa.
Fuente: Elaboración propia con el programa (caso sintético de ejemplo, v3.5).

La Figura 12 muestra, para las diez alternativas con mejor posición media, el intervalo de posiciones que ocupan en las 10 000 muestras del Monte Carlo. Todas alcanzan el primer puesto en alguna muestra y ninguna desciende más allá del puesto 29, de modo que las diferencias entre ellas son pequeñas frente a la incertidumbre de los pesos, los niveles y los costes. Adicionalmente, la posición obtenida con los pesos del ejemplo es mejor que la posición media en todas ellas, por lo que el ranking nominal debe interpretarse junto con su dispersión.

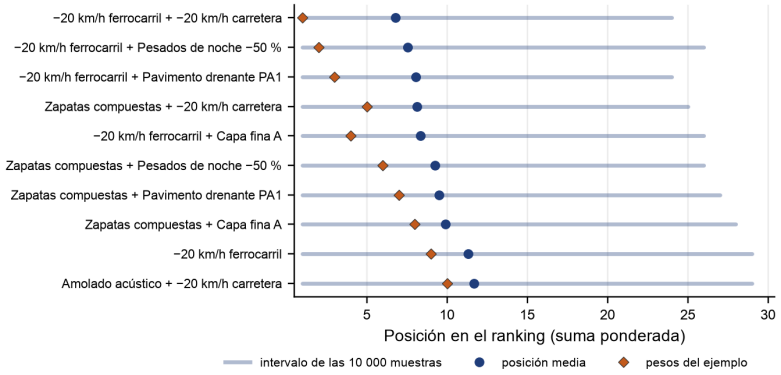


Figura 12. Intervalo de posiciones en el ranking por suma ponderada en las 10 000 muestras del Monte Carlo, posición media y posición con los pesos del ejemplo, para las diez alternativas con mejor posición media.
Fuente: Elaboración propia con el programa (caso sintético de ejemplo, v3.5).

TOPSIS confirma la estructura del ranking. Los cuatro primeros puestos coinciden y ambos métodos separan los mismos tres grupos de inversión: las alternativas de menos de 0,7 millones de euros,

las que incluyen una pantalla y las que combinan dos. Dentro de cada grupo, en cambio, las alternativas están tan próximas que su orden depende del método empleado.

6.2. Tramo real: línea de alta velocidad Madrid-Zaragoza a su paso por Terrer

6.2.1. Datos

Para comprobar que la herramienta puede aplicarse en cualquier punto de España con datos públicos, se eligió un tramo de unos 2,7 km de la línea de alta velocidad Madrid-Zaragoza-Barcelona junto a Terrer (Zaragoza), a unos 5 km de Calatayud, donde la línea convencional Madrid-Barcelona discurre en paralelo a unos 25 m. Es una infraestructura existente, por lo que se aplican los objetivos de calidad de la tabla A del RD 1367/2007. El programa eligió por sí solo el sistema de referencia (ETRS89, huso UTM 30) a partir de la posición del tramo. Todos los datos proceden de fuentes abiertas (Cuadro 7).

El recuento de trenes cruza los horarios con el meridiano de Terrer y elimina los viajes que el GTFS repite con calendarios solapados. Se usaron las composiciones de ejemplo del catálogo (8 coches por tren de alta velocidad a 300 km/h, o a 230 km/h si paran en Calatayud, y automotores a 100 km/h en la convencional) y los valores por defecto de la norma para la vía, cuya rugosidad no se publica. El número de plantas se tomó de las partes de edificio del Catastro y los habitantes, del número de viviendas con la ocupación media del INE. Se calculó una rejilla de 20 m hasta 500 m del eje y, en las fachadas, el escenario sin medidas y siete medidas.

Cuadro 7. Datos de entrada del caso real de Terrer.
Fuente: Elaboración propia con el programa (v4.3.0) a partir de © colaboradores de OpenStreetMap, horarios GTFS de Renfe y Catastro INSPIRE (consultas de 9 de noviembre de 2026).

Dato	Fuente	Resultado
Eje: 2 vías de alta velocidad y 2 convencionales	OpenStreetMap (API Overpass)	11,1 km de eje en total
Trenes de Renfe en un laborable	GTFS de Renfe (datos.gob.es)	De día 46 y de tarde 13 de alta velocidad; 5 y 5 regionales
Trenes de Ouigo e Iryo	Horarios de Ouigo (Ouigo España, 2026); frecuencias de Iryo (Hosteltur, 2025; estimación)	De día 29 y de tarde 9
Trenes nocturnos (23-7 h)	Mismas fuentes; mercancías sin datos públicos por tramo	Ninguno (caso base sin mercancías)
Edificios	Catastro INSPIRE, municipio de Terrer	147 edificios a menos de 600 m; 138 viviendas en los residenciales

6.2.2. Resultados sin medidas

En la situación actual, la superficie con Lden de al menos 55 dB es de 2,3 km² y la de al menos 65 dB, de 0,31 km² (Figura 13). El casco urbano de Terrer queda al norte, a varios cientos de metros de la vía y en su mayor parte fuera de la banda de 55 dB. La afección se concentra en las edificaciones dispersas junto a la línea. De los 200 habitantes estimados dentro del pasillo, 53 están expuestos a Lden de 55 dB o más, repartidos entre los receptores de sus fachadas, y ninguno por encima de 70 dB. Al no haber trenes de viajeros entre las 23 y las 7 h, no hay exposición en Ln en el caso base.

La frontera del objetivo diurno (Ld = 65 dB) llega a 101 m del eje y la vespertina, a 74 m. Dos edificios residenciales la superan en su fachada más expuesta. El mayor tiene 22 viviendas y alcanza un Ld de 67,0 dB. El otro es una vivienda aislada con 65,7 dB. En ellos residen 57,5 habitantes estimados. Con el reparto por fachadas del Anexo II, 11 habitantes quedan por encima del objetivo diurno y 5 por encima del vespertino, porque solo una parte de las fachadas lo supera. Los excesos, de 2,0 y 0,7 dB, son del orden de la incertidumbre que la directiva admite para la emisión (±2 dB). Se trata, por tanto, de un caso límite, que una campaña de mediciones debería confirmar.

6.2.3. Medidas

En la primera evaluación se aplicaron las pantallas del catálogo a ambos lados de las cuatro vías y en toda la longitud del tramo, lo que suponía más de 22 km de pantalla para proteger dos edificios. Por ello, se definieron dos pantallas a medida, de 800 m de longitud, centradas frente a los edificios afectados y situadas solo en el lado del pueblo de la alta velocidad. La longitud es una hipótesis de diseño de los autores, sin optimizar. La franja vegetal se dispuso entre la vía convencional y el pueblo. La Figura 14 resume el efecto de cada medida.

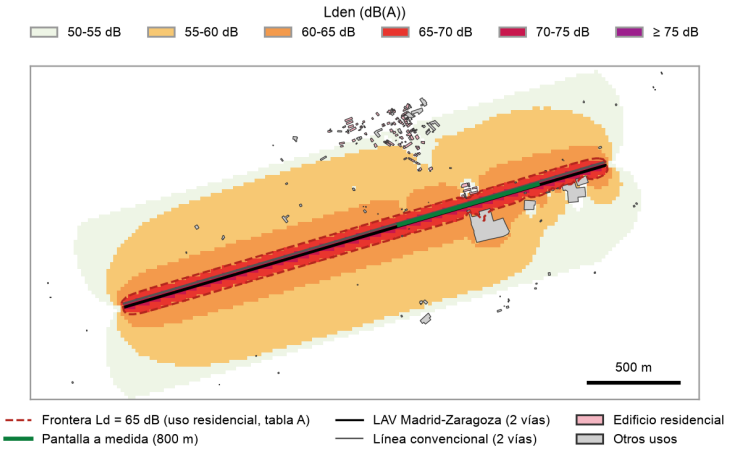


Figura 13. Caso real de Terrer: Lden sin medidas, edificios del Catastro, frontera del objetivo de calidad diurno para uso residencial (tabla A) y posición de la pantalla a medida.
Fuente: Elaboración propia con el programa (v4.3.0) a partir de © colaboradores de OpenStreetMap, horarios GTFS de Renfe y Catastro INSPIRE (consultas de 9 de noviembre de 2026).

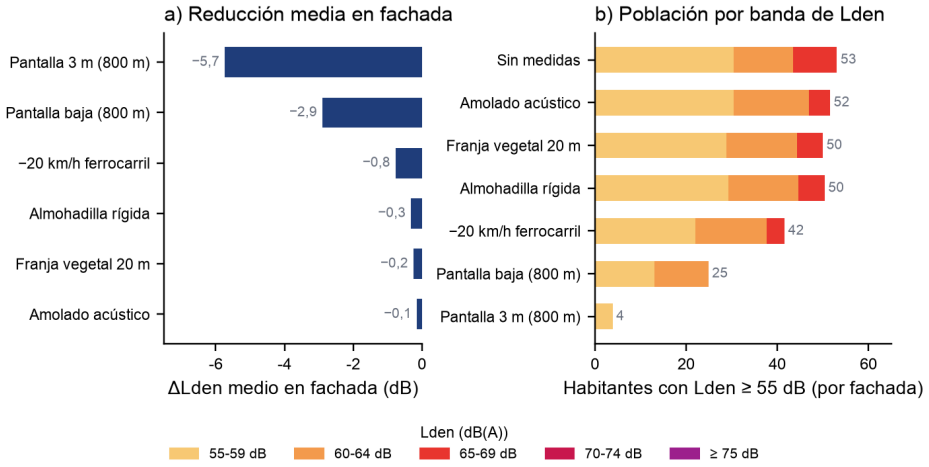


Figura 14. Caso real de Terrer: a) reducción media del Lden en fachada con cada medida; b) habitantes por banda de Lden en cada escenario.
Fuente: Elaboración propia con el programa (v4.3.0) a partir de © colaboradores de OpenStreetMap, horarios GTFS de Renfe y Catastro INSPIRE (consultas de 9 de noviembre de 2026).

El Cuadro 8 detalla las seis medidas que actúan sobre el nivel exterior. La pantalla de 3 m reduce el Lden medio en fachada en 5,7 dB y deja el nivel máximo de los dos edificios en 55,7 dB de Ld. La pantalla baja junto al carril, de 0,75 m, lo reduce en 2,9 dB y también cumple el objetivo, con un margen de 2,2 dB. Las medidas sobre la emisión y la franja vegetal logran entre 0,1 y 0,8 dB con los datos de vía por defecto y no bastan. La reducción de 20 km/h resuelve la vivienda aislada, pero no el edificio mayor. Los amortiguadores de carril no se evaluaron por falta de un espectro de corrección con fuente. El aislamiento de fachada se evalúa aparte, frente al nivel nocturno interior, y no aporta resultado en este caso por la ausencia de tráfico nocturno.

Cuadro 8. Medidas evaluadas en el caso real de Terrer (Ld máximo sin medidas: 67,0 dB; objetivo: 65 dB).
Fuente: Elaboración propia con el programa (v4.3.0) a partir de © colaboradores de OpenStreetMap, horarios GTFS de Renfe y Catastro INSPIRE (consultas de 9 de noviembre de 2026).

Medida	ΔLden medio (dB)	Ld máximo (dB)	Edificios sobre el objetivo	Inversión (€)	Situación
Pantalla de 3 m, 800 m, un lado	−5,7	55,7	0	1 480 000	En el ranking
Pantalla baja de 0,75 m, 800 m, dos vías	−2,9	62,9	0	3 230 000	En el ranking
Reducción de velocidad de 20 km/h	−0,8	66,2	1	0	Excluida: incumple
Traviesa sobre almohadilla rígida	−0,3	66,7	2	Sin coste con fuente	Excluida
Franja vegetal de 20 m	−0,2	66,8	2	67 000	Excluida: incumple
Amolado acústico del carril	−0,1	66,6	2	128 000	Excluida: incumple

6.2.4. Análisis multicriterio y sensibilidad

En consecuencia, con la puerta legal en modo de restricción dura, solo las dos pantallas entran en el ranking. Ambas eliminan la superación del objetivo, de modo que empatan en los tres criterios acústicos. La pantalla de 3 m cuesta menos de la mitad, porque protege con una sola línea de 800 m lo que la pantalla baja necesita resolver en las dos vías de alta velocidad. La pantalla baja obtiene mejor nota de integración urbana (10 frente a 6,9). Con los pesos del ejemplo, que dan el mismo peso al coste y a la integración, la suma ponderada da un empate (0,75 en ambas). TOPSIS se inclina por la pantalla de 3 m (0,66 frente a 0,34).

El empate tiene una causa metodológica que conviene declarar. Con solo dos alternativas, la normalización min-max asigna 0 y 1 en cada criterio en el que difieren, con independencia de la magnitud de la diferencia. La decisión se reduce entonces a qué criterio pesa más. La simulación de Monte Carlo lo confirma: cada pantalla gana en un 33 % de los escenarios por suma ponderada. Con TOPSIS, la pantalla de 3 m gana en el 56 %.

En el tercio restante gana una medida de bajo coste (la reducción de velocidad en el 21 %, el amolado en el 7 % y la franja vegetal en el 5 %), porque con la variación de ±2 dB en los niveles les basta para cumplir. Ese resultado no indica que esas medidas sean eficaces, sino que existe incertidumbre sobre si el incumplimiento es real. Por ello, la primera recomendación es una campaña de mediciones en las dos fachadas afectadas.

Si el incumplimiento se confirma, la elección está entre dos pantallas y depende de la importancia relativa del coste y de la integración urbana. Si no se confirma, puede bastar una medida de gestión. El coste de la pantalla baja procede de pocos ensayos en Alemania (Scossa-Romano y Oertli, 2012), pero la de 3 m es más barata en todo su intervalo: la baja solo lo sería por debajo de unos 925 €/m, y el mínimo de la fuente equivale a unos 1 480 €/m de 2025.

7. Discusión y limitaciones

En conjunto, el caso de ejemplo ilustra dos ideas útiles para el anteproyecto. En corredores con varias fuentes, evaluar las medidas de una en una lleva a conclusiones engañosas: ninguna medida aislada resolvía el problema y la combinación adecuada sí lo hacía. Y el ranking depende de los pesos tanto como de la acústica, de modo que mostrar su estabilidad es tan importante como mostrar el ganador.

La herramienta tiene limitaciones que conviene declarar:

- La validación se ha hecho con implementaciones y casos de referencia independientes. El caso de Terrer demuestra que la herramienta funciona con datos reales, pero no la valida: los mapas estratégicos de las fases 3 y 4 del SICA (MITECO, 2026) no incluyen este tramo y no se dispone de mediciones.

- En el caso real se usaron trenes, rugosidad y vía tipo, no las series que circulan. La cifra de Iryo es una estimación y faltan las mercancías nocturnas de la línea convencional, sin datos públicos por tramo. Por ello, el índice nocturno Ln no llega a evaluarse en el caso real.

- No se modelan las reflexiones en fachadas y la probabilidad de condiciones favorables se toma por defecto igual a 1 en todos los periodos, una hipótesis conservadora, si no se aporta el dato meteorológico del lugar.

- Algunos costes unitarios y los coeficientes de integración urbana son estimaciones documentadas o criterio del proyectista, editables. Dos medidas quedan fuera del ranking por falta de un coste con fuente, y el coste del amolado acústico es una estimación de los autores, sin fuente verificada.

- El cálculo es más lento que el de un programa comercial. Un escenario completo del caso de ejemplo, con unos 8 000 receptores de rejilla, tarda del orden de veinte minutos en un ordenador portátil con un único núcleo. El caso de Terrer, con 8 999 receptores de rejilla, 681 de fachada y siete medidas, tardó 4 h 21 min.

- El coste de explotación de las medidas de gestión (reducción de velocidad y restricción de pesados) no se incluye, lo que las favorece en el criterio de coste.

- La normalización entre el mínimo y el máximo depende del conjunto de alternativas comparadas. Con pocas alternativas, como en el caso real, deja de informar sobre la magnitud de las diferencias.

- La posición y la longitud de las medidas las fija el proyectista. El programa las compara, pero no busca por sí mismo la disposición óptima a lo largo del trazado.

- La evaluación se basa en niveles promediados a largo plazo, como exige la normativa. No evalúa niveles máximos de paso.

8. Conclusiones y líneas futuras

En síntesis, se ha desarrollado una herramienta en Python integrada en QGIS que aplica el método CNOSSOS-EU vigente en España a ferrocarriles y carreteras y lleva el cálculo hasta la decisión: mapa estratégico, población por fachada, cumplimiento por área acústica, frontera del límite legal, medidas y combinaciones modelizadas físicamente, coste con fuente y un análisis multicriterio con medida de su estabilidad. Su verificación frente a NoiseModelling e ISO/TR 17534-4 da diferencias inferiores a 0,1 dB en los casos comparables.

La herramienta ya puede aplicarse en cualquier zona de España, elige el sistema de referencia y permite estudiar solo el ferrocarril, solo la carretera o ambos. Su primera aplicación a un tramo real se ha hecho solo con datos abiertos. Las líneas de trabajo inmediatas son contrastarla con un mapa estratégico oficial y con mediciones, incorporar el tráfico de mercancías y las series reales de material rodante, y explorar la evaluación de niveles máximos de paso.

En el caso real, los excesos sobre el objetivo son del orden de la incertidumbre del método, de modo que la primera recomendación es medir. Si el incumplimiento se confirma, bastan 800 m de pantalla frente a los edificios afectados.

Otra línea de trabajo es la optimización automática por secciones. Consiste en dividir el trazado en secciones, identificar aquellas en las que algún edificio supera el objetivo y elegir en cada una la

medida de menor coste que lo cumple, sin actuar donde no es necesario. En la versión actual esa disposición la define el proyectista, como se ha hecho en el caso de Terrer.

Esta herramienta nació en el ámbito académico, por iniciativa de un grupo de estudiantes, y tiene potencial para evolucionar hacia un uso técnico profesional con más tiempo, datos reales y recursos.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial

En el desarrollo del código del programa y en la redacción de este documento se ha utilizado un asistente de inteligencia artificial (Claude, de Anthropic), bajo la dirección, las decisiones y la revisión de los autores, que asumen la responsabilidad de su contenido.

Bibliografía

Agencia Europea de Medio Ambiente [EEA]. (2020). *Environmental noise in Europe — 2020* (EEA Report n.º 22/2019). Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. https://doi.org/10.2800/686249

Bocher, E., Guillaume, G., Picaut, J., Petit, G., y Fortin, N. (2019). NoiseModelling: An open source GIS based tool to produce environmental noise maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), 130. https://doi.org/10.3390/ijgi8030130

Castellón Plaza. (20 de marzo de 2025). *Adif paraliza las pantallas acústicas entre València y Castellón: reinicia el proyecto por la oposición municipal*. https://castellonplaza.com/castellonplaza/empresas2/adif-paraliza-las-pantallas-acusticas-entre-valencia-y-castellon-y-reinicia-el-proyecto-por-la-oposicion-municipal

Clausen, U., Doll, C., Franklin, F. J., Vasic Franklin, G., Heinrichmeyer, H., Kochsiek, J., Rothengatter, W., y Sieber, N. (2012). *Reducing railway noise pollution*. Parlamento Europeo, Dirección General de Políticas Interiores. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2012/474533/IPOL-TRAN_ET(2012)474533_EN.pdf

Conference of European Directors of Roads [CEDR]. (2017). *State of the art in managing road traffic noise: Summary report*. https://www.cedr.eu/download/Publications/2017/CEDR2017-03-State-of-the-art-in-managing-road-traffic-noise.pdf

D'Alessandro, F., Di Mascio, P., Lombardi, L., y Ridolfi, B. (2022). Methodology for the identification of economic, environmental and health criteria for road noise mitigation. *Noise Mapping*, 9(1), 10-22. https://doi.org/10.1515/noise-2022-0002

Dirección General del Catastro. (2026). *Edificios INSPIRE (BU), municipio 50256 Terrer* [Conjunto de datos]. https://www.catastro.hacienda.gob.es/INSPIRE/Buildings/50/50256-TERRER/A.ES.SDGC.BU.50256.zip

Directiva (UE) 2015/996 de la Comisión, de 19 de mayo de 2015, por la que se establecen métodos comunes de evaluación del ruido en virtud de la Directiva 2002/49/CE. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 168, de 1 de julio de 2015. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32015L0996

Eurostat. (2026). *HICP - annual data (average index and rate of change)* (prc_hicp_aind) [Conjunto de datos]. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/prc_hicp_aind

Hosteltur. (17 de marzo de 2025). *iryo, el operador líder en calidad con 68 conexiones diarias*. https://www.hosteltur.com/168671_iryo-el-operador-lider-en-calidad-con-68-conexiones-diarias.html

Hwang, C.-L., y Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer.

Instituto Nacional de Estadística [INE]. (2024). *Proyección de hogares. Años 2024-2039* [Nota de prensa]. https://www.ine.es/dyngs/Prensa/PROH20242039.htm

International Organization for Standardization [ISO]. (1993). *Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere* (ISO 9613-1:1993).

International Organization for Standardization [ISO]. (2020). *Acoustics — Software for the calculation of sound outdoors — Part 4: Recommendations for a quality assured implementation of the COMMISSION DIRECTIVE (EU) 2015/996 in software according to ISO 17534-1* (ISO/TR 17534-4:2020).

Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. *Boletín Oficial del Estado*, 276, de 18 de noviembre de 2003. https://www.boe.es/eli/es/l/2003/11/17/37/con

Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2024). *Plan de Acción contra el ruido, Fase II, autopista AP-7. Anejo 1.2.29: Justificación de precios* (clave 39-B-5260). https://cdn.transportes.gob.es/portal-web-transportes/ministerio/participacion-publica/no-normativo/carreteras/39-B-5260/1.2.29_justif_precios_39-b-5260_v02.03.pdf

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana [MITMA]. (2019). *Documento Básico HR. Protección frente al ruido* (Código Técnico de la Edificación). https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HR/DBHR.pdf

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO]. (2026). *Sistema de Información sobre Contaminación Acústica (SICA)* [Consulta de 12 de noviembre de 2026]. https://sicaweb.miteco.gob.es

OpenStreetMap contributors. (2026). *OpenStreetMap* [Datos consultados con la API Overpass el 9 de noviembre de 2026; licencia ODbL]. https://www.openstreetmap.org

Orden PCI/1319/2018, de 7 de diciembre, por la que se modifica el Anexo II del Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre. *Boletín Oficial del Estado*, 300, de 13 de diciembre de 2018. https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2018-17008

Orden PCM/80/2022, de 7 de febrero, por la que se modifica el anexo II del Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre. *Boletín Oficial del Estado*, 35, de 10 de febrero de 2022. https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2022-2120

Ouigo España. (2026). *Horarios de los trenes Ouigo* [Consulta de 9 de noviembre de 2026]. https://www.ouigo.com/es/

QGIS Development Team. (2025). *QGIS Geographic Information System* (versión 3.44) [Software]. Open Source Geospatial Foundation. https://qgis.org

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. *Boletín Oficial del Estado*, 254, de 23 de octubre de 2007. https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-18397

Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental. *Boletín Oficial del Estado*, 301, de 17 de diciembre de 2005. https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2005-20792

Renfe. (2026). *Horarios de alta velocidad, larga distancia y media distancia* (GTFS) [Conjunto de datos]. datos.gob.es. https://datos.gob.es/es/catalogo/ea0003337-horarios-de-alta-velocidad-larga-distancia-y-media-distancia1

Ruiz-Padillo, A., Ruiz, D. P., Torija, A. J., y Ramos-Ridao, Á. (2016). Selection of suitable alternatives to reduce the environmental impact of road traffic noise using a fuzzy multi-criteria decision model. *Environmental Impact Assessment Review*, 61, 8-18. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.06.003

Scossa-Romano, E., y Oertli, J. (2012). *Rail dampers, acoustic rail grinding, low height noise barriers: A report on the state of the art*. SBB para la Unión Internacional de Ferrocarriles [UIC]. https://uic.org/IMG/pdf/2012_dampers_grinding_lowbarriers.pdf

Université Gustave Eiffel. (2026). *NoiseModelling* (versión 6.0.0) [Software]. https://github.com/Universite-Gustave-Eiffel/NoiseModelling

Valencia Plaza. (22 de octubre de 2024). *Adif atiende a los ayuntamientos y redefinirá las pantallas acústicas entre València y Castelló*. https://valenciaplaza.com/valenciaplaza/adifatiendealosayuntamientosyredefiniralaspantallasacusticasentrevalenciaycastello

CONAMA 2026