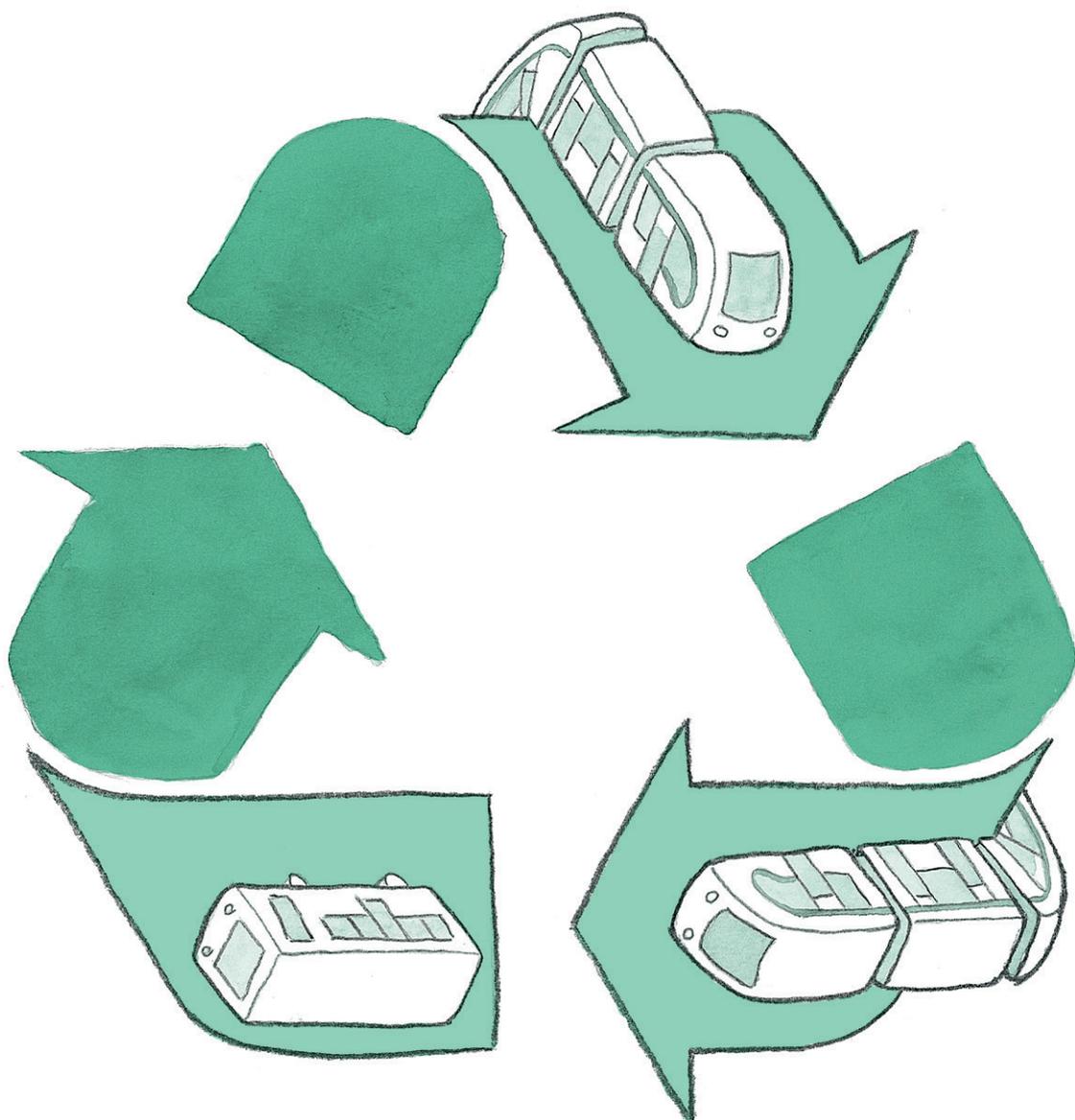


GUÍA PARA LA INTEGRACIÓN AMBIENTAL DEL TRANSPORTE PÚBLICO

ENFOQUE DESDE LOS SISTEMAS DE METRO LIGERO.



PROYECTO DE EXCELENCIA, P09-RNM-5394 (2010 – 2014):

“GUÍA METODOLÓGICA PARA LA INTEGRACIÓN METROPOLITANA SOSTENIBLE DE LOS SISTEMAS DE METRO LIGERO, **INTEGRA-ME**”

Laboratorio de Planificación Ambiental (LabPlam)



JULIO 2014

GUÍA PARA LA INTEGRACIÓN AMBIENTAL DEL TRANSPORTE PÚBLICO: ENFOQUE DESDE LOS SISTEMAS DE METRO LIGERO.



La presente guía ha sido realizada bajo la financiación de la Junta de Andalucía y fondos FEDER para el Proyecto de Excelencia (P09-RNM-5394): "Guías metodológicas para la integración metropolitana de los sistemas de metro ligero (INTEGRA-ME)"

Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin autorización previa y por escrito de los titulares del copyright. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.

Diseño y maquetación: M^a Adela Tejero.

Ilustraciones: José Luis Tejero.

© Laboratorio de planificación ambiental. LABPLAM.

Gálvez, J.A.; Valenzuela, L.M.; Soria, J.A. y Navarro, M.L. (2014): *"Guía para la integración ambiental del transporte público: enfoque desde los sistemas de metro ligero"*.

Proyecto INTEGRAME. Laboratorio de Planificación Ambiental. Granada.

ISBN 978-84-697-0612-1

Impreso en España - *Printed in Spain*

Autores _____

Gálvez Salinas, José Alfonso
Valenzuela Montes, Luis Miguel
Soria Lara, Julio Alberto
Navarro Ligeró, Miguel Lorenzo

GRUPOS PARTICIPANTES



DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA,
HISTORIA Y FILOSOFÍA. UNIVERSIDAD
PABLO DE OLAVIDE:
Feria Toribio, José María
Oliveira Neves, Gwendoline
Vahi Serrano, Amalia
Hurtado Rodríguez, Claudia
(Apoyo técnico a la investigación)



CÁTEDRA DE GESTIÓN DEL TRANSPORTE.
UNIVERSIDAD DE MÁLAGA:
Maeso González, Elvira
González Sánchez, Guadalupe

SUPERVISIÓN TÉCNICA



Caba Martín, José Luis
Romo, Robert
Lorente Rodríguez, Paula
Coiffet, Romain

COLABORACIÓN (REVISIÓN DE LAS GUÍAS)

Navazo Lafuente, Màrius
(GEA 21)
Gutierrez Puebla, Javier
(Universidad Complutense de Madrid)
Marmolejo Duarte, Carlos
(Universitat Politècnica de Catalunya)
Figuroa Monsalve, Óscar
(Pontificia Universidad Católica de Chile)

COORDINACIÓN CIENTÍFICA



LABORATORIO DE PLANIFICACIÓN
AMBIENTAL (LABPLAM):
UNIVERSIDAD DE GRANADA
Valenzuela Montes, Luis Miguel
(Coordinador Científico de INTEGRAME)
Soria Lara, Julio Alberto
Talavera García, Rubén
Gálvez Salinas, José Alfonso
Navarro Ligerero, Miguel Lorenzo

ÍNDICE

0. INTRODUCCIÓN	17		
0.1. Argumentos y Objetivos	21		
0.2. Estructura y Contenidos	22		
1. LA INTEGRACIÓN AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO	27		
1.1. Principios de la movilidad sostenible	29		
1.2. La planificación ambiental de la movilidad	33		
1.3. Evaluación ambiental de la movilidad: impacto ambiental y rendimiento ambiental	36		
1.3.1. Indicadores de sostenibilidad y sistemas de monitorización ambiental	39		
1.3.2. Umbrales de integración ambiental	41		
2. OCUPACIÓN DEL VIARIO	45		
2.1. Criterios generales para la planificación y el diseño del viario	48		
2.2. La planificación del viario desde una perspectiva ambiental	51		
2.2.1. Jerarquización del viario	52		
2.2.2. Ocupación no motorizada del viario	55		
2.2.3. Efecto Barrera	62		
2.3. Eficiencia superficial de la movilidad motorizada	66		
3. CALIDAD DEL AIRE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA	71		
3.1. Modelo de emisiones y consumo energético	74		
3.1.1. Datos de partida para el modelo de emisiones y consumo energético	76		
3.1.2. Modelo de vulnerabilidad frente a las emisiones locales	79		
3.2. Valores límite de emisión según Real Decreto 102/2011 relativo a la mejora de la calidad del aire.	81		
3.3. Calidad del aire, consumo energético y eficiencia: el metro ligero de Granada como ejemplo de estudio.	84		
3.3.1. Indicadores del nivel de calidad	86		
3.3.2. Indicadores de consumo y emisiones	93		
3.3.3. Indicadores de eficiencia energética de la movilidad	100		
4. RUIDO AMBIENTAL	105		

4.1. Ruido de Tráfico	108
4.1.1. Modelo de predicción de ruido de tráfico	117
4.2. Ruido de Trenes	120
4.2.1. Modelo de predicción del ruido de trenes	125
4.3. Paisaje sonoro como innovación metodológica para la integración ambiental de los sistemas de transporte público	129
4.3.1. Concepto	131
4.3.2. Objetivos	133
4.3.2. Caracterización del paisaje sonoro	133
4.4. Pautas para la integración acústica.	140
4.4.1. Fundamentos metodológicos	142
4.4.2. Fase I: Recopilación y Análisis de Información.	142
4.4.3. Fase II: Evaluación Acústica de Alternativas.	155
4.4.4. Fase III: Redacción del Plan de Acción.	165
4.5. Indicadores acústicos	170
4.5.1. Indicadores de aplicación	170
5. BIBLIOGRAFÍA	175
6. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	185

0 INTRODUCCIÓN

Los actuales espacios urbanos y metropolitanos se caracterizan por contar diariamente con un creciente nivel de movilidad, siendo algunos de sus principales impactos la ineficiente ocupación del espacio viario, altas tasas de emisión de gases contaminantes a la atmósfera, consumos energéticos ineficientes, así como también la producción de elevados niveles de contaminación acústica. Como respuesta a esta situación de insostenibilidad los gobiernos regionales y locales están aplicando un conjunto de medidas destinadas a incrementar la eficiencia ambiental de los flujos de movilidad existentes (planes de movilidad urbana sostenible –PMUS-, subvenciones a vehículos no contaminantes, etc.), entre las que destacan la incorporación de nuevos sistemas de transporte público colectivo como por ejemplo el metro ligero.

Es importante resaltar que la implantación de un sistema de transporte público, en el ámbito metropolitano, constituye una excelente oportunidad para hacer ciudad, ya que lleva implícita la búsqueda de parámetros de calidad ambiental más adecuados. Este proceso, en la presente guía, se define como Integración Ambiental y sus contenidos pretenden orientar sobre ello en las diferentes fases de un proyecto de transporte público, tomando como ejemplo el metro ligero. Por tanto, las aportaciones de esta guía también pueden ser extrapolables a cualquier otro sistema de transporte público colectivo (Bus, metro, tranvía, etc.).

Los bloques seleccionados para la configuración del presente documento incluyen aquellos que, siempre desde un enfoque ambiental, pueden tener más influencia a la hora de garantizar su éxito en términos de integración, generan mayores impactos y además suponen una innovación metodológica por los escasos avances, en herramientas y técnicas, aplicados en la práctica hasta la fecha. Los bloques definidos en esta guía son: la ocupación del viario, la calidad del aire, la eficiencia energética y el ruido.

La ocupación del viario es un factor determinante en el grado de éxito de cualquier sistema de transporte público debido a su capacidad para incrementar y mejorar la seguridad ciudadana en las vías públicas, el atractivo de la ciudad y su acondicionamiento como espacio de encuentro, ocio y relación social *-2-Ocupación del viario-*. El apartado que se ocupa de esta temática pretende aportar criterios para la planificación del viario y una metodología para abordar, desde el punto de vista de su rendimiento ambiental, la jerarquización del viario, la ocupación no motorizada del viario, el efecto barrera producido por la infraestructura de transporte y la eficiencia superficial de la movilidad motorizada.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad es cada vez más evidente la necesidad de reducir las emisiones de gases contaminantes y optimizar los recursos energéticos utilizados *-3-Calidad del aire y eficiencia energética-*. A este respecto, en la guía se muestran un conjunto de modelos (de emisiones, consumo y vulnerabilidad) con los que elaborar indicadores para estimar niveles de calidad del aire según los criterios establecidos en la normativa de referencia, consumos energéticos para los diferentes modos (públicos y privados) y estimaciones para las emisiones de gases efecto invernadero y la eficiencia energética de la movilidad.

Finalmente, la contaminación acústica está considerada como uno de los mayores problemas ambientales en las ciudades, siendo su principal fuente de emisión el tráfico motorizado (Raimbault, 2005). La principal aportación del presente trabajo, en materia acústica, es dotar

al lector de nuevas herramientas, técnicas y metodologías, que ayuden en el análisis, la evaluación y la actuación en materia acústica metropolitana *-4-Ruido Ambiental-*. En definitiva, se busca dar pautas para una correcta Planificación Acústica: control del ruido futuro mediante medidas planificadas, como la ordenación territorial, la ingeniería de sistemas de gestión del tráfico, la ordenación de la circulación, la reducción del ruido con medidas de aislamiento acústico y la lucha contra el ruido en su origen (Directiva 2002/49/CE del Parlamento europeo del Consejo, de 25 de junio de 2002).

0.1. ARGUMENTOS Y OBJETIVOS

El interés en la elaboración de una **guía metodológica para la integración ambiental de los sistemas de transporte público** reside esencialmente en la importancia de promover una adecuada integración de aquellos aspectos ambientales más relevantes de cara a:

- **Promocionar e incentivar la integración ambiental de la movilidad metropolitana** como consecuencia de la implantación de un sistema de transporte público.
- **Incorporar principios de movilidad sostenible** en la planificación de los sistemas de transporte público que repercutan en su integración (diseño) urbana.
- **Operativizar las cuestiones ambientales relacionadas con la movilidad** como elementos de orientación y decisión a la hora de elaborar proyectos de implantación de sistemas de transporte público.
- **Evaluar e identificar las externalidades ambientales** generadas por la implementación de sistemas de transporte público en el modelo de movilidad metropolitana.

Desde este planteamiento inicial, la guía intenta dar respuesta a algunas de las principales cuestiones ambientales relacionadas con la integración ambiental del transporte público, con especial atención a los sistemas de metro ligero, como son:

- ¿Qué dimensiones ambientales son relevantes para evaluar y diseñar metodologías de integración ambiental de sistemas de metro ligero en espacios metropolitanos?, ¿Cuáles son los principales modelos teóricos sobre los que sustentar la elaboración de un plan de integración ambiental en la implantación del sistema de metro ligero? –1. *La integración ambiental de los sistemas de transporte público*–.
- ¿Cómo medir la eficiencia ambiental en términos superficiales y energéticos en la implantación de un sistema de metro ligero en espacios metropolitanos? –2. *Ocupación del viario* y 3. *Calidad del aire y eficiencia energética*–.
- ¿Qué modelos emplear para generar y calcular índices de calidad del aire global y local que permitan evaluar la contribución de los sistemas de metro ligero respecto a la contaminación atmosférica (cambio climático)? –3. *Calidad del aire y eficiencia energética*–.
- ¿Qué modelos emplear para generar y calcular índices de calidad acústica que permitan evaluar la contribución de los sistemas de metro ligero a la disminución urbana de la presión sonora? –4. *Ruido ambiental*–.

0.2. ESTRUCTURA Y CONTENIDOS

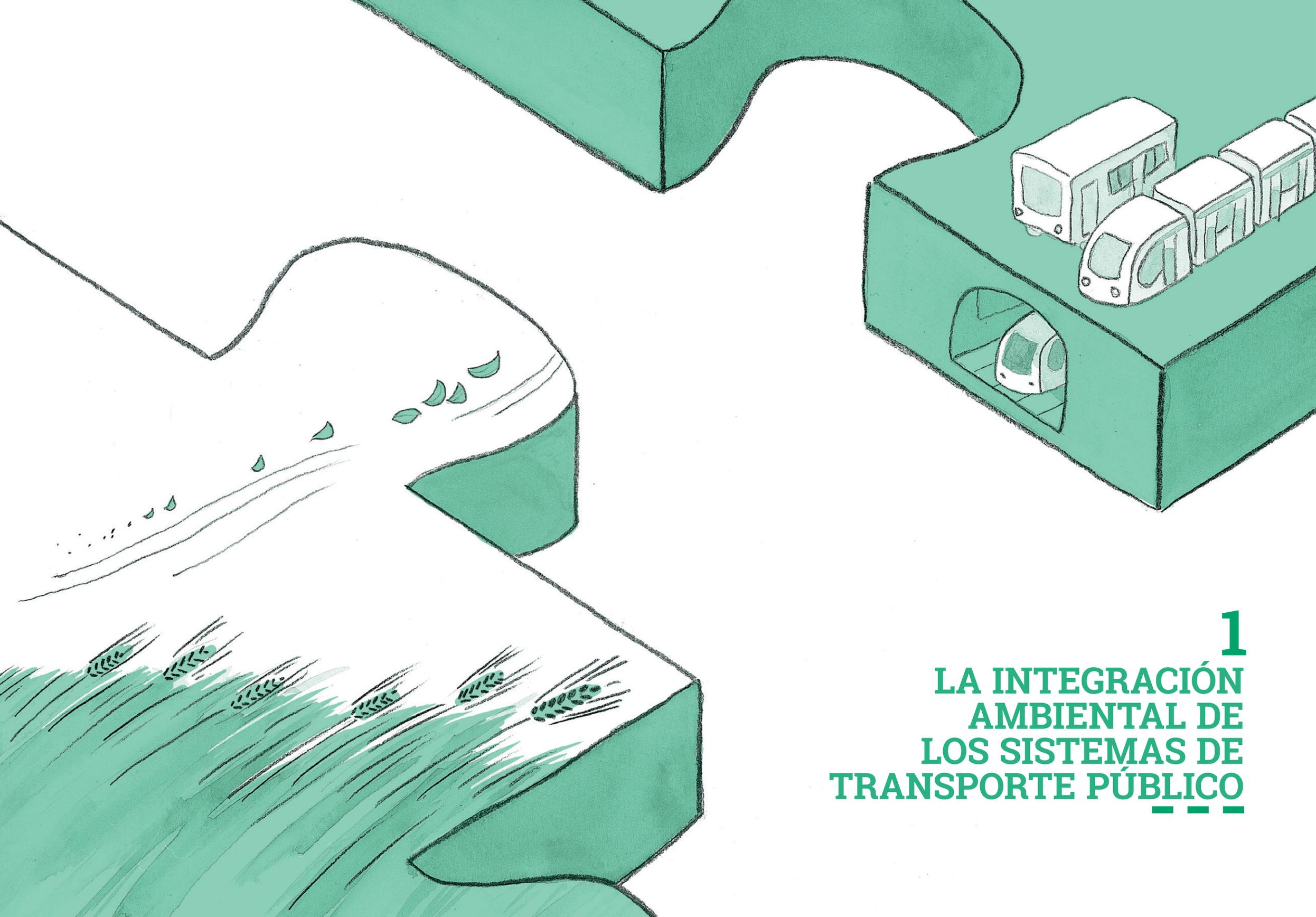
La guía se estructura a través de diferentes bloques cuyos contenidos tienen identidad autónoma, a la vez que ligados bajo el denominador común de la integración ambiental de los sistemas de metro ligero. Los apartados que componen la guía son:

- **Integración ambiental de los sistemas de transporte público**, donde se recogen los principios de la movilidad sostenible, información sobre la planificación ambiental de la movilidad, se describe la evaluación ambiental basada en el rendimiento y no en el impacto y se define que son los umbrales ambientales de integración ambiental.
- **Ocupación del viario**, apartado que se compone de una breve introducción sobre criterios generales en la planificación y el diseño del viario, para posteriormente abordar este elemento desde el punto de vista ambiental, estableciendo pautas para su jerarquización, estimación de la ocupación no motorizada del viario, su efecto barrera y su eficiencia superficial con respecto a la movilidad motorizada.
- **Calidad del aire y eficiencia energética**, se incluyen aspectos relacionados con las emisiones de gases efecto invernadero e índices de calidad para el aire local y global. Además, tratan aspectos relacionados con la eficiencia energética.
- **Ruido Ambiental**, se tratan aspectos relacionados con la calidad acústica ambiental como elemento de integración ambiental de los sistemas de metro ligero, orientando un cambio sobre la actual concepción basada exclusivamente en variables físicas por otra donde se incluyen elementos espaciales, perceptuales y psicosociales, además de los físicos.

En cuanto a los métodos y técnicas que conforman el desarrollo de la guía, es preciso apuntar que cada bloque cuenta con su propio desarrollo metodológico, aunque relacionados todos ellos por el enfoque ambiental con el cual se ha elaborado la guía.

Contexto y ejemplos: se utiliza fundamentalmente como contexto territorial el sistema de metro ligero del Área Metropolitana de Granada, que sirve para representar a nivel analítico y cartográfico cada uno de los contenidos que conforman la guía.

Buenas prácticas: la guía también incorpora, en cada uno de sus bloques y a nivel de síntesis, un catálogo de buenas prácticas, basado en algunas experiencias internacionales y, principalmente, recomendaciones sustentadas sobre el caso andaluz del Área Metropolitana de Granada en Andalucía.



1 LA INTEGRACIÓN AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

La dimensión ambiental cobra cada día mayor relevancia en los diferentes ámbitos de la planificación (urbana, territorial, de la movilidad, etc.). En esta ocasión, los esfuerzos se centran en los sistemas de transporte público, en general, y en los sistemas de metro ligero, en particular. En esta dirección, se inicia la guía hablando sobre los principios de la movilidad sostenible, la planificación ambiental de la movilidad, la evaluación ambiental de la movilidad y los umbrales de integración ambiental, como aspectos que conforman el marco teórico para mejorar la integración ambiental de los sistemas de transporte en los ámbitos metropolitanos.

1.1. PRINCIPIOS DE LA MOVILIDAD SOSTENIBLE

Antes de entrar a definir cuáles son los principios de la movilidad sostenible es necesario diferenciar, de forma breve y genérica, entre transporte y movilidad. Esta aclaración va a permitir comprender con mayor claridad cuál es el origen y los aspectos ambientales que configuran los principios de movilidad sostenible, distinguiéndola así del concepto transporte que se aleja del enfoque perseguido en esta guía.

Al hablar de transporte, normalmente, se hace mención a la acción de trasladar personas o mercancías de un punto a otro (Banister, 1996), lo cual implica un notable gasto energético y uso de recursos desde el punto de vista ambiental (Soria, 1980). Situación que se está viendo agravada durante los últimos años debido al elevado aumento en el número de vehículos privados –Tabla 1–.

REGIÓN	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Arab World				78,27			
East Asia & Pacific (all income levels)	83,98	87,88	91,85	105,96	98,64	113,25	119,40
Euro area	544,89	571,90	577,52	583,65	587,17	589,87	593,45
Europe & Central Asia (all income levels)	355,57	385,52	397,13	398,91	415,35	417,82	452,59
European Union	492,48	516,46	523,64	533,09	540,71	543,83	547,41
High income	537,73	543,04	557,84	562,72	571,79	571,19	620,47
High income: non OECD	228,49	233,38	249,53	257,41	280,76	285,12	
High income: OECD	606,43	616,22	620,26	626,41	628,98	627,09	629,21
Latin America & Caribbean (all income levels)	151,31	157,36	168,57	179,91	186,30		
Middle income	43,65	49,09	54,04		62,96	59,99	
North America	810,00	816,00	795,16	798,03	794,26	782,68	797,00
OECD members	534,56	545,71	553,95	560,04	563,77	563,13	563,06
South Asia	12,04	12,86	14,06		16,02	17,40	
Sub-Saharan Africa (all income levels)				28,21			
World	147,67	155,66	165,22	193,94	172,63	176,02	

Tabla 1. Vehículos motorizados por cada 1.000 hab.
Fuente: Adaptado de The World Bank (02/09/2013).

Esta situación obliga a hacer frente a los principales impactos derivados del uso del vehículo privado, que de forma resumida podrían recogerse en los siguientes puntos (Newman y Kenworthy, 1999; Dupuy, 1999):

- **Impactos ambientales:** especialmente los relacionados con el uso ineficiente de energía y espacio, así como con la generación de residuos tóxicos y ruidos, los cuales tienen especial incidencia en la calidad del aire local.
- **Habitabilidad de la ciudad:** derivado de la mayor ocupación de espacio por parte del automóvil, lo que afecta a la propia identidad

del espacio urbano, induciendo en muchos casos, una pérdida de vitalidad del mismo, especialmente el viario.

- **Equidad social:** relacionada con la prioridad dada al vehículo privado sobre el resto de modos de transporte y las dificultades que esto supone en aquella población que no puede acceder al uso del automóvil.
- **Eficiencia económica:** que tiene que ver tanto con la realización y mantenimiento de infraestructuras viarias como con los elevados costes económicos de viajar en coche en vez de usar otros modos de transporte.

Por su parte, el concepto de **movilidad** puede y debe entenderse de una manera más amplia, orientado fundamentalmente a los desplazamientos de las personas (Miralles y Cebollada, 2003; Santos y De las Rivas, 2008) y a las diferentes opciones que lo posibilitan (Cebollada y Miralles, 2004). De acuerdo con Herce (2009, pp. 51-52), la movilidad se refiere "a formas de desplazamiento, oferta de posibilidades, así como, gestión del gasto energético y del espacio". El problema de la movilidad, desde el punto de vista de la sostenibilidad, está en la complejidad de determinar algunas dimensiones de las externalidades asociadas –Tabla 2–.

¿QUIÉN?

Una parte de los costes de la movilidad los asume el individuo que realiza el desplazamiento y otra parte la colectividad.

¿CUÁNDO?

Según en qué momento se generen, serán directos (relacionados con el desplazamiento) o indirectos (relacionados con las infraestructuras, construcción y destrucción del vehículo).

¿CÓMO?

No todos los costes de la movilidad son fácilmente monetarizables y mucho menos cuantificables; así, existen costes cuantificables y costes no cuantificables

Tabla 2. Las dimensiones de los costes de la movilidad.
Fuente: Miralles y Cebollada (2003)

Es a partir de la creciente preocupación por los temas ambientales, surgida a principios de los años 70 (Conferencia sobre Medio Humano

de Estocolmo, 1972), cuando se han ido produciendo diferentes avances en investigación sobre cómo mejorar el transporte y la movilidad desde el punto de vista ambiental. Los primeros logros, en el ámbito español, tienen lugar en la década de los 90 y estaban dirigidos a favorecer la coordinación entre el planeamiento urbanístico y sectorial (Crespo, 1992; Pozueta, 1992; Rubio, 1992), la relación entre movilidad y diseño urbano (Hernández-Aja, 1992; Pozueta, 1992; Puig-Pley, 1992) y la recuperación de los centros históricos de las ciudades para el peatón (Otaola, 1992; Corral, 1992). Además, es en esta época cuando se origina la verdadera preocupación por los dos principales problemas sobre los que influye el transporte de manera muy notable: el cambio climático y la eficiencia energética.

Posteriormente y a nivel europeo, Banister (2005), en “Unsustainable transport. City Transport in the new Century”, define una serie de **principios de movilidad sostenible** orientados al caso particular de la movilidad urbana:

- Reducir la necesidad de viajar, especialmente a través de poner en valor el concepto de proximidad y reforzando la identidad de cada espacio urbano.
- Reducción de los viajes en automóvil, como paso clave para cambiar las principales tendencias actuales de movilidad urbana.
- Promover modos de viaje más eficientes a nivel energético, especialmente a través de la implantación de sistemas de transporte público alternativos al automóvil.
- Reducción en la fuente de ruidos y emisiones atmosféricas, fundamentalmente mediante la implantación de sistemas de transporte público alternativos al automóvil.
- Fomentar un comportamiento responsable en la adquisición de automóviles.
- Incrementar y mejorar la seguridad de los ciudadanos en las vías públicas.
- Incrementar y mejorar el atractivo de la ciudad para peatones, trabajadores, comerciantes y visitantes, para lo que es funda-

mental la recuperación de la vía como espacio no exclusivamente destinado a la movilidad motorizada.

1.2. LA PLANIFICACIÓN AMBIENTAL DE LA MOVILIDAD

Una correcta integración ambiental requiere considerar una gran cantidad de variables (sociales, urbanas, modales, económicas, tecnológicas, ambientales, etc.). En este apartado se aborda la planificación de la movilidad desde el punto de vista ambiental, mostrando algunos de los enfoques existentes y sus respectivos métodos de aplicación.

Los actuales modelos de predicción de la demanda, que además corresponden con los más utilizados para la planificación de los sistemas de transporte público, presentan una serie de problemas con respecto a nuevos enfoques más próximos al punto de vista ambiental o de la sostenibilidad de la movilidad urbana (Herce, 2009) y se pueden resumir en:

- Tienen una concepción de la movilidad basada en el desplazamiento y el tiempo de viaje, mientras que una aproximación sostenible de la movilidad estaría basada en reducir los desplazamientos fortaleciendo la identidad local del espacio urbano, a la vez que priorizando la regularidad frente al tiempo de viaje.
- Conceptualmente están orientados a los viajes en automóvil, considerando residualmente otros modos de transporte, mientras que una aproximación sostenible de la movilidad daría prioridad a la oferta de modos de transporte con altas eficiencias en el uso del espacio y de la energía.
- Operan sobre el concepto de capacidad de carga máxima de la vía, lo que induce a la propuesta (constante) de nuevos viales, mientras que desde una perspectiva sostenible se incidiría sobre la gestión

de las infraestructuras existentes (distribución modal, fiscalidad, gestión de flujos, etc.).

- Cuando consideran el transporte público, generalmente lo hacen a partir del tiempo de viaje, sin considerar otros factores determinantes para un exitoso funcionamiento de éste, como por ejemplo, el número y la localización de las paradas, frecuencias, puntualidad, etc., claves desde una lógica ambiental de la movilidad urbana.

APROXIMACIÓN CONVENCIONAL PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA MOVILIDAD URBANA	APROXIMACIÓN BASADA EN PRINCIPIOS DE MOVILIDAD URBANA SOSTENIBLE
Basada principalmente en la ingeniería del transporte	Visión más holística integrando junto con la ingeniería del transporte la planificación territorial y urbanística
Movilidad orientada al tráfico (dimensión física)	Movilidad orientada a los ciudadanos (dimensión social)
Promoción de la movilidad de largo recorrido	Promoción de una movilidad local y especializada
Fomento del diseño de la calle como una carretera	Fomento del diseño de la calle como espacio de estacionamiento y relación social
Evaluación de la accesibilidad en términos de coste-beneficio (ej. Ahorro de tiempo)	Evaluación integral de la accesibilidad incorporando parámetros urbanísticos y ambientales (ej. Actividades a realizar en un espacio o impactos ambientales respectivamente).
Basado en la predicción de la demanda	Basado en la gestión de la demanda
Centrado en el aumento de la velocidad del tráfico	Centrado en calmar los flujos de tráfico
Basado en la minimización del tiempo de viaje	Basado en tiempos razonables y
Segregación de tráfico y ciudadanos	Integración de tráfico y ciudadanos

Tabla 3. Comparativa de enfoques de planificación de la movilidad.

Fuente: Marshall (2001) y Banister (2005) citado en Soria-Lara (2011 p. 28) y Valenzuela et al (2011)

Para solventar algunas de las deficiencias anteriores, surgieron las primeras alternativas a finales de los años 80 y principios de los 90, con el desarrollo de nuevas estrategias y enfoques como son:

- **Planificación Urbanística:** estrategia basada en las relaciones entre transporte y estructura urbana como parámetro de control y gestión de la movilidad. También reciben el nombre de modelos de oferta, ya que en buena medida son concebidos para gestionar la movilidad por medio del control de la oferta de actividades en la ciudad. Un ejemplo pionero de este tipo de enfoques fue la política ABC holandesa a comienzos de los años 90 (Schwanen et al., 2004).
- **Regulador-Fiscal:** importante estrategia a nivel europeo desarrollada especialmente a partir de 1992 tras la publicación del informe "The Future Development of The Common Transport Policy: A global approach to the construction of a community framework for sustainable mobility" (CEC, 1992). Se tratan de medidas destinadas a limitar el número de desplazamientos, especialmente los menos frecuentes o innecesarios. Se basan en imputar al viajero el coste total del viaje, generalmente, mediante un impuesto de circulación. Uno de los ejemplos más destacados es el impuesto en el centro urbano de Londres (Banister, 2005).
- **Tecnológica:** importante de cara a la evolución de los diferentes sistemas de transporte hacia una mayor eficiencia ambiental. En este sentido, dos ejemplos estratégicos son el desarrollo de legislaciones y programas de ayuda para potenciar vehículos de bajas emisiones y la promoción de biocombustibles.

La aparición de estos modelos ha dado lugar a nuevos planteamientos denominados *modelos de gestión de la demanda* (Owens, 1995; May et al., 2003; Bertolini et al., 2008) que centran sus objetivos en el incremento de la oferta modal, la gestión de las infraestructuras existentes, conjuntamente con la reducción de la necesidad de viajes, posicionándose como los modelos más idóneos de cara a alcanzar una movilidad

urbana más sostenible. Por tanto, la planificación ambiental de la movilidad pasa por desechar los modelos de predicción en pro de otros nuevos basados en la gestión de la demanda. En definitiva, se trata de estrategias de integración, búsqueda de sinergias y superación de barreras para la implementación de medidas vinculadas a cada uno de los anteriores planteamientos alternativos (May et al., 2003).

MODELOS TEÓRICOS-ESTRATÉGICOS PARA LA ELABORACIÓN DE UN PLAN DE INTEGRACIÓN

Planificación Urbanística (Schwanen et al., 2004)

Regulador-Fiscal (CEC, 1992)

Tecnológica

Modelos de Gestión de la Demanda (Owens, 1995; May et al., 2003; Bertolini et al., 2008)

1.3. EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA MOVILIDAD: IMPACTO AMBIENTAL Y RENDIMIENTO AMBIENTAL

En términos generales y en particular en lo que concierne a la movilidad urbana, la evaluación ambiental está orientada a determinar si las propuestas o intervenciones cumplen con una serie de objetivos ambientales (reducción de viajes, reducción del ruido y las emisiones atmosféricas, incremento de la seguridad y el confort viario, etc.).

Retomando los factores clave descritos en el apartado anterior, se entiende que la evaluación ambiental precisa de métodos de evalua-

ción que ayuden a determinar aspectos que estén más relacionados con su funcionalidad y menos con sus consecuencias proyectuales (Soria-Lara y Valenzuela-Montes, 2014). En este sentido, resulta muy oportuno reflexionar sobre las diferencias conceptuales entre dos posibles formas de evaluación, aquella basada en el Rendimiento Ambiental y la fundamentada en el Impacto Ambiental.

Atendiendo en primer lugar al **Impacto Ambiental**, desde su acepción más general, podría definirse como un “conjunto de posibles efectos negativos sobre el medio ambiente de una modificación del entorno natural, como consecuencia de obras u otras actividades” (R.A.E.). También hay otras definiciones que lo consideran simplemente como una “alteración que introduce una actividad humana en su entorno” (Gómez, 1999, p. 161; 2007). Tales definiciones corroboran que se trata de una relación causal acción-impacto (Soria-Lara, 2011). El problema de este tipo de evaluación se produce “cuando se quiere no solo evaluar el efecto de un plan o proyecto, sino diagnosticar cómo funciona desde un punto de vista ambiental, lo cual puede ser fundamental en el caso de sistemas complejos como la movilidad urbana” (Soria-Lara, 2011).

Tratando de subsanar tal deficiencia surge el concepto de **Rendimiento Ambiental**, siendo más apropiado para armar una propuesta de evaluación que quiera medir el funcionamiento de un sistema (De Borger et al., 2002). A partir de esta nueva forma de proceder es posible establecer las principales diferencias con respecto a la evaluación basada en el impacto ambiental y, de forma conjunta, subrayar sus principales características:

- Mientras que el **impacto ambiental está orientado a valorar cómo es el cambio** que se produce en el entorno (reversible, irreversible, puntual o global, sinérgico o individual, etc.), el **rendimiento ambiental orienta sus resultados a analizar cómo funciona el sistema** (más sostenible o menos sostenible).
- Los resultados derivados de medidas de **impacto ambiental informan sobre el grado de transformación** que se produce en el en-

torno, mientras que los derivados de las medidas de **rendimiento informan en términos de eficacia y eficiencia ambiental**.

- Las evaluaciones basadas en términos de **impacto inciden sobre una visión individualizada** de los efectos ambientales, mientras que las basadas en términos de rendimiento lo hacen sobre una visión de conjunto.

De los anteriores puntos diferenciales puede deducirse que uno de los requisitos que precisan los sistemas de evaluación, basados en el rendimiento como instrumento principal, es un conjunto de indicadores –1.3.1. *Indicadores de sostenibilidad y sistemas de monitorización*–, en este caso particular, relacionados con la sostenibilidad en la movilidad. Además, este procedimiento basado en indicadores permitirá extraer conclusiones en relación con el funcionamiento del sistema: más o menos sostenible, el grado de eficacia y eficiencia ambiental de las transformaciones producidas en el entorno metropolitano y evaluar el impacto en términos de rendimiento ambiental sobre el conjunto de la infraestructura.

SISTEMAS DE EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO AMBIENTAL (SERA)

Objetivo: diagnosticar cómo funciona un plan o proyecto desde el punto de vista ambiental.

Características (Naess et al., 2007):

- Operan sobre el funcionamiento de la movilidad y no necesariamente sobre sus posibles consecuencias ambientales en términos de impacto;
- Aunque se basan en el uso de indicadores ambientales, no son un sistema de monitorización, entre otras cosas porque su enfoque es fundamentalmente prospectivo y no retrospectivo.

TIPOS DE EVALUACIÓN:

	BASADA EN EL IMPACTO	BASADA EN EL RENDIMIENTO
Valoración	Cómo es el cambio	Cómo funciona
Resultados	Grado de transformación	Eficacia y eficiencia ambiental
Visión	Individualizada	De conjunto

► 1.3.1. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD Y SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN AMBIENTAL

Algunos organismos e instituciones internacionales están diseñando y difundiendo diferentes sistemas de monitorización e indicadores relacionados con la sostenibilidad ambiental en la movilidad y el transporte. Estos ejemplos pretenden servir de base documental para ayudar en la evaluación basada en el rendimiento ambiental. Sin embargo, no hay que olvidar que el propósito de los sistemas de evaluación del rendimiento ambiental es distinto al de los sistemas de monitorización –Tabla 4–

SISTEMAS DE EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO	SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> Evalúa actuaciones, propuestas, etc. Son puntuales Vinculados a estrategias, programas, planes o proyectos Específicos, ad hoc Los Resultados informan sobre compensaciones entre actuaciones Útiles para seleccionar actuaciones 	<ul style="list-style-type: none"> Realiza seguimiento Secuencia temporal No necesariamente vinculados a estrategias, programas, planes o proyectos Globales, genéricos Los resultados informan sobre tendencias, dinámicas y procesos Útiles para proponer actuaciones

Tabla 4. Sistemas de evaluación del rendimiento vs sistemas de monitorización.

Fuente: Soria-Lara (2011 p. 36).

El primero de ellos que cabe destacar es el propuesto por la Comisión Europea, con el que monitorizan la Estrategia Europea de Desarrollo Sostenible –Tabla 5– y cuyos bloques temáticos e indicadores son:

Objetivo General: evaluar la estrategia europea de desarrollo sostenible en relación con el transporte

BLOQUES TEMÁTICOS	INDICADORES
1. Evolución del transporte	<ul style="list-style-type: none"> Reparto modal de los pasajeros Reparto modal del transporte de mercancías Volumen de mercancías transportando a un precio constante Energía consumida por cada modo de transporte
2. Impacto social y medioambiental	<ul style="list-style-type: none"> Muertes por accidente de carretera Accidentes por carretera según edad Emisión de NOx por vehículo

Tabla 5. The EU Transport Sustainability Indicators.

Fuente: EC, 2009; EUROSTAT, 2009)citado en Soria-Lara (2011 p. 35)

Otro ejemplo es el sistema de indicadores TERM (EEA, 2009) que publica anualmente la Agencia Europea de Medio Ambiente, centrado en el seguimiento del sistema de transporte europeo, poniendo el acento en la tendencia de éste respecto a determinados objetivos medioambientales –Tabla 6–.

Objetivo: monitorizar la evolución de los transportes en el marco de la UE, especialmente en lo relacionado con sus efectos medioambientales.

BLOQUES TEMÁTICOS	INDICADORES
1. Consecuencias ambientales del transporte	<ul style="list-style-type: none"> Consumo de energía Emisión de COx y NOx Emisión de contaminantes atmosféricos (SOx PM) Porcentaje de población expuesta a niveles altos de ruido Fragmentación de ecosistemas y hábitats Población expuesta a una mala calidad del aire Suelo ocupado por cada modo de transporte Contaminación por accidentes de cada modo Desastres marítimos ilegales Descargas accidentales de fuel en el mar Residuos derivados de las carreteras
2. Demanda del transporte	<ul style="list-style-type: none"> Reparto modal de los pasajeros Reparto modal del transporte de mercancías
3. Accesibilidad y ordenación del territorio	<ul style="list-style-type: none"> Acceso a equipamientos y servicios públicos
4. Prestaciones de las infraestructuras del transporte	<ul style="list-style-type: none"> Capacidad de las infraestructuras según modo Inversiones en infraestructuras per cápita
5. Costes del transporte	<ul style="list-style-type: none"> Cambios de modo de transporte por la población Precios del combustible Total de costes externo por pasajero y modo Implementación de internalización de costes Nivel de subsidios Gastos en personal

BLOQUES TEMÁTICOS	INDICADORES
6. Tecnología y eficiencia	<ul style="list-style-type: none"> Eficiencia energética por persona y Km Eficiencia de las emisiones por persona y Km Ratios de ocupación por modo de transporte Adopción de combustibles más limpios Sistemas de carga en el transporte de mercancías Tamaño de los vehículos de transporte público Edad de los vehículos de transporte público Proporción de vehículos con tasas de ruido elevadas
7. Gestión integrada	<ul style="list-style-type: none"> Número de estados miembros con gestión integrada Estados con departamentos temáticos coordinados Estados con sistemas de monitorización ambiental Adopción de estrategias de evaluación ambiental Sensibilización del público y comportamiento Adopción de sistemas de gestión ambiental en el transporte

Tabla 6. Transport and Environment Reporting Mechanism
Fuente: TERM; EEA, 2009 citado en Soria-Lara (2011 p. 35)

Esta recopilación de indicadores es sólo una pequeña muestra de los que actualmente están siendo utilizados en la gestión y monitorización del transporte. Con ellos se trata de facilitar el proceso de evaluación ambiental basada en el rendimiento. En apartados sucesivos se emplean algunos de ellos a modo de ejemplo, relacionados con aspectos como la ocupación del viario, las emisiones de gases efecto invernadero, el consumo energético y el ruido.

► 1.3.2. UMBRALES DE INTEGRACIÓN AMBIENTAL

Un hecho a destacar en la integración ambiental de sistemas de transporte público es la búsqueda de estándares de referencia o “umbrales ambientales”. Trazar la línea sobre “qué funciona” y “qué no funciona” desde un punto de vista ambiental ha suscitado un importante debate a nivel técnico y académico en la integración de planes y proyectos (Nijkamp, 2004; Deakin, et al, 2007).

Desde este punto de vista, contar con “umbrales ambientales” puede ser de enorme utilidad para evaluar la eficacia ambiental de una determinada intervención urbana como, por ejemplo, la implementación de un sistema de metro ligero.

A la hora de establecer un procedimiento para la estimación de “umbrales ambientales” es importante distinguir entre aquellos que se encuentran regulados a nivel normativo de los que no lo están. De forma general, existe una importante regulación normativa a nivel europeo, estatal o regional, para aspectos cruciales en la integración ambiental como, por ejemplo, la emisión de ruido –4. *Ruido Ambiental*– o la emisión de otro tipo de contaminantes atmosféricos –4.4.2. *Fase I: Recopilación y análisis de información. c) Delimitación de áreas acústicas*–. En este caso, lo más útil es tomar dicha normativa como referencia para establecer sus valores umbrales –ver ejemplos en apartados 3. *Calidad del aire y eficiencia energética* y 4. *Ruido ambiental*–.

Por el lado contrario, en el caso de que el parámetro ambiental a evaluar no esté regulado a nivel normativo como, por ejemplo, el efecto barrera o la eficiencia superficial de la movilidad urbana –ver apartados 2.2.3. *Efecto barrera* y 2.3. *Eficiencia superficial de la movilidad motorizada*–, lo más apropiado es seguir un procedimiento ad hoc para la obtención de posibles umbrales ambientales. La estimación de éstos dependerá del tipo de proyecto y sus características. En el caso particular de los sistemas de metro ligero, tales métodos se pueden basar en el diseño de secciones de calle representativas de situaciones específicas de “calidad ambiental” e “impacto ambiental”. Este último ha sido el procedimiento seguido en los casos específicos de ocupación del viario desarrollado en el apartado 2.2.2. *Ocupación no motorizada el viario de la presente guía metodológica*.

Con el fin de profundizar en esta discusión, la Tabla 7 compara algunos rasgos significativos de aquellos “umbrales ambientales” derivados de la regulación normativa existente de los que no lo están.

UMBRALES CON NORMATIVA REGULADORA	UMBRALES SIN NORMATIVA REGULADORA
Generales	Específicos
Directamente aplicables	Requieren estimación previa
Umbrales exportables	Método de estimación exportable
Reconocimiento “global”	Sujetos a particularidades del contexto
Derivan de una concienciación ambiental	Generan concienciación ambiental

Tabla 7. “Umbrales ambientales” con regulación normativa vs “Umbrales ambientales” sin regulación normativa.

Fuente: Soria-Lara (2011, p. 212)

2 OCUPACIÓN DEL VIARIO



Uno de los factores clave en la integración de los sistemas de metro ligero, extrapolable a otros sistemas de transporte público, es la ocupación del viario desde la óptica de su rendimiento ambiental. Este espacio es un elemento esencial en la generación de relaciones sociales en la ciudad, la seguridad de las vías públicas y el atractivo de la ciudad para ciudadanos y visitantes.

En línea con todo lo anterior, la planificación del viario, desde un enfoque ambiental, se aborda atendiendo a su jerarquización, reparto espacial entre los diferentes modos motorizados y no motorizados, su efecto barrera y la eficiencia superficial de la movilidad no motorizada.

2.1. CRITERIOS GENERALES PARA LA PLANIFICACIÓN Y EL DISEÑO DEL VIARIO

En el ámbito académico son muchos los estudios que están poniendo especial énfasis en generar criterios con los que planificar un viario desde el punto de vista de la sostenibilidad (Fariña y Naredo, 2010; Pozueta, 2009) y desde una perspectiva ambiental (Herce, 2007). Todos estos avances se corresponden con directrices genéricas pero probablemente acertadas sobre cuáles son los puntos clave a tener en cuenta a la hora de planificar una calle. A continuación, se recogen algunas variables de los sistemas viarios (criterios generales, diseño y planificación, ejecución y construcción, gestión y conservación) que deberían ser contempladas en la planificación y proyecto de cualquier sistema de transporte público.

En primer lugar, si se atiende al *"Libro blanco de la sostenibilidad en el planeamiento urbanístico español"*, en su **Anexo III. Guías y Manuales** se pueden encontrar los siguientes **Criterios de base para la planificación de sistemas viarios**:

• Criterios generales

- Prioridad de los medios de transporte de menor coste ambiental.
- Fomento e incentivación de sistemas de transporte de bajo impacto.
- Fomento del desarrollo urbano sostenible integral.
- Establecimiento de coordinación de diferentes transportes públicos.
- Creación y ejecución de una disciplina del tráfico.
- Propuestas y actuaciones de mejora de la seguridad.
- Análisis de las políticas de planificación de infraestructuras.
- Favorecimiento del intercambio modal.
- Políticas intensas de Educación Ambiental y Vial.

• Diseño y planificación:

- Usos del suelo promocionando el tráfico peatonal.
- El diseño debe tener implícito medidas de seguridad.
- Producción de bajo impacto en el entorno de la ciudad.
- Reducción de la Contaminación Acústica.
- Valorar el grado de satisfacción según su funcionalidad (en función del viario).
- Facilitar la accesibilidad urbana y respetar zonas peatonales.
- Planificación inmersa en Planes Generales de Ordenación Urbanística Municipal.
- Minimización de las alteraciones del suelo y el paisaje.
- Minimización de recorridos.
- Evitar cruzar zonas verdes y peatonales.
- Atender a normas ambientales propuestas a nivel nacional y europeo.
- Orientación de la vía.
- Adaptación a la topografía.

• Ejecución y construcción:

- Ancho de la vía.
- Tipo de pavimentación y pintura utilizada.
- Señales de limitación de velocidad.
- Creación de carriles de transporte público y bicis.
- Minimización de contaminación acústica.
- Creación de tramos rectos y sin pendientes.
- Construcción de zonas verdes.
- Integración de espacios libres urbanos.

• Gestión y conservación:

- Congelación de tarifas transportes públicos.
- Creación de nuevas líneas de autobuses.
- Creación de otro tipo de transporte público más sostenible (tranvía y metro).
- Aumentar las áreas restringidas al tráfico rodado.
- Mejorar canales de comunicación (tiempo de espera hasta próxima estación) para potenciar uso de transportes públicos.
- Rehabilitar zonas peatonales existentes.

- Potenciar el uso de la bicicleta.
- Educar ambientalmente e informar a los ciudadanos.
- Concentrar usos en un área (centros comerciales...), de este modo, se ahorraría tiempo y energía.
- Potenciar el uso correcto de los recursos naturales existentes (vientos, calor, sol, humedad,...).
- Utilizar espacios verdes para usos recreativos.
- Hacer uso de plantas con poca necesidad de cuidados y agua, dependiendo de los municipios andaluces.
- Regular la velocidad.
- Minimizar pendientes.
- Uso de pavimentos especiales.
- Utilización tipográfica para el aprovechamiento de las barreras naturales.
- Creación de diques de tierra para el acuartelamiento de las vías.
- Creación de pantallas sónicas y arboladas.

También existen otros documentos como son manuales para el diseño de los viales, algunos ejemplos son:

- Recomendaciones para el proyecto y diseño del viario urbano (Manchón y Santamera, 1995).
- Manual for streets (<https://www.gov.uk/government/publications/manual-for-streets>).
- Designing Walkable Urban Thoroughfares: A Context Sensitive Approach (<http://www.ite.org/emodules/scriptcontent/orders/productdetail.cfm?pc=RP-036A-E>).

Todo este conjunto de variables y criterios se entiende que deberían ser incorporados durante las fases de planificación y proyecto de los sistemas de transporte público. Aunque tienen un carácter muy general, pueden ayudar a orientar para aumentar la integración ambiental del sistema de transporte público con respecto al viario junto con las técnicas de planificación ambiental que se muestran a continuación.

2.2. LA PLANIFICACIÓN DEL VIARIO DESDE UNA PERSPECTIVA AMBIENTAL

Abordar la planificación del viario desde una perspectiva ambiental obliga a fijarse, en un primer momento, en dos de los principios de la movilidad urbana sostenible:

- Incrementar y mejorar la seguridad de los ciudadanos en las vías públicas.
- Incrementar y mejorar el atractivo de la ciudad para los peatones, trabajadores, comerciantes y visitantes, para lo que es fundamental la recuperación de la vía como espacio público no destinado a la movilidad motorizada.

Consecuentemente, se hace necesario plantear y generar pautas de integración ambiental del sistema de transporte público en el viario que atiendan a su jerarquización, su ocupación no motorizada, el efecto barrera que producen y la eficiencia superficial de la movilidad que van a producir.

PLANIFICACIÓN AMBIENTAL DEL VIARIO

Jerarquización del viario: categorización del viario en función de su intensidad de tráfico asumible e identificación de las áreas ambientales.

- Vías urbanas exclusivas para el tráfico automóvil
- Red viaria básica
- Red viaria local
- Red viaria vecinal

Ocupación no motorizada del viario: estimación de la superficie pública viaria destinada a movilidad no motorizada, para conocer la contribución del corredor que se está proyectando al espacio de encuentro, ocio y relación social.

$$CRV_s = (C_s / P_s)$$

Efecto barrera: estimar el grado de impedancia viaria existente para el peatón, tratando de extraer conclusiones en relación con un tránsito más agradable y flexible en la vía, así como sobre el espacio destinado al encuentro, estacionamiento y ocio.

$$EBs = \left[\sum_j c_j f_j \right] W_s / 100$$

Eficiencia superficial: estimación del número de pasajeros transportados por unidad de superficie.

$$ESM = \frac{\sum_{modo} viajeros_{modo}}{\sum_{modo} superficie_{modo}}$$

► 2.2.1. JERARQUIZACIÓN DEL VIARIO

Los diferentes modos de transporte por los cuáles hoy día es posible desplazarse en cualquier ciudad hacen replantearse qué vías son las más adecuadas para cada uno de ellos. Normalmente, los modos más débiles (peatón y bicicleta) se ven desplazados o en desventaja con respecto al vehículo privado u otros medios motorizados (autobús o motocicletas). Por tanto, es necesario e imprescindible jerarquizar la red viaria –Figura 1–, más aún cuando se planifican y proyectan actuaciones como la de un sistema de metro ligero en un ámbito urbano y metropolitano no previsto por el planeamiento con la suficiente antelación.

De acuerdo con toda la argumentación anterior, es preciso, al menos durante la fase de planificación, proponer y desarrollar un método de jerarquización del viario mediante el cual establecer su capacidad en relación con sus funciones, centrando el tema en las variables ambien-

tales ya comentadas: integración social, competitividad, sostenibilidad, salud, etc.

Partiendo de los resultados del estudio de Herce (2007) sólo el 25% del viario suele ser ocupado por la circulación urbana de coches, de manera que sería posible liberar el resto para priorizar otros usos. De esta manera y de acuerdo con la metodología de tipificación del viario propuesta por Espelt et al., (2008), según criterios ambientales con datos sobre las intensidades de tráfico asumibles, es posible distinguir cuatro tipos de vías –Tabla 8–.

TIPOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	INTENSIDAD DE TRÁFICO ASUMIBLE (VH/D Y C)*
Vías urbanas exclusivas para el tráfico automóvil	Autopistas y autovías urbanas. Carreteras urbanas.	20.000 17.000
Red viaria básica	Prioridad vehículos a motor, sobre todo autobuses del transporte público.	<10.500
Red viaria local	Vías que posibilitan el acceso desde la red básica al interior de las áreas con moderación de tráfico y preferencia peatonal.	<7.800
Red viaria vecinal	Tráfico reducido a los residentes y los servicios, con velocidades de paso compatibles con el peatón y la bicicleta. Distinguiéndose tres tipos:	<4.800
	1.-Zona 30	3.000
	2.-S-28	2.000
	3.-Calles de peatones	1.000

* Vehículos/día y carril (vh/d y c)

Tabla 8. Jerarquización del viario según intensidades de tráfico.
Fuente: Elaboración propia a partir de Espelt et al., (2008).

Jerarquizar el viario va a permitir identificar las **áreas ambientales** (calles cuyas condiciones son óptimas para los peatones o la movilidad motorizada) y poner en marcha medidas de reducción de la accesibilidad motorizada (Estevadeordal, Parés y Ruano, 2002). Este tipo de zonificación ya se emplea en algunos Planes de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS) catalanes (Amposta o Figueras), cuyo fin último es aumentar la calidad ambiental del viario por medio de la promoción de corredores como espacios de ocio, encuentro y relación social, tal y como se exige en los principios de movilidad urbana sostenible.

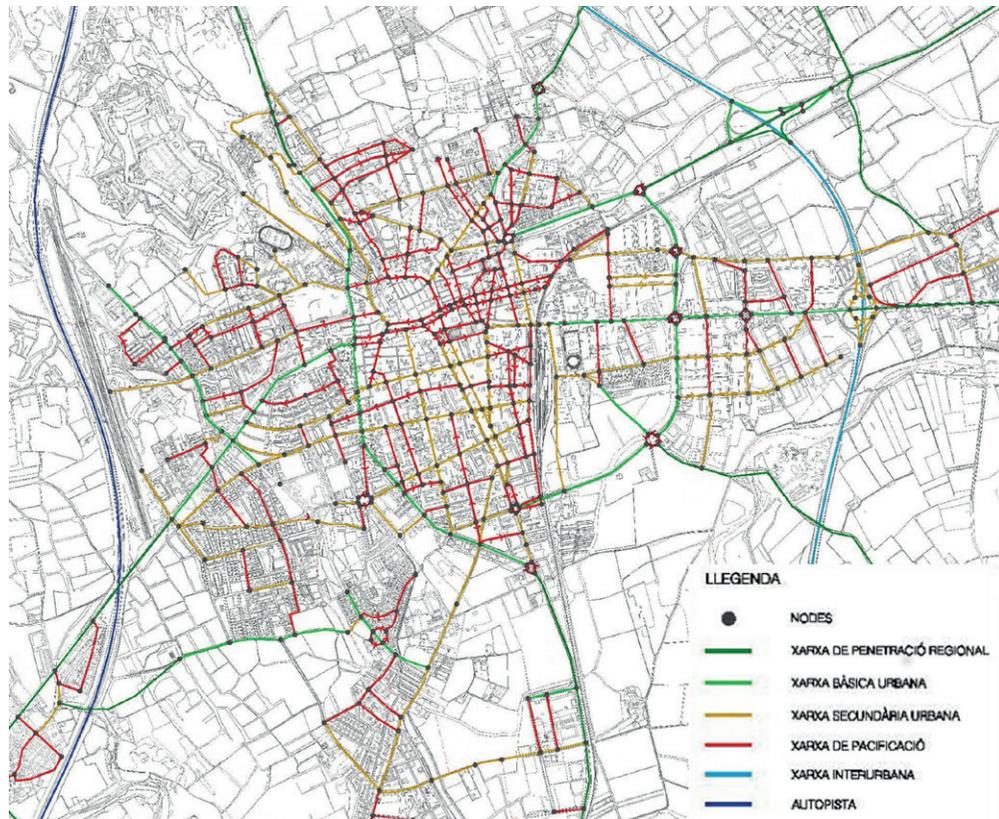


Figura 1. Ejemplo de jerarquización del viario en el Plan de Movilidad Urbana Sostenible de Figueras.

Fuente: Ayuntamiento de Figueras (Gerona).

► 2.2.2. OCUPACIÓN NO MOTORIZADA DEL VIARIO

La justificación de incorporar la ocupación del viario tiene su origen en la idea de poder estimar el espacio destinado a modos no motorizados y así medir de alguna manera la contribución del corredor que se está proyectando como espacio de encuentro, ocio y de relación social (Soria-Lara, 2011). Además, jerarquizar el viario es insuficiente para realizar una evaluación basada en el rendimiento ambiental, precisándose de otras variables que puedan ser mesurables.

Considerar la ocupación no motorizada del espacio viario obliga a tener en cuenta cuáles son las funciones más importantes de este, que de acuerdo con varios autores (Manchón y Santamera, 1995; Jacobs et al., 1997; Pozueta et al., 2000, 2009; Herce et al., 2007, 2009) podrían resumirse en:

- Promover este espacio como un lugar no sólo de tránsito y circulación, sino como un lugar multifuncional para el peatón (zonas de reposo, ocio, circulación, etc.).
- Soporte de relación social y de transmisión cultural.
- Fomentar la circulación no peatonal a través de modos no motorizados como la bicicleta.
- Albergar actividades de tipo comercial.
- Elemento de soporte del sistema de espacios libres de la ciudad.
- Facilitar el acceso de peatones a los distintos modos de transporte y la penetración entre lo público y lo privado.

Para poder contabilizar esta ocupación del viario, por modos no motorizados, se propone el **Coefficiente Viario de Reparto (CVR)**, de manera que se establezca qué superficie de viario total hay con respecto a la destinada a movilidad no motorizada (bicicleta y peatón).

Los resultados de este coeficiente se expresan en m² totales de sección viaria entre m² de espacio peatonal y de bicicleta, es decir (Soria-Lara, 2011 p. 75):

$$CRV_s = (C_s / P_s)$$

Donde C_s es la superficie total del viario y P_s la superficie destinada a movilidad no motorizada.

Pero extraer los valores del coeficiente viario de reparto, usando la expresión anterior, no es suficiente para determinar cuál es el rendimiento ambiental de este nuevo ordenamiento, ya que es necesario establecer:

- **Superficie viaria no motorizada mínima:** el espacio viario mínimo necesario por trayecto de calle para poder desarrollar con normalidad las funciones del viario y además cumplir con los objetivos desde el punto de vista de una movilidad sostenible.
- **Superficie viaria no motorizada óptima:** el espacio viario idóneo por trayecto de calle para poder desarrollar con normalidad las funciones del viario y, además, cumplir con los objetivos de la movilidad sostenible.



Figura 2. Tramos de metro ligeros con diferentes grados de ocupación no motorizada (Sheffield).
Fuente: street view, Google maps.



Figura 2. Tramos de metro ligeros con diferentes grados de ocupación no motorizada (Turín).
Fuente: street view, Google maps.



Figura 2. Tramos de metro ligeros con diferentes grados de ocupación no motorizada (Dublín).
Fuente: street view, Google maps.

La estimación de las superficies anteriores debe ajustarse a las distintas zonas funcionales existentes en los espacios para el peatón o bien para la movilidad no motorizada. Atendiendo al trabajo de Machón y Santamera (1995) se diferencian las siguientes bandas comunes relacionadas con la movilidad no motorizada –Figura 3–:

- **A:** Banda de circulación, donde pueden identificarse el espacio de circulación peatonal y el espacio para la bicicleta.

- **B:** Banda estacional, espacio destinado y utilizado fundamentalmente para la realización de actividades como las esperas, las estancias, compras, siendo su consideración como lugar y no como canal de transporte.
- **C:** Banda de servidumbre, donde hay que distinguir entre
 - **C1:** Servidumbre de la edificación, es el espacio vinculado al uso de las edificaciones que habitualmente se califica de "muerto" a efectos de la circulación peatonal.
 - **C2:** Servidumbre de la calzada, es el espacio de acera entre los vehículos y la calzada que sirve de pantalla entre el tráfico motorizado y el no motorizado. Al igual que el anterior no computa a efectos de la circulación.

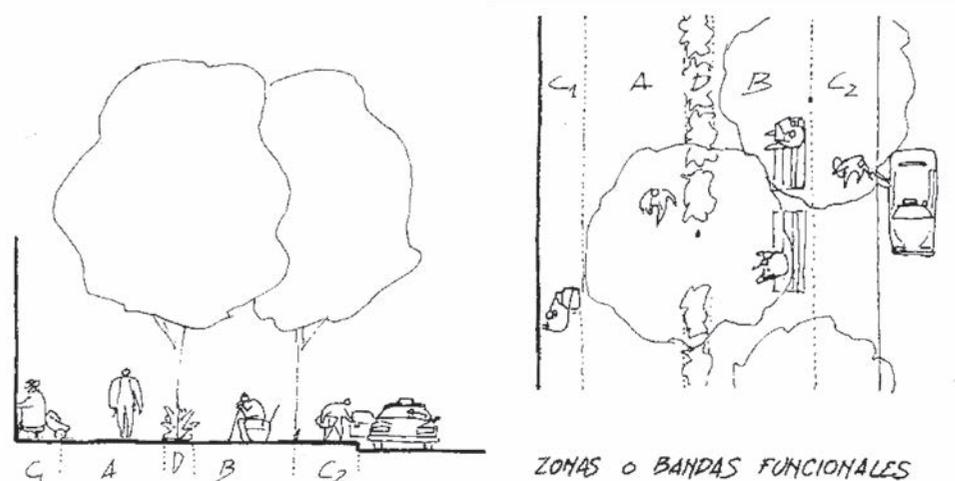


Figura 3. Zonas funcionales en los espacios del peatón.

Fuente: Machón y Santamera (1995).

Una vez conocidas las zonas o bandas funcionales de los espacios peatonales se pueden plantear qué dimensiones mínimas y óptimas deberían tener estos espacios. Centrando la atención, en primer lugar, en la anchura mínima de estas bandas se ha recurrido al trabajo de Soria-Lara (2011), en el cual se recogen los siguientes valores:

ANCHURA MÍNIMA DEL ESPACIO VIARIO NO MOTORIZADO	MANCHÓN Y SANTAMERA (1995)	PORTLAND GOVERMENT (1998)	POZUETA (2001)	SANZ (2008)
C ₁ . Servidumbre edificación (m)	0,5-1	0,75	0,6-0,9	0,5-1
C ₂ . Servidumbre calzada (m)	0,5-1	1,2	0,6-0,9	0,5-1
B. Estacionamiento (m)	0,75-3	-	-	0,75-3
A. Circulación bicicleta (m)	0,6-3	1,2	1	1-3,05
A. Circulación peatonal (m)	0,6-2,4	2,5	Mín. 1,5	0,65-3,5

Tabla 9. Anchuras mínimas de cada área funcional para la superficie viaria no motorizada.

Fuente: Soria-Lara (2011, p. 128).

Y del mismo modo, varias superficies viarias de referencia con reparto modal óptimo:

SEC ^a .	VÍA (M ²)	PEATÓN-BICI (M ²)	CALZADA			APARC ^c . (M ²)
			CARRIL BUS (M ²)	COCHES (M ²)	ML ^b (M ²)	
1	20007,90	6063	3637,8	10307,1	0	0
2	18189,00	6063	3637,8	8488,2	0	0
3	25464,60	16370,1	0	9094,5	0	0
4	26677,20	8488,2	0	16673,25	0	1515,75
5	27101,61	8488,2	0	8609,46	7275,6	2728,35
6	26980,35	8488,2	3637,8	14854,35	0	0
7	34043,75	18189	3637,8	10701,195	0	1515,75
8	37590,60	18189	1818,9	17582,7	0	0
9	40925,25	16370,1	0	14551,2	6063	3940,95
10	17582,70	13338,6	0	4244,1	0	0
11	23948,85	14854,35	0	4244,1	0	4850,4
12	15400,02	9094,5	0	3637,8	0	2667,72
13	17218,92	6063	0	8488,2	0	2667,72

SEC^a: Sección; ML^b: Metro Ligero; Aparc^c: Aparcamiento

Tabla 10. Secciones viarias de referencia (con una longitud de 606,3 m) con reparto modal óptimo.

Fuente: Soria-Lara (2011, p. 129).

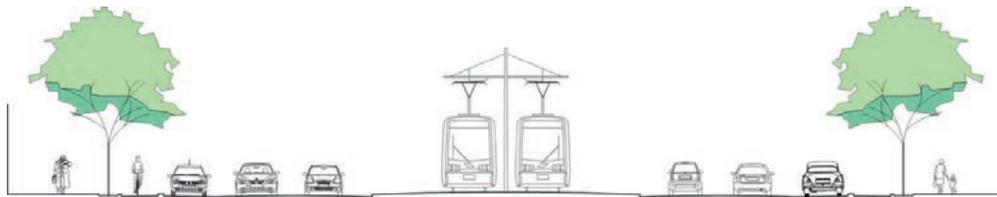


Figura 4. Sección 5 de la Tabla 12.

Fuente: Elaboración propia.

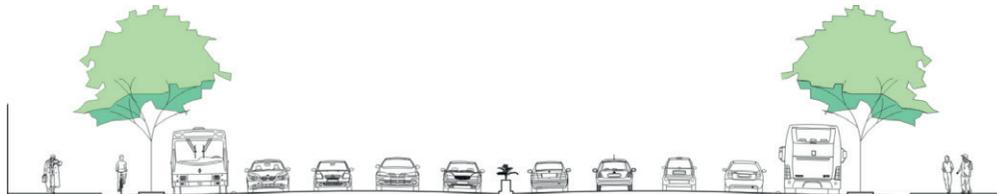


Figura 5. Sección 6 de la Tabla 12.

Fuente: Elaboración propia.

Acorde con los resultados anteriores es posible establecer una comparativa entre las distintas alternativas contempladas durante la fase de planificación de un sistema de metro ligero o de cualquier otro sistema de transporte público. La clave será establecer el umbral óptimo y mínimo para cada situación, de manera que pueda estimarse el rendimiento ambiental en términos de ocupación para cada alternativa.

A continuación se ilustran con un ejemplo las etapas metodológicas que deben seguirse para llevar a cabo los cálculos del CVR, para lo cual se ha tomado un tramo de una calle de Granada por donde discurrirá el metro ligero. En este caso concreto, se va a realizar una comparativa de la ocupación del espacio viario contemplándose sólo dos alternativas:

- Situación previa al metro ligero
- Situación con el sistema de metro ligero.

Antes de continuar hay que comentar que los umbrales utilizados en la evaluación son los utilizados por Soria-Lara (2011 p. 154) para el caso particular del metro ligero de Granada:

CVR de Superficie viaria no motorizada óptima	1,92 m ² secc/m ² peat.
CVR de Superficie viaria no motorizada mínima	3,04 m ² secc/m ² peat.

Las dos situaciones analizadas –Figuras 6 y 7– arrojan los siguientes valores:

	Spf. Movilidad No Motorizada (m ²)	CVR
Sin Metro Ligero	3801,44	1,79
Con Metro Ligero	3251,58	2,09

Superficie de viario tomada para el cálculo de CVR: 6810,63 m²

Los resultados muestran que la incorporación del sistema de metro ligero en el tramo de viario elegido implica una pérdida de espacio para la movilidad no motorizada, aunque de acuerdo con los umbrales establecidos entraría dentro del rango de superficie mínima. Sin embargo, quedaría por evaluar si los espacios motorizados cumplen con las secciones mínimas para cada uno de los usos requeridos –Tabla 10–.

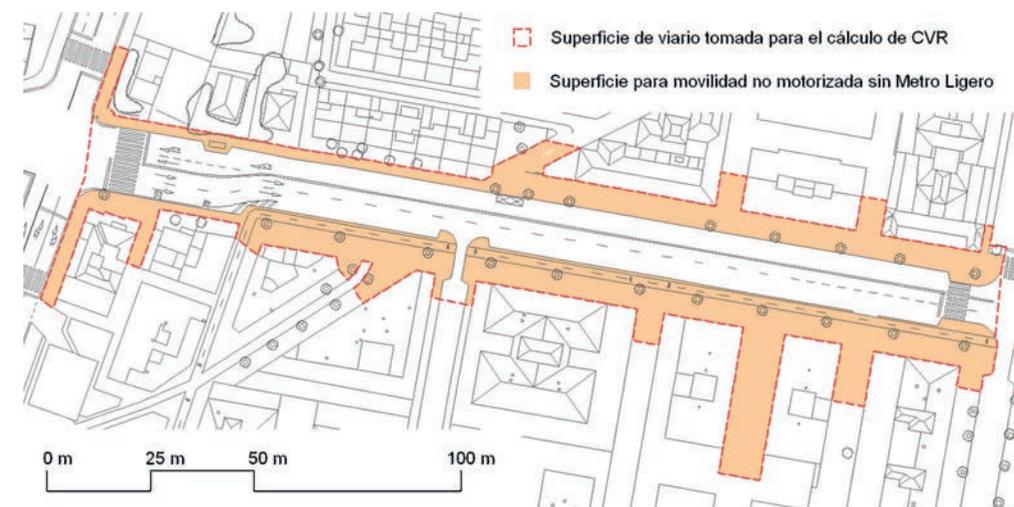


Figura 6. Superficie para movilidad no motorizada en la Avenida América sin Metro Ligero.

Fuente: Elaboración propia.

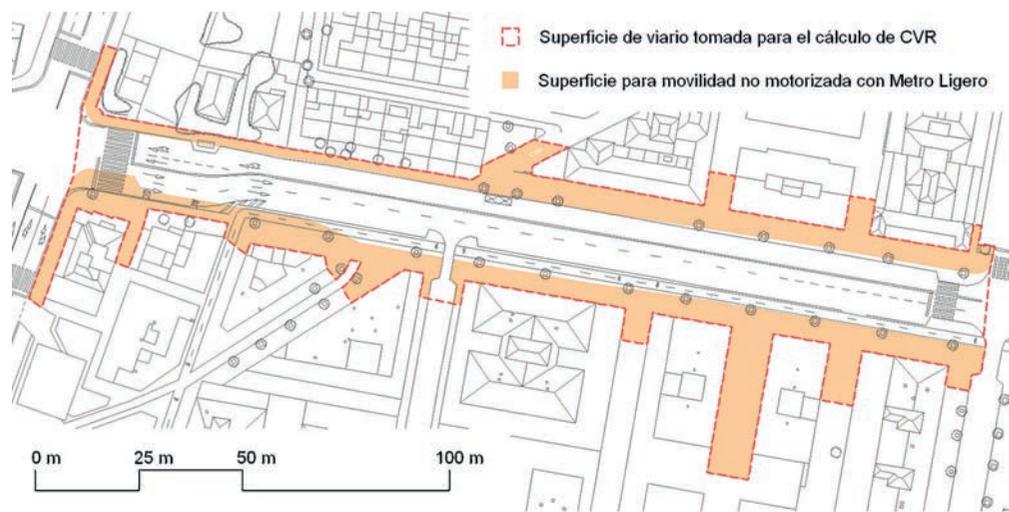


Figura 7. Superficie para movilidad no motorizada en la Avenida América con Metro Ligero.

Fuente: Elaboración propia.

▶ 2.2.3. EFECTO BARRERA

Para el efecto barrera, la propuesta pretende contabilizar el grado de impedancia viaria existente para el peatón. El objetivo es extraer conclusiones en relación con el espacio destinado a un tránsito más agradable y flexible en la vía (modos de movilidad no motorizados) y el destinado al encuentro, estacionamiento y ocio. Es decir, medir, estimar y comparar alternativas con respecto a la posibilidad que se ofrece a los ciudadanos para usar libremente la sección viaria.

Tomando como referencia el trabajo de Soria-Lara (2011 p.76), cuya fundamentación tiene su origen en el efecto ecológico que ocasiona una nueva infraestructura sobre un espacio natural (INFRAS, 2000; Maibach et al., 2008), se propone medir la impedancia utilizando la misma expresión:

$$EB_s = \frac{[\sum_j c_j f_j] W_s}{100}$$

Donde c_j hace referencia al número de carriles destinados a un determinado modo de transporte j en cada alternativa S , f_j expresa el flujo de vehículos de cada modo de transporte j en cada alternativa, S expresada en veh/min y W_s hace referencia a la anchura de la calzada para cada alternativa S expresada en metros. Los resultados del indicador se expresarán como efecto barrera por metro de calzada (EB/m).

Cómo caso hipotético para ilustrar cuáles son los pasos a seguir para realizar este análisis, cuyo objetivo no es otro que mejorar la integración del sistema de transporte público que se está planificado desde el análisis ambiental de la sección viaria, se tomaron dos situaciones hipotéticas:

- Espacio viario sin metro ligero –Figura 8–
- Espacio viario con metro ligero –Figura 9–

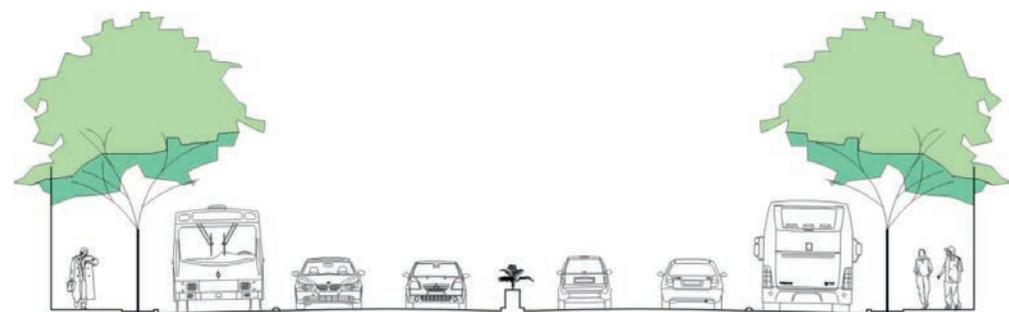


Figura 8. Configuración de la sección viaria sin metro ligero.

Fuente: Elaboración propia.

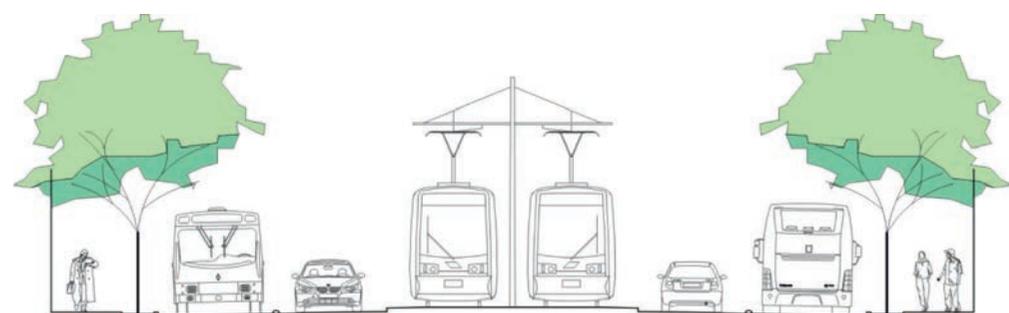


Figura 9. Configuración de la sección viaria con metro ligero.

Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se deduce la expresión que va a utilizarse para el cálculo, son muchas las variables que se necesitan, habiendo sido tomados para este caso los siguientes valores hipotéticos:

Metro Ligerero	C_j			f_j			W_s
	Carriles coche	Carriles Bus	Carriles metro	Coches (veh/min)	Bus (veh/min)	ML (veh/min)	
No	4	2	0	0,55	0,10	0,00	21,00
Sí	2	2	2	0,40	0,10	0,25	22,00

Tabla 11. Valores hipotéticos para el cálculo del efecto barrera.

Fuente: elaboración propia.

La utilización de los datos anteriores arrojó los siguientes resultados de impedancia del viario:

$$EB_{\text{sin metro ligero}}: 0,504 \text{ EB/m}$$

$$EB_{\text{con metro ligero}}: 0,330 \text{ EB/m}$$

En este caso, podría afirmarse que el efecto barrera disminuye tras la implantación del sistema de metro ligero, dando lugar a una mayor calidad ambiental y, por tanto, a un mayor grado de integración ambiental. Sin embargo, si se quiere evaluar este parámetro desde el rendimiento ambiental, se deberán establecer los umbrales **Efecto Barrera Óptimo** ($EB_{\text{óptimo}}$) y **Efecto Barrera Mínimo** ($EB_{\text{mínimo}}$). Recurriendo de nuevo al trabajo de Soria-Lara (2011) se toman como valores de referencia:

- $EB_{\text{óptimo}}: 0,31 \text{ EB/m}$
- $EB_{\text{mínimo}}: 1,31 \text{ EB/m}$

Aceptando los umbrales anteriores, ambas alternativas se englobarían dentro del umbral $EB_{\text{mínimo}}$, demostrando cumplir con los valores

mínimos, en la situación sin metro ligero, y con los valores óptimos en la situación con metro ligero.

Finalmente, hay que tener en cuenta que la ausencia de regulación normativa hace muy complejo determinar los umbrales óptimo y mínimo, con lo cual habrá que estudiar minuciosamente cada situación antes de establecerlos. En otros casos medir este factor podría ser bastante obvio como muestran las Figuras 10 y 11.



Figura 10. Tramo del metro ligero de Burdeos con bajo efecto barrera.

Fuente: street view, Google maps.



Figura 11. Tramo del metro ligero de Burdeos con alto efecto barrera.

Fuente: street view, Google maps.

2.3. EFICIENCIA SUPERFICIAL DE LA MOVILIDAD MOTORIZADA

De acuerdo con los principios de evaluación del rendimiento ambiental, tener en cuenta únicamente la jerarquización del viario, la ocupación del espacio no motorizado y el efecto barrera, se entendía que no eran suficientes. Por ello, se incorporó un nuevo elemento de evaluación con el que analizare la eficiencia espacial. Es decir, la ocupación del espacio, ya que al igual que el consumo energético –3. *Calidad del aire y eficiencia energética*– se trata de un factor limitante.

Para llevar a cabo esta evaluación es necesario considerar dos aspectos. El primero es entender la ocupación del espacio público urbano como un recurso cuya ocupación puede generar importantes impactos en la integración del trazado. Y la segunda, es que esta ocupación debe valorarse desde el uso más o menos eficiente que se haga del espacio por parte del sistema de transporte, es decir, el flujo de pasajeros que se transportan por unidad de superficie. Por tanto, en la estimación de la eficiencia superficial de la movilidad computará el número teórico de viajeros que son transportados al día por cada metro cuadrado de sistema según los diferentes modos (públicos o privados) existentes por cada tramo analizado. Dicho cálculo responde a la siguiente expresión Ruiz, Valenzuela y Navarro, (2010; p.17):

$$ESM = \frac{\sum_{modo} viajeros_{modo}}{\sum_{modo} superficie_{modo}}$$

Los resultados se expresan en viajeros diarios por m2 de superficie ocupada y por modo de transporte.

Para ilustrar la utilidad de este análisis, a continuación se muestran los resultados obtenidos en el estudio realizado para el metro ligero de Granada por Ruiz, Valenzuela y Navarro, (2010):

La Figura 12 muestra una comparativa entre los resultados obtenidos para la eficiencia superficial según las dos alternativas barajadas (sin metro ligero y con metro ligero). Se puede apreciar como varían los valores de eficiencia tras la implantación del sistema de metro ligero, los cuales permitirían adoptar las medidas oportunas para mejorar este factor en aquellos tramos deficientes y así aumentar su grado de integración.

A partir de los resultados anteriores –Figura 12– es posible determinar porcentualmente la variación de la eficiencia superficial, con respecto a la solución adoptada, para cada tramo del trazado –Figura 13–.

Por último, la variación porcentual puede ser representada gráficamente, de manera que se muestre espacialmente y de forma directa y clara los tramos que presentan las variaciones más acentuadas con respecto al valor de eficiencia superficial de la solución que finalmente sea adoptada –Figura 14–.

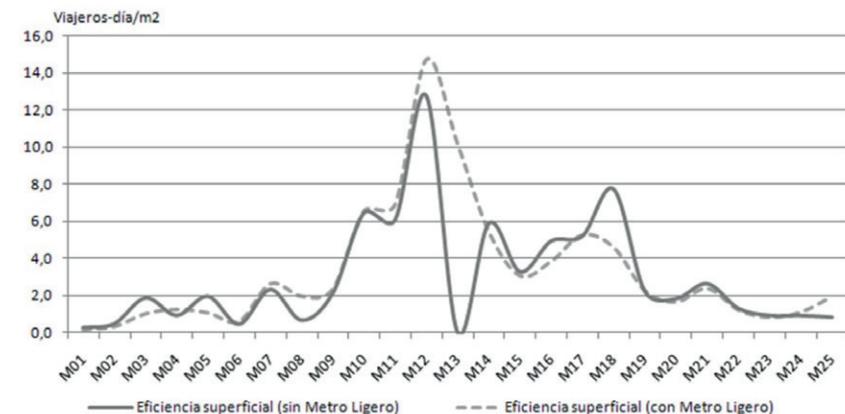


Figura 12. Eficiencia superficial de la movilidad (en viajeros-día/m2) por tramo del trazado de la línea 1 del Metro Ligero de Granada, comparando los escenarios actual (sin metro) y metropolitano (con metro).

Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.65).

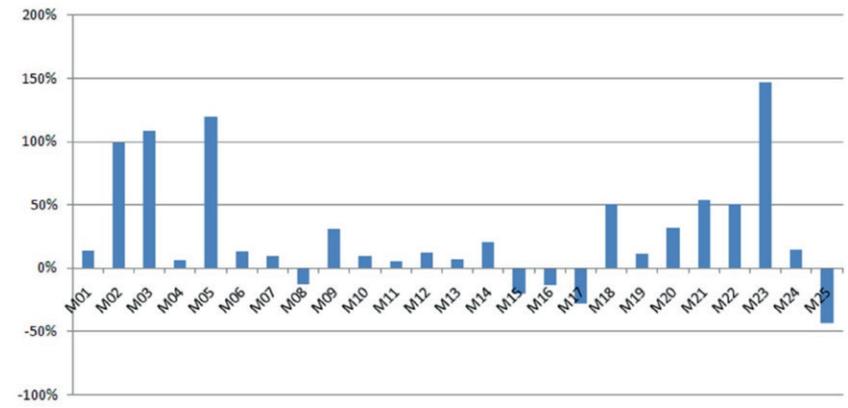


Figura 13. Variación porcentual por tramo de la superficie viaria ocupada por modos de transporte públicos y privados, tras la implantación de la línea 1 de Metro Ligerio de Granada.
Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.65).

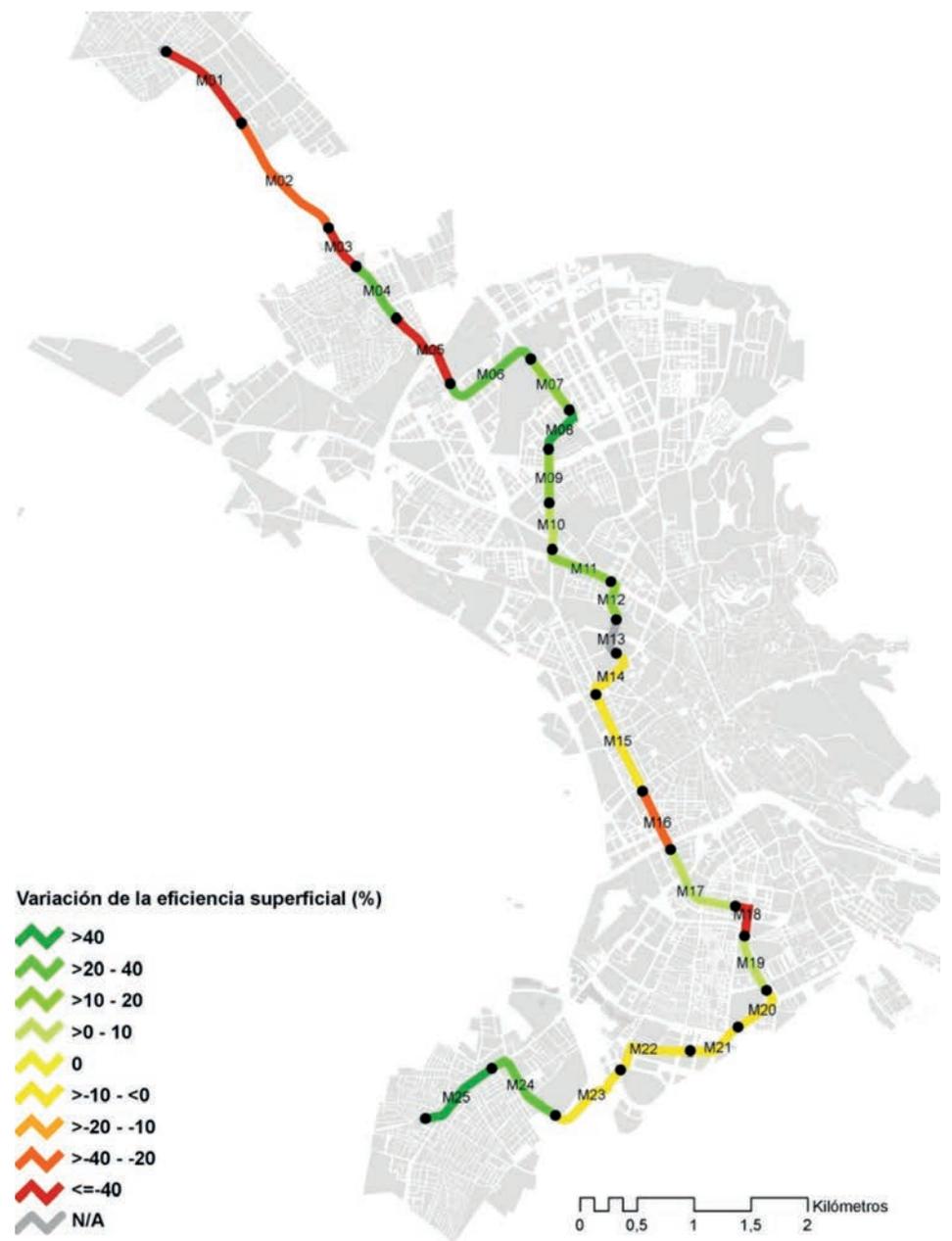


Figura 14. Variación porcentual de la eficiencia superficial por tramo, tras la implantación de la línea 1 de Metro Ligerio de Granada.
Fuente. Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.65).



La implantación de un sistema de metro ligero puede dar lugar a diferentes situaciones en relación con la intensidad de vehículos diarios y, consecuentemente, afectar a la calidad del aire y la eficiencia energética. Por tanto, parece oportuno conocer y poner en juego los actuales modelos de emisiones existentes, de manera que sea posible computar las tasas de emisión de gases contaminantes, en el caso de la calidad del aire, y de gasto energético, en el de la eficiencia energética.

El objetivo de utilizar estos modelos es comparar escenarios y valorar en qué medida la implantación del sistema de metro ligero, o cualquier otro sistema de transporte público, está ayudando a mejorar (siendo más eficientes) su integración ambiental.

MODELOS PARA EL CÁLCULO DE ÍNDICES DE CALIDAD DEL AIRE Y DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Modelo de emisiones y consumo energético:

- Tasa de emisión local o directa por tramo:

$$Q_{\text{directa}} = \sum_i F_i m_i^d$$

- Tasa de emisión indirecta por tramo:

$$Q_{\text{indirecta}} = (\sum_i F_i e_i^d m_i^{in} e_i^{in} + \sum_e F_e e_e^d) r m^e$$

- El consumo energético directo o local:

$$E_{\text{directo}} = \sum_i F_i e_i^d + \sum_e F_e e_e^d$$

- Consumo energético indirecto global:

$$E_{\text{indirecto}} = \sum_i F_i e_i^d e_i^{in}$$

Modelo de vulnerabilidad frente a emisiones locales:

$$dC = Q \cdot D \cdot E(x)$$

3.1. MODELO DE EMISIONES Y CONSUMO ENERGÉTICO

Tal y como se planteó en el proyecto “El metropolitano de Granada como instrumento de innovación, calidad y sostenibilidad urbana” (Ruiz, Valenzuela y Navarro, 2010), el objetivo de proponer un modelo es simplemente computar tasas de emisiones y energía. Es decir, determinar la masa de contaminante por unidad de tiempo (MT-1) o, tratándose de un emisor lineal como es el metro ligero, por unidad de longitud de la vía (MT-1L-1). Del mismo modo, la tasa de consumo energético puede obtenerse como unidad de potencia por longitud de vía (ET-1L-1). Las variables de entrada para este modelo son:

- Flujo de tráfico para cada modo de transporte no eléctrico i y eléctrico e (vehículos/T), para cada tramo: F_i y F_e .
- Factor de emisión directa (local) en forma de masa por kilómetro recorrido y por vehículo ($M \cdot km^{-1} \cdot veh^{-1}$) en escenario urbano, desagregados por modo no eléctrico i (m_i^{in}) y por cada modo eléctrico e (m_e).
- Consumo energético de cada modo, en unidad de energía por kilómetro y por vehículo ($E \cdot km^{-1} \cdot veh^{-1}$): e_i^d (modo no eléctrico) y e_e^d (modo eléctrico).
- Consumo energético en la producción y distribución de combustible o fuente de energía para cada modo, en forma de coeficiente de retorno para la red eléctrica (r), y de consumo energético indirecto por unidad energética producida para el combustible (E/E): e_i^{in} .

La tasa de emisión local o directa por tramo corresponde a (Ruiz, Valenzuela y Navarro, 2010, p. 13):

$$Q_{\text{directa}} = \sum_i F_i m_i^d$$

Y la tasa de emisión indirecta:

$$Q_{\text{indirecta}} = (\sum_i F_i e_i^d m_i^{in} e_i^{in} + \sum_e F_e e_e^d) r m^e$$

El consumo energético directo, o local, por tramo se calculará:

$$E_{\text{directo}} = \sum_i F_i e_i^d + \sum_e F_e e_e^d$$

Y por último, el consumo energético indirecto global será:

$$E_{\text{indirecto}} = \sum_i F_i e_i^d e_i^{in}$$

La tasa de emisión local (Q_{directa}) se limita al cómputo de aquellos contaminantes con incidencia ambiental a escala viaria y urbana.

En este caso se opta por analizar solamente los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), los compuestos orgánicos volátiles (VOC), el dióxido de azufre (SO_2) y la materia particulada con un radio aerodinámico menor a 10 micrómetros (PM_{10}).

► 3.1.1. DATOS DE PARTIDA PARA EL MODELO DE EMISIONES Y CONSUMO ENERGÉTICO

La utilización de los modelos de emisión anteriores requiere de una gran cantidad de datos cuya obtención, en algunos casos, puede ser complicada. Con la intención de facilitar los cálculos, se ofrece a continuación una pequeña recopilación de valores que podrían ser empleados:

	EMISIONES DIRECTAS (g/km)					
	CO_2	NO_x	CO	VOC	SO_2	PM_{10}
VEHÍCULO PRIVADO						
Turismo gasolina	235*	0,15*	4,19**	0,93**	0,0015*	0,011*
Turismo diesel	214*	0,84*	0,33**	0,12**	0,0014*	0,052*
Ciclomotor gasolina	59*	0,18*	3,78**	4,2**	0,0004*	0,06*
Media por vehículo	178,79	0,399	2,681	1,499	0,001	0,038
Media por pasajero	126,41	0,282	1,896	1,060	0,001	0,027
BUS						
Diesel	1045**	5,21**	1,77**	0,9**	0,03**	0,24**
Media por vehículo	14045	5,21	1,77	0,9	0,03	0,24
Media por pasajero	80,385	0,401	0,136	0,069	0,002	0,018
METRO LIGERO						
Media por vehículo	0	0	0	0	0	0
Media por pasajero	0	0	0	0	0	0

Tabla 12. Factores de emisiones directas: datos de base y medias ponderadas por los coeficientes de distribución.

Fuente: Elaboración propia a partir de Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010,p. 69). *Van Essen et al. (2003) y **Van Essen et al. (2008).

	EMISIONES INDIRECTAS POR REFINADO (g/MJ)					
	CO_2	NO_x	CO	VOC	SO_2	PM_{10}
GASOLINA	9,2	0,042	0,005	0,21	0,072	0,002
DIESEL	6,8	0,036	0,005	0,088	0,052	0,001

Tabla 13. Factores de emisiones indirectas: datos de base y medias ponderadas por los coeficientes de distribución.

Fuente: Elaboración propia a partir de Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010,p. 69).

	EMISIONES INDIRECTAS POR PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (g/MJ)					
	CO_2	NO_x	CO	VOC	SO_2	PM_{10}
UNIÓN EUROPEA						
Media	170**	0,173**	0,02*	0,02*	0,083**	0,006**
ESPAÑA						
Carbón	214 [#]	0,105 [#]	0,039 [#]	0,004 [#]	0,08 [#]	0,004 [#]
Petróleo	191 [#]	0,315 [#]	0,084 [#]	0,008 [#]	2,4 [#]	0,105 [#]
Gas/Ciclo combinado	97 [#]	0,11 [#]	0,074 [#]	0,007 [#]	0,001 [#]	0,001 [#]
Nuclear	0 [#]	0 [#]	0 [#]	0 [#]	0 [#]	0 [#]
Residuos (Incineración)	242 [#]	0,242 [#]	0,242 [#]	0,055 [#]	0,048 [#]	0,039 [#]
Biomasa	2 [#]	0,022 [#]	0,022 [#]	0,006 [#]	0,098 [#]	0,005 [#]
Eólica	0 [#]	0 [#]	0 [#]	0 [#]	0 [#]	0 [#]
Hidroeléctrica	0 [#]	0 [#]	0 [#]	0 [#]	0 [#]	0 [#]
Media	83,778	0,130	0,046	0,006	0,144	0,009

Tabla 14. Factores de emisiones indirectas por producción de energía: datos de base y medias ponderadas por los coeficientes de distribución.

Fuente: Elaboración propia a partir de Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010,p. 69). *Van Essen et al. (2003), **Van Essen et al. (2008) y [#]Base de datos GEMIS: Estimación de la producción.

	ENERGÍA PRIMARIA (MJ/km) (e_i^d)	DISTRIBUCIÓN	OCUPACIÓN MEDIA
VEHÍCULO PRIVADO			
Turismo gasolina	3,26	0,374	1,53
Turismo diesel	2,87	0,352	1,53
Ciclomotor gasolina	0,824	0,264	1,15
Media por vehículo	2,447	-	1,414
Media por pasajero	1,730	-	-
BUS			
Diesel	14,3	1	13
Media por vehículo	14,3	-	-
Media por pasajero	1,100	-	-
METRO LIGERO			
Metro	33,2	1	200
Media por vehículo	33,2	-	-
Media por pasajero	0,166	-	-
	ENERGÍA SECUNDARIA (MJ/MJ) (e_i^n)	DISTRIBUCIÓN	OCUPACIÓN MEDIA
REFINADO DE COMBUSTIBLE			
Gasolina	5	-	-
Diesel	2,85	-	-
	RETORNO DE ENERGÍA (%) (r)	DISTRIBUCIÓN	OCUPACIÓN MEDIA
PRODUCCIÓN ELÉCTRICA (UE)			
Media Europa	38	-	-
PRODUCCIÓN ELÉCTRICA (España)			
Carbón	45	0,145	-

Petróleo	41	0,054	-
Gas/Ciclo combinado	57	0,311	-
Nuclear	33	0,204	-
Residuos (incineración)	13	0,051	-
Biomasa	35	0,016	-
Eólica	40	0,07	-
Hidroeléctrica	100	0,15	-
Media España	46,975	-	-

Tabla 15. Factores de energía primaria y secundaria, retorno de energía, distribución y ocupación media: datos de base y medias ponderadas por los coeficientes de distribución.

Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.69).

Finalmente, para completar todos los datos es necesario tener información sobre los flujos de tráfico para cada uno de los tramos que están siendo analizados (F_i y F_e). La particularidad de esta información es que son específicos para cada ámbito de estudio, por lo que se deberán realizar las mediciones oportunas o recurrir a los Planes de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS) o a las oficinas municipales de tráfico.

► 3.1.2. MODELO DE VULNERABILIDAD FRENTE A LAS EMISIONES LOCALES

Los resultados arrojados por los modelos de emisiones –3.1. Modelo de emisiones y consumo energético–, son insuficientes si el planteamiento no está orientado a evaluar la variación relativa de su nivel de inmisión con respecto a unos márgenes de tolerancia o umbrales de calidad –3.2.-Valores límite de emisión según Real Decreto 102/2011 relativo a la mejora de la calidad del aire–. En este sentido, es necesario cuantificar el grado de atenuación de dicho impacto o el grado de vulnerabilidad del medio, siendo considerada la absorción como la capacidad de dispersión de la atmósfera.

La finalidad de los modelos de dispersión es obtener un valor de inmisión para un contaminante determinado por medio de un valor de emisión (Q), la velocidad del viento (u), la estructura de la atmósfera (grado de estabilidad), la altura relativa (z) y la distancia al foco emisor en el eje de propagación (x). De esta manera se podría decir que el modelo de vulnerabilidad deberá buscar la estructura de un modelo de dispersión, el cual, tal y como describen Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p. 72-73), tenga las siguientes características:

- **Operatividad:** se busca la resolución del problema en múltiples localizaciones geográficas, lo cual requiere un modelo que opere con pocas variables y no exija cálculos complicados.
- **Representatividad sobre exactitud:** no se pretende calcular un valor exacto para unas circunstancias específicas en el tiempo y en el espacio, sino un valor promedio o de referencia con baja resolución temporal, aunque representativo de unas condiciones propias del medio.
- **Valor indicador:** el resultado carece de significación en términos absolutos, tratándose de un valor de contribución individual de la fuente y no de emisión general.
- **Tratamiento independiente del foco emisor:** sólo mide la contribución individual de una fuente (dC), sin incluir valores de fondo hallados a partir de datos experimentales u otros modelos; no obstante, sí pueden superponerse los resultados de distintas fuentes en un mismo entorno o añadirse a dichos valores de fondo.
- **Dependiente de la morfología del medio urbano a distintas escalas (urbana y viaria):** una de las características fundamentales del presente modelo es su dependencia de parámetros que describen la estructura de la capa superficial de la atmósfera sobre una superficie rugosa y que se calculan a partir de métodos morfométricos.

- **Independiente de la tasa de emisión y de la distancia al foco:** otro aspecto importante, pues la dota de valor prospectivo, es la capacidad del modelo para aportar un dato de dispersión que se pueda interpretar sin la existencia de un foco emisor previamente localizado y que, posteriormente, pueda tratarse como un factor de dispersión (D). El principio de operación del modelo, en su conjunto, es la factorización. El valor del indicador de impacto sobre la inmisión (dC) se descompone en dos factores:

$$dC = Q \cdot D_{(x)}$$

Para independizar la distancia x del factor de dispersión D es necesario crear un factor de exposición E, tal que:

$$dC = Q \cdot D \cdot E_{(x)}$$

De esta manera, el factor D puede calcularse como un parámetro constante característico de un área, un transecto o un punto geográfico.

3.2. VALORES LÍMITE DE EMISIÓN SEGÚN REAL DECRETO 102/2011 RELATIVO A LA MEJORA DE LA CALIDAD DEL AIRE.

A nivel estatal es en el Real Decreto 102/2011 relativo a la mejora de la calidad del aire, donde se definen y establecen los objetivos de calidad del aire con respecto al dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), partículas y otros (plomo, benceno, ozono, etc.). Incluso, desarrolla en

sus Anexos II y III los requisitos necesarios para la evaluación de las concentraciones de estas sustancias.

En esta normativa, además, se recogen valores límite para la protección de la salud (objetivos de calidad) a partir de los cuáles se pueden determinar los niveles máximo y óptimo, al igual que se proponía en el caso de la ocupación espacial del viario no motorizado, para cada una de las alternativas del caso de estudio. De esta manera, será posible compararlas y determinar la alternativa más beneficiosa en términos de rendimiento ambiental. Estos límites de emisión por contaminante son:

DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂): VALORES LÍMITE(1) PARA LA PROTECCIÓN DE LA SALUD Y EL NIVEL CRÍTICO PARA LA PROTECCIÓN DE LA VEGETACIÓN DEL DIÓXIDO DE AZUFRE.

	PERÍODO DE PROMEDIO	VALOR	FECHA DE CUMPLIMIENTO DEL VALOR LÍMITE
Valor límite horario	1 hora	350 µg/m ³ , valor que no podrá superarse en más de 24 ocasiones por año civil.	En vigor desde el 1 de enero de 2005.
Valor límite diario	24 horas	125 µg/m ³ , valor que no podrá superarse en más de 3 ocasiones por año civil.	En vigor desde el 1 de enero de 2005.
Nivel crítico ⁽²⁾	Año civil e invierno (del 1 de octubre al 31 de marzo)	20 µg/m ³ .	En vigor desde el 11 de junio de 2008.

⁽¹⁾El volumen debe ser referido a una temperatura de 293K y a una presión de 101,3 kPa

⁽²⁾Para la aplicación de este valor sólo se tomarán en consideración los datos obtenidos en las estaciones de medición en el apartado II.b del anexo III del Real Decreto 102/2011

El valor correspondiente al umbral de alerta de SO₂ se sitúa en 500 µg/m³. Se considerará superado cuando durante tres horas consecuti-

vas se exceda dicho valor cada hora, en lugares representativos de la calidad del aire en un área de, como mínimo, 100 km² o en una zona o aglomeración entera, tomando la superficie que sea menor.

Es importante tener en cuenta que cada comunidad autónoma o municipio, es competente para establecer unos valores de emisión más restrictivos que los recogidos en esta guía. Por tanto, habrá que tener precaución y revisar la normativa existente en esta materia, ajustando dichos parámetros.

DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO₂): VALORES LÍMITE PARA LA PROTECCIÓN DE LA SALUD Y NIVEL CRÍTICO DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO PARA LA PROTECCIÓN DE LA VEGETACIÓN.

	PERÍODO DE PROMEDIO	VALOR	FECHA DE CUMPLIMIENTO DEL VALOR LÍMITE
Valor límite horario	1 hora	200 µg/m ³ de NO ₂ , valor que no podrá superarse en más de 18 ocasiones por año civil.	En vigor desde el 1 de enero de 2010.
Valor límite anual	1 año civil	40 µg/m ³ de NO ₂ .	En vigor desde el 1 de enero de 2010.
Nivel crítico(1)	1 año civil	30 µg/m ³ .	En vigor desde el 11 de junio de 2008.

⁽¹⁾Para la aplicación de este valor sólo se tomarán en consideración los datos obtenidos en las estaciones de medición en el apartado II.b del anexo III del Real Decreto 102/2011

El valor umbral de alerta del NO₂ es 400 µg/m³. Se considerará superado cuando durante tres horas consecutivas se exceda dicho valor cada hora en lugares representativos de la calidad del aire en un área de, como mínimo, 100 km² o en una zona de aglomeración entera, tomando la superficie que sea menor.

PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN (PM₁₀): VALORES LÍMITE DE LAS PARTÍCULAS PM10 EN CONDICIONES AMBIENTALES PARA LA PROTECCIÓN DE LA SALUD.

	PERÍODO DE PROMEDIO	VALOR	FECHA DE CUMPLIMIENTO DEL VALOR LÍMITE
Valor límite diario	24 horas	50 µg/m ³ , que no podrán superarse en más de 35 ocasiones por año.	En vigor desde el 1 de enero de 2005.
Valor límite diario	24 horas	40 µg/m ³ .	En vigor desde el 1 de enero de 2005.

MONÓXIDO DE CARBONO (CO): VALOR LÍMITE PARA LA PROTECCIÓN DE LA SALUD.

	PERÍODO DE PROMEDIO	VALOR	FECHA DE CUMPLIMIENTO DEL VALOR LÍMITE
Valor límite	Máxima diaria de las medias móviles octohorarias	10 µg/m ³	En vigor desde el 1 de enero de 2005.

3.3. CALIDAD DEL AIRE, CONSUMO ENERGÉTICO Y EFICIENCIA: EL METRO LIGERO DE GRANADA COMO EJEMPLO DE ESTUDIO.

La aplicación de los modelos de emisiones, consumo energético y vulnerabilidad descritos anteriormente, se debe apoyar en un conjunto

de indicadores e índices capaces de explorar los factores más representativos en la valoración de la calidad del aire, el consumo las emisiones y la eficiencia energética de la movilidad.

De nuevo, un buen ejemplo de pautas para desarrollar estos indicadores e índices es el trabajo de investigación realizado para el metro ligero de Granada (Ruiz, Valenzuela y Navarro, 2010), cuya evaluación del sistema se desarrolló atendiendo a tres grupos:

PARA AMPLIAR INFORMACIÓN SOBRE OTROS POSIBLES INDICADORES VÉASE 1.3.1. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD Y SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN.

ÍNDICES CALIDAD DEL AIRE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA:**Indicadores de calidad del aire**

- Índice Agregado de la Calidad del Aire (IACA):

$$IACA = \frac{\sum \log_2 \frac{I_i}{C_i}}{n}$$

- Índice de Precusores del Ozono Troposférico (IPOT):

$$IPOT = \sqrt{[NO_x] \cdot [VOC]}$$

Indicadores de consumo y emisiones:

- Consumo energético local y global:

$$CEL = E_{dir} \cdot L_{tramo}$$

$$EG = (E_{dir} + E_{ind}) \cdot L_{tramo}$$

- Emisiones de dióxido de carbono:

$$CO_{2,eq} = (Q_{globalCO_2} + 1,9Q_{globalCO}) \cdot L_{trazado}$$

Indicadores de eficiencia de la movilidad:

- Eficiencia energética:

$$EE = \frac{\sum_{modo} \text{viajeros}_{modo}}{E_{global}}$$

A continuación se describe cada uno de ellos y se muestran los resultados obtenidos de su aplicación en el metro ligero de Granada, a la vez que se justifica su adecuación para garantizar una mejor integración ambiental desde el punto de vista de la calidad del aire, el consumo y la eficiencia energética. Hay que señalar que en este análisis sólo se contemplaron dos escenarios: actual (sin metro ligero) y metropolitano (con metro ligero).

► 3.3.1. INDICADORES DEL NIVEL DE CALIDAD

Para contabilizar la contribución del tráfico a los niveles de inmisión viaria se tomaron los modelos de emisiones y de vulnerabilidad del medio atmosférico para varios contaminantes de naturaleza gaseosa (NO_x, CO, SO₂) y materia particulada (PM₁₀). Para ello, se emplearon los siguientes indicadores agregados:

ÍNDICE AGREGADO DE LA CALIDAD DEL AIRE (IACA)

Se trata de un indicador adimensional que muestra niveles de inmisión general de contaminantes en el aire en relación con unos valores de referencia, generalmente referidos como niveles de tolerancia o protección.

Su cálculo se lleva a cabo mediante la siguiente expresión (Ruiz, Valenzuela y Navarro, 2010, p. 15):

$$IACA = \sum_i \log_2 \frac{L_i}{C_i}$$

Donde L_i corresponde al límite de tolerancia –3.2. Valores límite de emisión según Real Decreto 102/2011 relativo a la mejora de la calidad del aire– para el contaminante i , y C_i , al nivel de inmisión estimado para el contaminante i .

El valor de este indicador (IACA) se relaciona de forma potencial con la razón entre el valor de referencia y el nivel de concentración, siendo negativo cuando el nivel de inmisión supera el límite considerado. Su expresión logarítmica se justifica por querer dar automáticamente un alto peso a los valores que se encuentran cerca del límite de tolerancia, reduciendo drásticamente el valor índice cuando cualquiera de los contaminantes considerados se aleja de dicho nivel.

En el estudio del metro de Granada se consideraron aquellos contaminantes para los que la legislación vigente de entonces (RD 1073/2002) recogía valores límite para la protección humana:

CONTAMINANTE	L_i , BASADO EN RD 1073/2002
Óxidos de nitrógeno NO _x	40 µg/m ³
Monóxidos de carbono CO	1000 µg/m ³ (corregido)
Dióxido de Azufre SO ₂	20 µg/m ³
Partículas PM ₁₀	20 µg/m ³

Tabla 16. Valores límite empleados en el cálculo IACA.

Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, 15).

Debido a que los valores aportados –*Tablas 12, 13, 14 y 15*– para el modelo de emisiones-vulnerabilidad y los utilizados en el estudio del metro ligero de Granada –*Tabla 16*–, sólo se refieren o referían a la contribución del tráfico y a un nivel de fondo urbano de referencia, se necesitan registros promedio. En el análisis del metro ligero de Granada se recurrió a los datos de la estación de medida de los Paseos Universitarios para los años 2005 y 2006, obtenidos en la base de datos AIRBASE de la Agencia Europea de Medio Ambiente –*Tabla 17*–. Pese a que existían registros actualizados, no se hallaron tratamientos estadísticos de dichos datos para fechas posteriores a las referidas.

DESDE 2011
ESTÁ EN VIGOR
REAL DECRETO
102/2011
CON NUEVOS
VALORES LÍMITE
DE EMISIÓN.

CONTAMINANTE	L _r BASADO EN RD 1073/2002
Óxidos de nitrógeno NO _x	44,37 µg/m ³
Monóxidos de carbono CO	600 µg/m ³ (sólo 2006)
Dióxido de Azufre SO ₂	9,52 µg/m ³
Partículas PM ₁₀	35,1 µg/m ³

Tabla 17. Valores medios de fondo urbano empleados en el cálculo del IACA, estimados a partir de la estación de medida de los Paseos Universitarios.

Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, 16).

Los resultados tras la aplicación del IACA, para cada uno de los tramos que conforman el trazado de la línea de metro ligero, fueron:

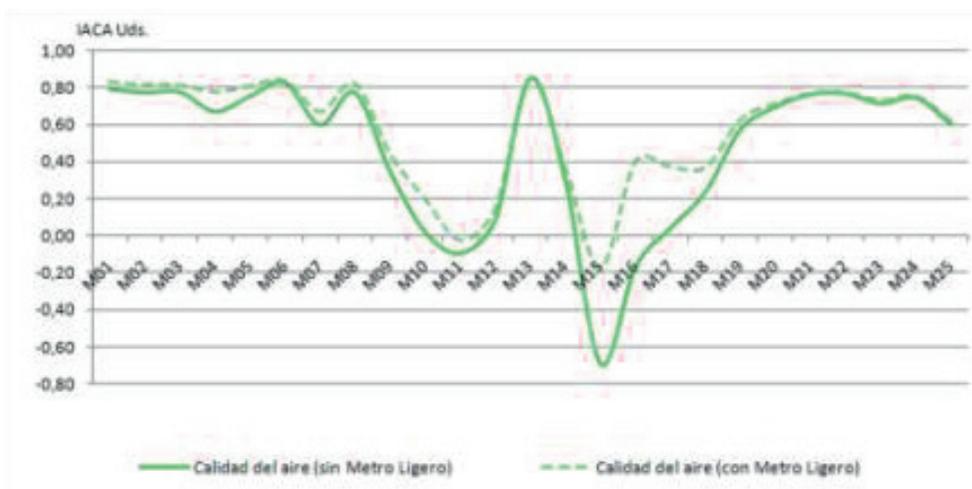


Figura 15. Índice Agregado de Calidad del Aire por tramo del trazado de la línea 1 del Metro Ligero de Granada, comparando los escenarios actual (sin metro) y metropolitano (con metro).

Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.55).

Este índice mostró, en términos generales, un descenso de los niveles de inmisión para todo el trazado –Figuras 15 y 16– para la situación metropolitana (con metro ligero), siendo más acentuado en aquellos tramos más vulnerables a la contaminación y con altos flujos de tráfico (tramos 15, 16 y 17).



Figura 16. Variación del Índice Agregado de Calidad del Aire por tramo, tras la implantación de la línea 1 de Metro Ligero de Granada.

Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.56).

ÍNDICE DE PRECURSORES DEL OZONO TROPOSFÉRICO (IPOT)

Otro de los índices utilizados estimó el nivel de ozono troposférico (O_3), ya que es uno de los indicadores para la calidad del aire más usados. Sin embargo, su valor no se puede predecir por un simple modelo de emisión-dispersión debido a que su formación está condicionada a factores ambientales como la luz, la presión atmosférica, la temperatura y la existencia de otros gases que intervienen en la compleja cadena de reacciones radicalarias¹ involucradas. Como solución se optó por valorar la posibilidad potencial de formación de ozono en el ámbito del viario del trazado del metro ligero.

Este indicador se realizó aplicando una expresión sencilla basada en las concentraciones de los dos principales precursores del ozono: los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (VOC_s : Volatile Organic Compounds) (Ruiz, Valenzuela y Navarro, 2010, p. 16):

$$IPOT = \sqrt{[NO_x] \cdot [VOC]}$$

Este indicador (IPOT) no expresa la concentración de ozono, aunque teóricamente se representa en masa por unidad de volumen (esta es la razón por la cual se obvian las dimensiones en la presentación de resultados).

Por otro lado, a diferencia del IACA, estos resultados se refieren exclusivamente a la contribución del tráfico, de manera que no se añaden valores de fondo urbano.

Al igual que en el caso del IACA los resultados obtenidos mostraron un descenso generalizado en los niveles de inmisión estimados –Figura

17 y 18–. Finalmente, el incremento de la calidad del aire, según los resultados obtenidos, es a consecuencia de una menor tasa de emisiones –Figura 19–.

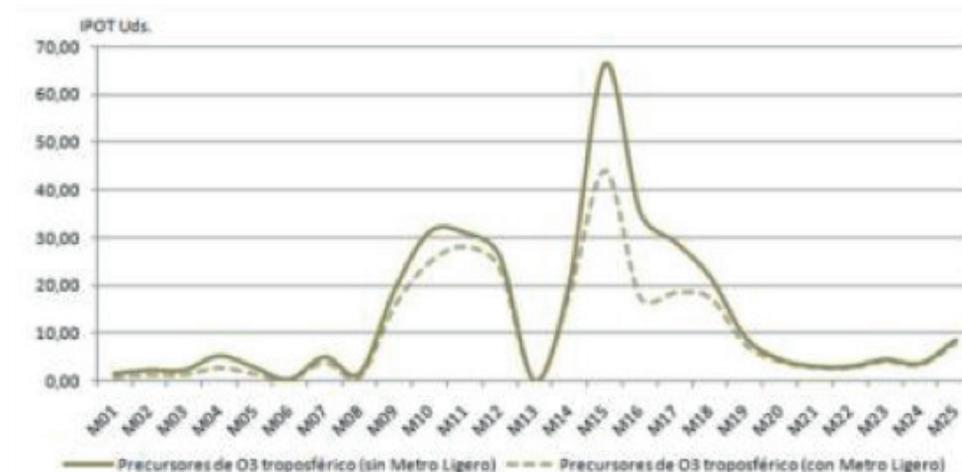


Figura 17. Índice de Precursores de Ozono Troposférico por tramo del trazado de la línea 1 del Metro Ligero de Granada, comparando los escenarios actual (sin metro) y metropolitano (con metro).

Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.55).

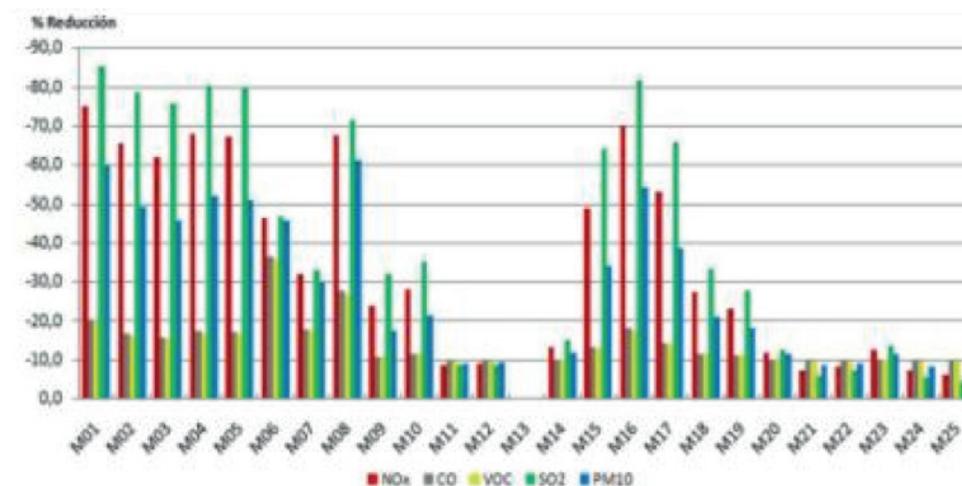


Figura 18. Nivel de reducción en los niveles de inmisión viarios inmediatos para los distintos contaminantes contemplados en la evaluación.

Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.57)

¹ Se trata de reacciones químicas donde se ven involucrados radicales libres.



Figura 19. Variación del Índice de Precursores de Ozono Troposférico por tramo, tras la implantación de la línea 1 de Metro Liger de Granada. Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.56)..

► 3.3.2. INDICADORES DE CONSUMO Y EMISIONES

El propósito de los dos indicadores de consumo y emisiones fue aportar información sobre el gasto energético a escala local y global, así como sobre las emisiones anuales de dióxido de carbono equivalente.

CONSUMO ENERGÉTICO LOCAL Y GLOBAL

La valoración de este parámetro se realizó teniendo en cuenta dos puntos de vista: el consumo energético directo, a escala local, proveniente del uso de la fuente energética de la que se obtiene directamente trabajo, y el consumo energético global, como la energía total incorporada en todo el proceso de generación y uso de la fuente energética.

La tasa de consumo energético por tramo es el resultado de multiplicar la tasa de consumo energético adecuada por kilómetro de vía (E) por longitud de tramo viario (L), y sus resultados se expresan en megavatios (MW). Utilizándose para el consumo local la expresión (Ruiz, Valenzuela y Navarro, 2010, p. 16):

$$CEL = E_{dir} \cdot L_{tramo}$$

Y para el consumo global:

$$CEG = (E_{dir} + E_{ind}) L_{tramo}$$

De la aplicación de estos indicadores se obtuvo, para el consumo local, un aumento total de la demanda energética –Figura 20 y 22–. Esta situación es consecuencia de la demanda extra de energía con respecto al escenario inicial, la cual sólo puede ser compensada mediante la reducción de otros modos de transporte –Figura 21 y 23–.

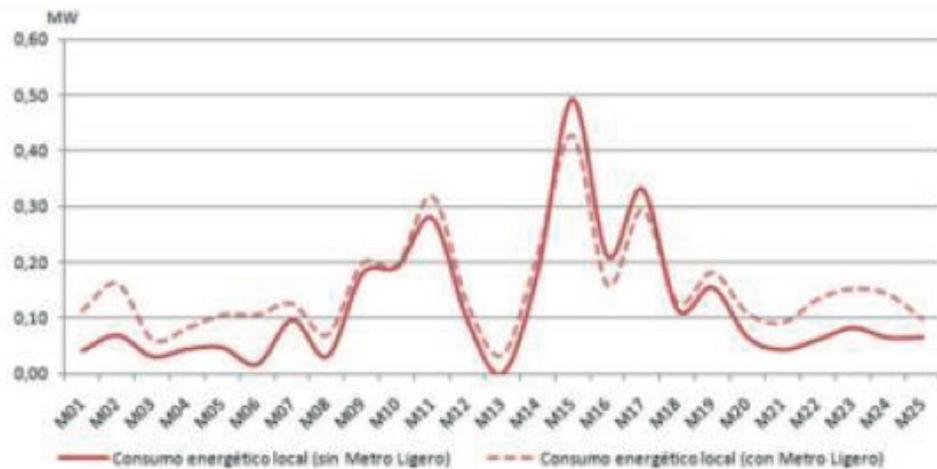


Figura 20. Consumo energético local (en MW) por tramo del trazado de la línea 1 del Metro Ligero de Granada, comparando los escenarios actual (sin metro) y metropolitano (con metro). Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.60).

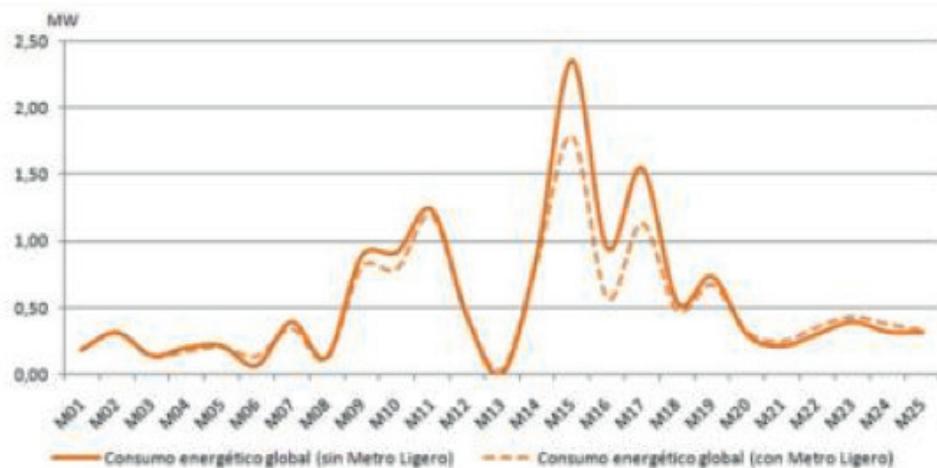


Figura 21. Consumo energético global (en MW) por tramo del trazado de la línea 1 del Metro Ligero de Granada, comparando los escenarios actual (sin metro) y metropolitano (con metro). Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.60).

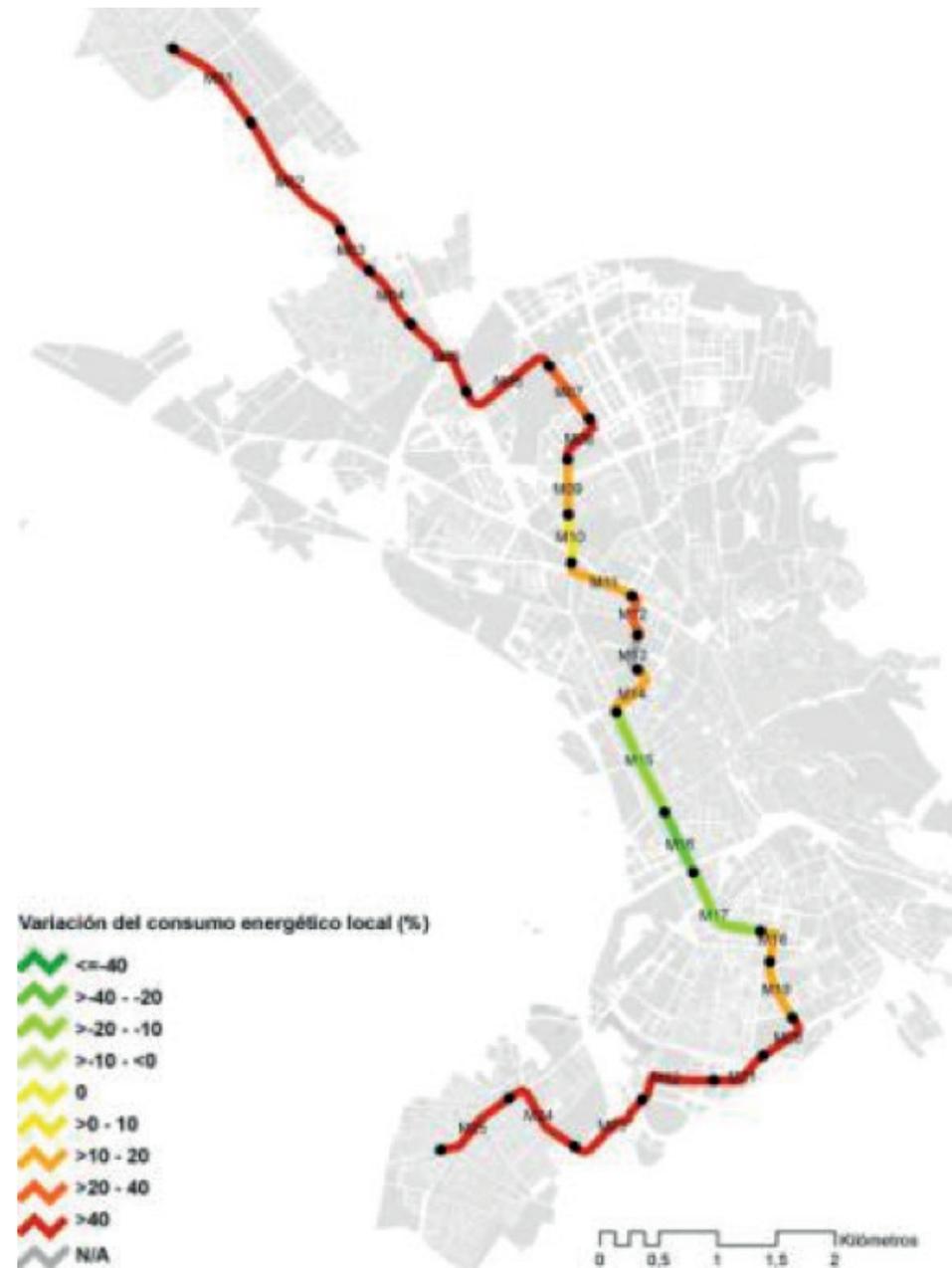


Figura 22. Variación porcentual del consumo energético local por tramo, tras la implantación de la línea 1 de Metro Ligero de Granada. Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.61).



Figura 23. Variación porcentual del consumo energético global por tramo, tras la implantación de la línea 1 de Metro Ligerero de Granada.

Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.61).

EMISIONES ANUALES DE DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE

El indicador empleado para las emisiones anuales de dióxido de carbono equivalente es una medida del calentamiento global potencial producido por las emisiones del sistema de transporte, basado en las emisiones globales de CO_2 y CO. Al ser el CO_2 un gas con incidencia a gran escala, se valoraron, además de las emisiones producidas directamente en el ámbito viario, las producidas indirectamente fuera del mismo (producción energética).

El valor de CO_2 equivalente expresa la cantidad de dióxido de carbono necesaria para igualar el forzamiento radiactivo provocado tanto directa como indirectamente por una mezcla de gases. Al pretender medir el calentamiento global potencial inducido por una fuente de emisiones, se recurrió al índice GWP_{100} (*Global Warming Potential*), que expresa el ratio entre el forzamiento radiactivo total por unidad de masa de un gas en un periodo de 100 años con respecto al que produciría la misma masa de CO_2 .

En el estudio del metro ligero de Granada se consideraron las emisiones de monóxido de carbono (CO) y las del propio dióxido de carbono. De esta manera, las emisiones anuales por tramo viario se calcularon de la siguiente manera (IPPC (2007), Fourth Assessment Report: Climate Change 2007) (Ruiz, Valenzuela y Navarro, 2010, p. 16):

$$\text{CO}_2\text{eq} = (\text{Q}_{\text{globalCO}_2} + 1,9\text{Q}_{\text{globalCO}}) \text{L}_{\text{trazado}}$$

El resultado final de este indicador se expresa en kilotoneladas por año (kt/año).

La aplicación de los indicadores, en relación con las emisiones anuales de dióxido de carbono equivalente, arrojó para el escenario con metro ligero una reducción global de 5 kilotoneladas, lo que supone casi el 17% con respecto a la tasa de emisiones inicial –Figura 24 y 25–. Esta disminución está fuertemente relacionada con el consumo energético global.

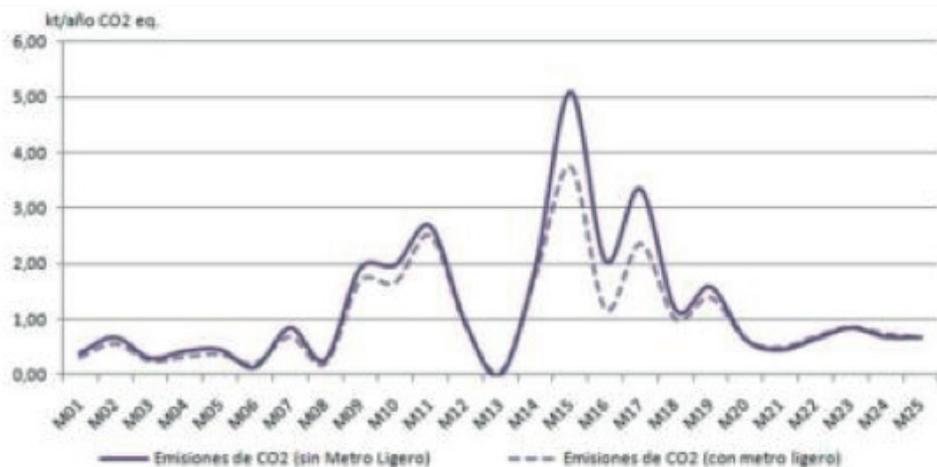


Figura 24. Tasa global de emisiones de CO2 (en kt/año) por tramo de trazado de la línea 1 del Metro Ligero de Granada, comparando los escenarios actual (sin metro) y metropolitano (con metro). Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.57).



Figura 25. Variación porcentual de la tasa global de emisiones de CO2 por tramo, tras la implantación de la línea 1 de Metro Ligero de Granada. Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.58).

► 3.3.3. INDICADORES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA MOVILIDAD

La eficiencia en la movilidad, según Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010), puede definirse como “la consecución del mayor flujo de viajeros por recursos consumidos”. Por tanto, el funcionamiento de un sistema de metro ligero o de cualquier sistema de transporte público debería analizarse y evaluarse desde el punto de vista de la energía consumida, tanto para modos públicos como privados. En “El Metropolitano de Granada como instrumento de innovación, calidad y sostenibilidad urbana” se realizó dicho análisis tomando el siguiente indicador:

EFICIENCIA ENERGÉTICA

Con este indicador se valoró la eficiencia energética computando “el número teórico de viajeros transportados por el sistema viario a lo largo de una distancia determinada por unidad de energía global consumida, esto es, incorporando el gasto energético incorporado”. Para tal fin se recurrió a la siguiente expresión (Ruiz, Valenzuela y Navarro, 2010, p. 17):

$$EE = \frac{\sum_{\text{modo}} \text{viajeros}_{\text{modo}}}{E_{\text{global}}}$$

Los resultados que se desprendieron de este indicador mostraron un aumento de la eficiencia energética del 31% –Figura 26 y 27– para el escenario metropolitano, lo que se traduce en una capacidad para transportar un 31% más de pasajeros con el mismo gasto energético.

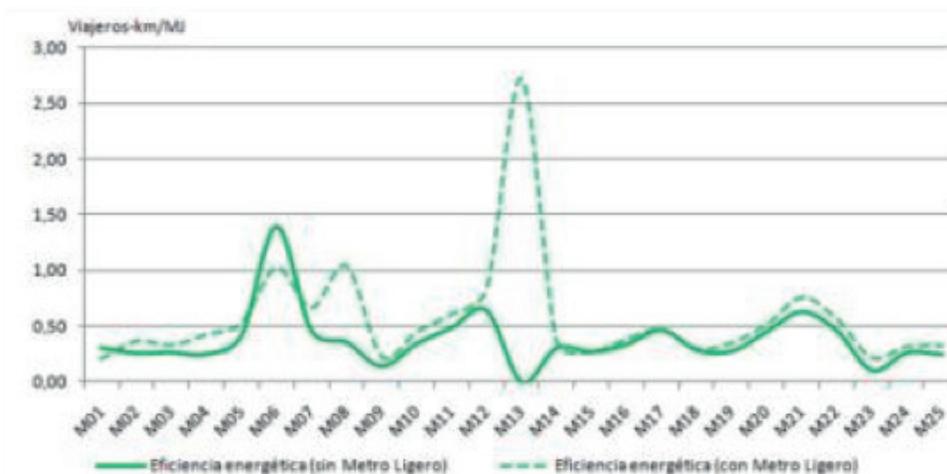


Figura 26. Eficiencia energética (en viajeros-km/MJ) por tramo del trazado de la línea 1 del Metro Ligero de Granada, comparando los escenarios actual (sin metro) y metropolitano (con metro).

Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.62).



Finalmente, en base a los resultados obtenidos será posible generar un gráfico donde se muestren el tipo de impacto y su magnitud para cada una de las unidades en las que se decida dividir el sistema de transporte que se está evaluando. Tal y como se muestra a continuación:

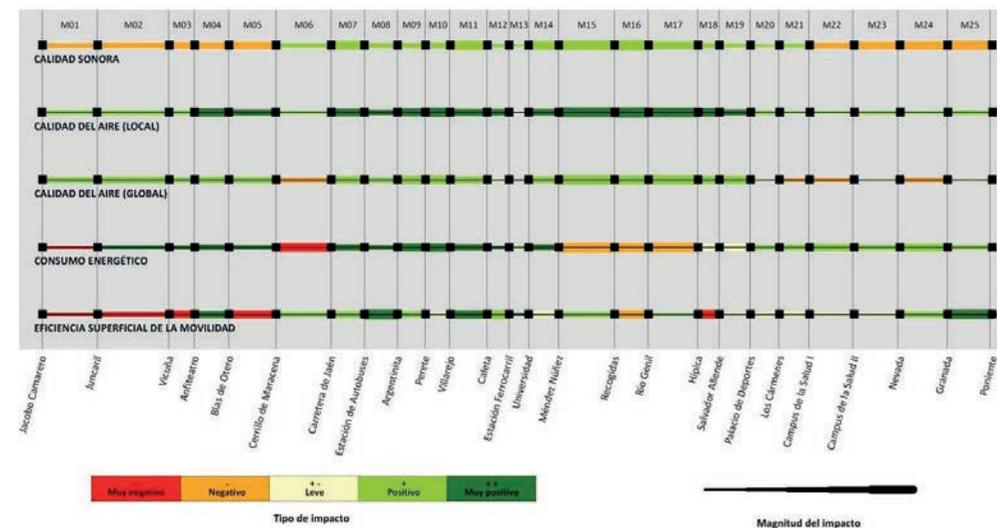


Figura 27. Variación porcentual de la eficiencia energética por tramo, tras la implantación de la línea 1 de Metro Ligerio de Granada. Fuente: Ruiz, Valenzuela y Navarro (2010, p.62).

4 RUIDO AMBIENTAL



El contenido de este apartado se centra en el ruido generado por el tráfico rodado –4.1. *Ruido de Tráfico*– y el proveniente de los sistemas de metro ligero –4.2. *Ruido de Trenes*–, describiendo cuáles son sus principales fuentes, los factores que intervienen en su generación y los principales modelos predictivos que recoge la normativa. En una segunda parte se describe el concepto de Paisaje Sonoro –4.3. *Paisaje sonoro como innovación metodológica para integración ambiental de los sistemas de transporte público*– y se justificará su idoneidad para mejorar la integración acústica de los sistemas de transporte público. Un tercer bloque, lo compone todo el desarrollo metodológico que se propone para la integración acústica de los sistemas de metro ligero –4.4. *Pautas para la integración acústica*–, tomando como contexto el caso del metro ligero de Granada. Finalmente, se muestran una serie de indicadores para la monitorización y el control del ruido ambiental –4.5. *Indicadores Acústicos*–.

El desarrollo teórico del ruido ambiental es más complejo (por la normativa que regula este fenómeno en las ciudades) requiriendo una explicación más minuciosa. Por tanto, su extensión no se debe a la pretensión dar mayor importancia a este factor que a los ya abordados.

4.1. RUIDO DE TRÁFICO

Son muchas las fuentes y los factores que intervienen en la generación de ruido de tráfico –Figura 28–, por lo que elaborar una buena predicción precisa conocer y entender muy bien el origen y la naturaleza del ruido generado. Además, el manejo de estos parámetros permitirá optimizar las propuestas de intervención sobre el ruido, cuyas medidas y acciones planteadas deberán quedar recogidas en un Plan de Acción.

EL PLAN DE ACCIÓN CONSTITUYE EL DOCUMENTO FINAL DONDE QUEDARÁN RECOGIDAS LAS CONCLUSIONES Y DECISIONES ADOPTADAS PARA UNA ÓPTIMA INTEGRACIÓN ACÚSTICA. PARA AMPLIAR INFORMACIÓN VER 4.4.4.-FASE III: REDACCIÓN DEL PLAN DE ACCIÓN.

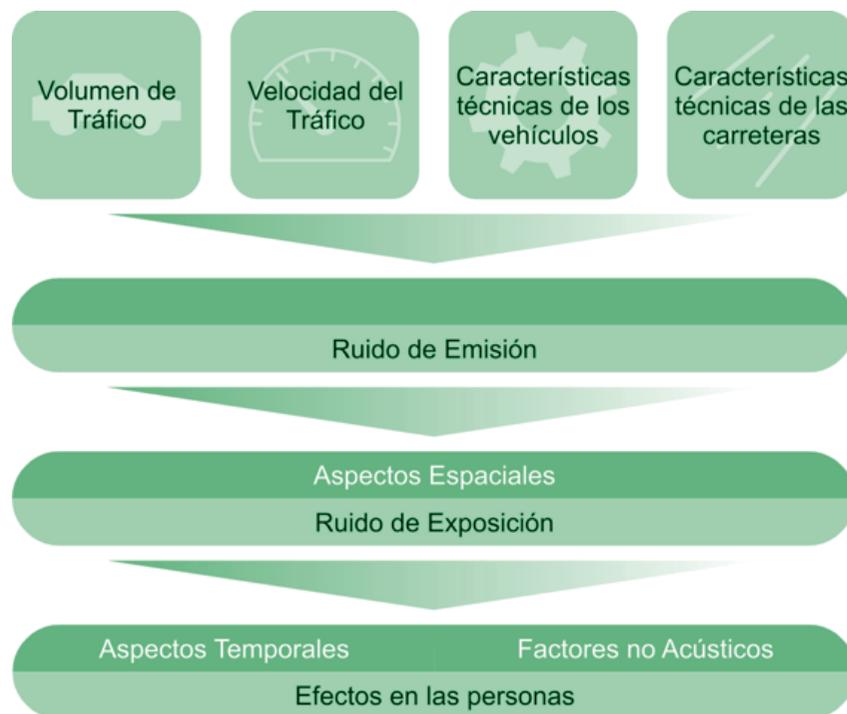


Figura 28. Factores de la generación del ruido de tráfico.
Fuente: Adaptado de Nijland & Van Wee (2005)

Aunque son numerosas las clasificaciones de las fuentes de ruido en el tráfico rodado, se ha optado por clasificarlas en: Fuentes de ruido dependientes de las características técnicas de los vehículos y Factores de la generación del ruido de tráfico.

FUENTES DE RUIDO DEPENDIENTES DE LAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS VEHÍCULOS

Las fuentes de ruido en vehículos aislados son muy diversas y están condicionadas por el tipo de vehículo en cuestión (automóvil, camión, motocicleta, etc.). De acuerdo con la bibliografía consultada (Bartí, 2010 y García, 2009), se pueden identificar las siguientes:

- Motor
- Ventilador
- Transmisión
- Rodadura
- Frenos
- Vibraciones de la carrocería y de la carga

FACTORES DE LA GENERACIÓN DEL RUIDO DE TRÁFICO

El ruido proveniente del tráfico tiene un conjunto de factores externos de generación que no dependen del vehículo (excepto la distinción que puede hacerse entre vehículos ligeros y pesados) sino de aspectos como la planificación, la climatología y el tipo de circulación, factores sobre los cuales es posible actuar para ayudar a reducir los impactos acústicos que provocan.

De acuerdo con García (2009) pueden identificarse 8 factores: el volumen de tráfico, el tipo de vehículo, las condiciones climáticas, la presencia de superficies reflectantes, la velocidad de los vehículos, el tipo de circulación, la composición del tráfico y las características de la vía.

VOLUMEN DE TRÁFICO

Para determinar los volúmenes de tráfico existen dos posibilidades: 1) consultar las bases de datos existentes en los centros de tráfico –Figura 29– o 2) recurrir a las herramientas de conteo.

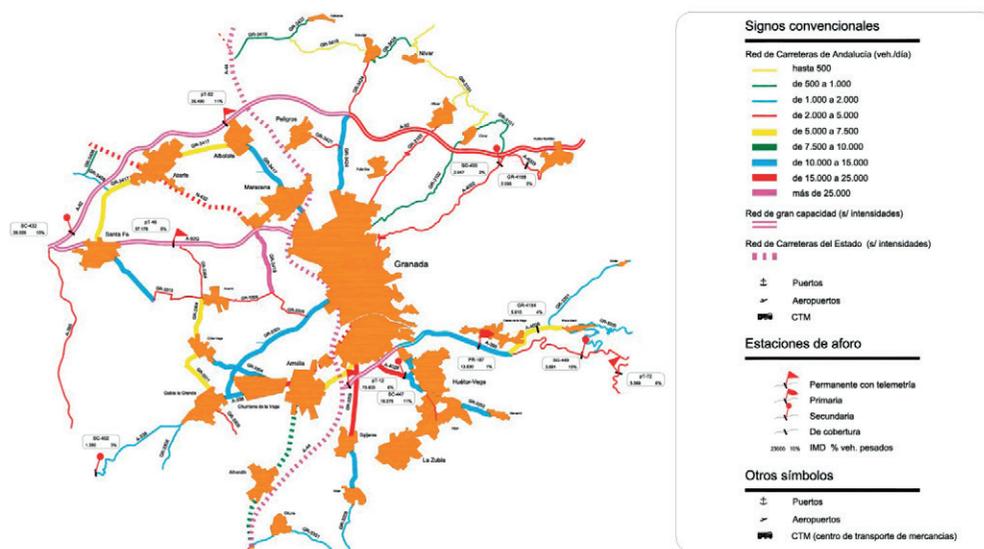


Figura 29. Plan de aforos de la red principal de carreteras de Andalucía.

Fuente: Consejería de Obras Públicas y Vivienda. Dirección General de Carreteras. Junta de Andalucía.

TIPO DE VEHÍCULO

La clasificación de los vehículos se establece en función del peso. La más estandarizada es aquella que distingue entre vehículos ligeros (turismos) y pesados (autobuses, camiones, etc.), tal y como se recogen en la mayoría de los modelos predictivos –4.1.1.-Modelo de predicción de ruido de tráfico–, aunque los valores de referencia varían en función de la clasificación o modelo. Tomando como referencia el

modelo de predicción más extendido (NMPB Routes 96), se catalogarían de acuerdo a:

- Vehículos Ligeros (< 3.500 kg de carga útil).
- Vehículos Pesados (> 3.500 kg de carga útil).

MODO DE CONDUCCIÓN

La forma de conducción, especialmente en los vehículos de gasolina, de forma “agresiva” o “deportiva” hace aumentar los niveles entre 2 a 4 dBA frente a una conducción normal, y del orden de 5 a 7 dBA frente a una conducción suave.

CLIMATOLOGÍA

La dispersión del ruido se produce principalmente por la atmósfera, en forma de ondas que se diseminan en el aire igual que cualquier gas contaminante, por lo que su comportamiento va a depender en buena medida de las condiciones climatológicas de la zona. Especialmente de la velocidad del viento y la temperatura.

Las condiciones meteorológicas medias se suelen inferir a partir de análisis estadísticos de 10 años de los datos meteorológicos de ese lugar o sus cercanías. Esto supone, en algunos casos, dificultades para la obtención de suficientes datos para la elaboración de predicciones del ruido. En estos casos, se recomienda el uso de forma simplificada de datos meteorológicos proporcional a la ocurrencia de variaciones en las condiciones de propagación, además de un planteamiento conservador favorable a la propagación. En la Recomendación de la Comisión 2003/613/CE –Tabla 18– se recogen distintas acciones para la corrección meteorológica en función de las condiciones que se estén dando.

CONDICIÓN	ACCIÓN
<p>Lugar: datos meteorológicos medidos in situ u obtenidos de un número suficientemente amplio de lugares próximos con métodos meteorológicos que garanticen su representatividad para el lugar considerado.</p>	<p>Obtención de datos meteorológicos medios a partir de un análisis de datos meteorológicos pormenorizados.</p>
<p>Período: período suficientemente largo para permitir un análisis estadístico que describa el año medio con precisión y continuidad, garantizando que los datos muestreados son representativos de todos los períodos diurnos, vespertinos y nocturnos de año.</p>	
<p>No se dispone de datos meteorológicos del sitio considerados, o los datos disponibles no cumplen los requisitos que se han establecido.</p>	<p>Adopción de hipótesis simplificadas sobre datos meteorológicos generales.</p>

Tabla 18. Corrección meteorológica.

Fuente: Recomendación de la Comisión 2003/613/CE.

PRESENCIA DE SUPERFICIES REFLECTANTES

En el ámbito urbano, la existencia de superficies reflectantes viene marcada por la tipología de los edificios de la calle, distinguiéndose calle con efecto cañón, calle en U, y calle con ligero efecto cañón, calle en L, *-Figuras 30 y 31-*. Este factor está relacionado con la altura de los edificios y la anchura de la calle. La distinción entre una calle con efecto cañón y con ligero efecto cañón se realiza mediante la siguiente expresión:

Calle con efecto cañón (U)	$H/B > 1$
Calle con ligero efecto cañón (L)	$H/B < 1$
H: altura media de los edificios existentes en la calle.	
B: anchura media de la calle.	

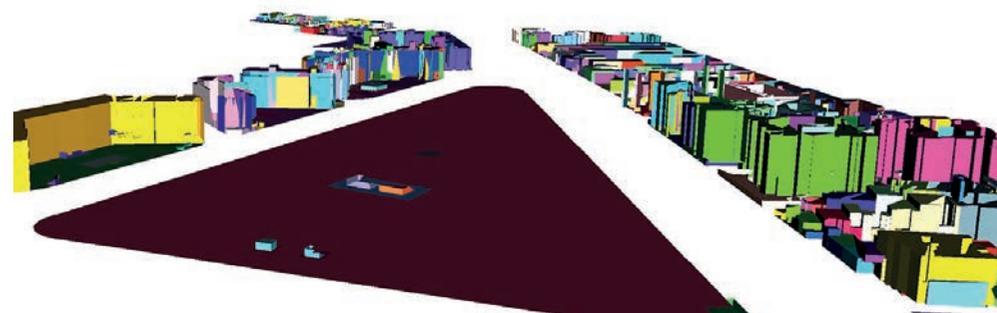


Figura 30. Calle en L.

Fuente: Elaboración propia a partir de la Dirección General del Catastro (2008).

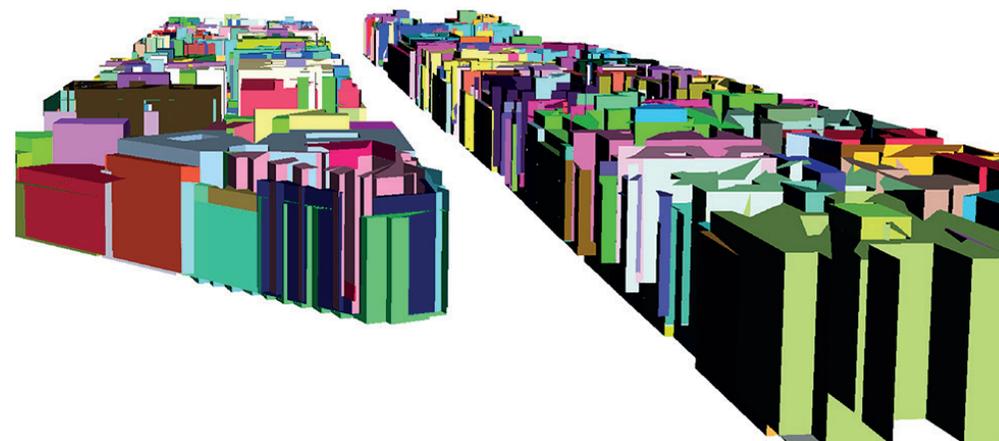


Figura 31. Calle en U.

Fuente: Elaboración propia a partir de la Dirección General del Catastro (2008).

VELOCIDAD DE LOS VEHÍCULOS

Igualmente, la velocidad del vehículo es otro factor muy importante en la generación de ruido, ya que a mayores velocidades mayor nivel de ruido. Como puede apreciarse en la Tabla 19, la reducción de la velocidad en ámbitos urbanos (de 40 a 30 km/h) para vehículos ligeros puede suponer una disminución de 3,6 dB y para pesados de 2,7 dB. En

el caso de los vehículos pesados, no es efectiva a partir de velocidades de 100 km/h, debido al roce aerodinámico y las posibles vibraciones del transporte de la carga.

REDUCCIÓN DE LA VELOCIDAD	REDUCCIÓN DEL RUIDO PARA VEHÍCULO LIGEROS (LAEQ)	REDUCCIÓN DEL RUIDO PARA VEHÍCULOS PESADOS (LAEQ)
De 130 a 120 km/h	1,0 dB	-
De 120 a 110 km/h	1,1 dB	-
De 110 a 100 km/h	1,2 dB	-
De 100 a 90 km/h	1,3 dB	1,0 dB
De 90 a 80 km/h	1,5 dB	1,1 dB
De 80 a 70 km/h	1,7 dB	1,2 dB
De 70 a 60 km/h	1,9 dB	1,4 dB
De 60 a 50 km/h	2,3 dB	1,7 dB
De 50 a 40 km/h	2,8 dB	2,1 dB
De 40 a 30 km/h	3,6 dB	2,7 dB

Tabla 19. Reducción del ruido según velocidad.

Fuente: Adaptado de Andersen (2003).

TIPO DE FLUJO DE CIRCULACIÓN

La normativa de referencia (Recomendación de la Comisión 2003/613/CE) recoge 4 tipos de flujos de circulación de vehículos, los cuales son definidos en base a la aceleración, carga del motor y flujo de tráfico en pulsos o continuo:

- **Flujo continuo fluido:** Los vehículos se desplazan a velocidad casi constante por el segmento de vía considerado. Se habla de «fluido» cuando el flujo es estable tanto en el espacio como en el tiempo durante períodos de al menos diez minutos. Se pueden producir variaciones en el curso de un día, pero éstas no han de ser bruscas ni rítmicas. Además, el flujo no es acelerado ni decelerado, sino que registra una velocidad constante. Este tipo de flujo corresponde al

tráfico de autopistas, autovías y carreteras interurbanas, al de las vías rápidas urbanas (excepto en las horas punta) y al de las grandes vías de entornos urbanos.

- **Flujo continuo en pulsos:** flujos con una proporción significativa de vehículos en transición (acelerando o decelerando), inestables en el tiempo (se producen variaciones bruscas del flujo en períodos de tiempo cortos) y el espacio (en cualquier momento se producen concentraciones irregulares de vehículos en el tramo de la vía considerado). Sin embargo, sigue siendo posible definir una velocidad media, que es estable y repetitiva durante un período de tiempo suficientemente largo. Este tipo de flujo corresponde a las calles de los centros urbanos, vías importantes que se encuentran próximas a la saturación, vías de conexión o distribución con numerosas intersecciones, estacionamientos, pasos de peatones y accesos a zonas de vivienda.
- **Flujo acelerado en pulsos:** Se trata de un flujo en pulsos y, por lo tanto, es turbulento. Sin embargo, una proporción significativa de los vehículos está acelerando, lo que implica que la noción de velocidad sólo tiene sentido en puntos discretos, pues no es estable durante el desplazamiento. Es el caso típico del tráfico que se observa en las vías rápidas después de una intersección, en los accesos a las autopistas, en los peajes, etc.
- **Flujo decelerado en pulsos:** Es el flujo contrario al anterior, pues una proporción importante de vehículos está decelerando. Este tipo de tráfico se observa en general en las grandes intersecciones urbanas, en las salidas de autopistas y vías rápidas, en la aproximación a peajes, etc.

COMPOSICIÓN DEL TRÁFICO

El nivel de ruido generado por un vehículo pesado, generalmente, es mayor que el de un vehículo ligero, lo que obliga a identificar la com-

posición del tráfico. Es decir, la proporción de vehículos ligeros y pesados para estimar los niveles de presión sonora. Este aspecto adquiere especial importancia en ciertos modelos predictivos.

CARACTERÍSTICAS DE LAS VÍAS DE RODADURA (PENDIENTE Y TIPO DE PAVIMENTO)

En las vías de rodadura son dos los factores con más influencia en la generación de ruido: pendiente y tipo de pavimento.

La pendiente tiene repercusión directa sobre la generación del ruido. Normalmente, el gradiente (ó perfil longitudinal) es considerado tanto en bajada como en subida, siendo el 2% el valor umbral (Pendiente > 2%: existe pendiente; Pendiente < 2%: pendiente plana).

La superficie de la calzada es donde se produce la interacción con el neumático y, por tanto, una de las principales fuentes de generación de ruido. En relación con el tipo de pavimento habrá que determinar principalmente el material que lo compone, puesto que la generación de ruido es muy diferente en una calle adoquinada que en una asfaltada. Otros aspectos serán la edad del pavimento y, en el caso de los conglomerados, el tamaño del árido.

De acuerdo con la Recomendación de la Comisión 2003/613/CE es posible identificar los diferentes tipos de pavimentos –Tabla 20–. Mientras que el Project SILVA, aporta información sobre el rendimiento acústico de los asfaltos porosos –Tabla 21–.

CLASES DE PAVIMENTO	CORRECCIÓN DEL NIVEL DE RUIDO Ψ		
	0-60 (km/h)	61-80 (km/h)	81-130 (km/h)
Pavimento poroso	-1 dB	-2 dB	-3 dB
Asfalto liso (hormigón o mástique)	0 dB		
Cemento hormigón y asfalto rugoso	+2 dB		
Adoquinado de textura lisa	+3 dB		

Tabla 20. Procedimiento de corrección recomendado. Fuente: Recomendación de la Comisión 2003/613/CE.

TIPO DE VEHÍCULO	VEL. (KM/H)	Nº ZONAS	EDAD PAVIMENTO (AÑOS)		NIVEL SPB (DBA)			TAMAÑO DE ÁRIDO (MM)		
			Media	Rango	Media	Mín	Máx	Media	Mín	Máx
Turismo	80	2	4,1	0,2-8,0	76,1	76,0	76,2	14,0	14,0	14,0
	110	4	3,2	0,1-6,4	79,1	76,9	82,0	10,0	8,0	16,0
Pesado doble eje	85	4	3,2	0,1-6,4	82,1	79,4	83,8	10,0	8,0	16,0
Pesado multi eje	85	4	3,2	0,1-6,4	85,2	84,5	86,3	10,0	8,0	16,0

Tabla 21. Rendimiento acústico de los asfaltos porosos. Fuente: Project SILVA. Guidance for the implementation of Low-Noise Road Surfaces (2006).

► 4.1.1. MODELO DE PREDICCIÓN DE RUIDO DE TRÁFICO

Actualmente, cada país utiliza su propio método de predicción del ruido de tráfico, aunque el más extendido es el modelo francés NMPB Routes-96, recomendado por la Directiva 2002/49/CE. Es el mismo que se considera en el ordenamiento español: Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, del Ministerio de la Presidencia (B.O.E.: 17/12/2005), por el cual se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.

MÉTODO NACIONAL DE CÁLCULO FRANCÉS "NMPB-ROUTES-96 (SETRA-CERTULCPC-CSTB)².

DESCRIPCIÓN.

Este modelo de predicción utiliza el nivel de presión sonora continuo equivalente en dB(A), L_{Aeq} . En él se distinguen dos periodos de tiempo (día: 6-22 h y noche 22-6 h), aunque permite trabajar con periodos de 1h, para ajustar la predicción a los rangos horarios establecidos en la normativa de referencia (L_{den} , L_{day} , $L_{evening}$, L_{night}).

Para el cálculo del nivel equivalente es necesario considerar los siguientes aspectos:

- El flujo medio de tráfico en un año.
- Efectos de propagación (Divergencia, absorción atmosférica, efectos de suelo, difracción en obstáculos, etc.).
- Condiciones meteorológicas (Gradiente vertical de velocidad del viento y de temperatura).

La emisión calculada está descrita en términos de nivel de potencia sonora por metro lineal de carretera. Es decir, el modelo divide la carretera en fuentes de ruido puntuales ubicadas a mitad del respectivo segmento (0,5 m de la superficie de rodadura).

CONDICIONES METEOROLÓGICAS.

Las variables meteorológicas, temperatura y velocidad del viento, dan lugar a 3 tipos de condiciones de propagación: homogéneas, favorables y desfavorables.

La estimación de la influencia meteorológica se lleva a cabo bajo condiciones de propagación homogéneas y favorables, promediando los efectos para obtener el nivel de ruido promedio de largo plazo (longterm):

$$L_{\text{longterm}} = 10 \log (p * 10^{\frac{LF}{10}} + (1-p) * 10^{\frac{LH}{10}})$$

El nivel a largo plazo (longterm) se calcula sumando los niveles de ruido estimados para propagación favorable (LF) y propagación homogénea (LH), y con el porcentaje de ocurrencia a largo plazo para condiciones meteorológicas de propagación favorable (p). La norma recomienda implementar 100% de propagación favorable para la noche, o un 50% para todo el día.

ATENUACIONES EN EL CAMINO DE PROPAGACIÓN.

El nivel de presión LF, con condiciones de propagación favorables, es calculado para banda de octava y para el camino entre una fuente puntual sobre la carretera y el receptor como:

$$LF = L_w - A_{div} - A_{atm} - A_{grdF} - A_{diff}$$

A_{div} : atenuación por divergencia.

A_{atm} : atenuación por absorción.

A_{grdF} : atenuación por efecto del suelo.

A_{diff} : atenuación por difracción.

MODELO DE EMISIÓN.

En el modelo de emisión se conjugan el siguiente conjunto de variables para el cálculo del nivel de presión sonora:

- **Flujo medio para el periodo de tiempo considerado** (hora, día, tarde, noche, o 24 h).
- **Categorías de los vehículos:** se establecen categorías de vehículos ligeros (< 3.500 kg) y vehículos pesados (> 3.500 kg).

² Publicado en "Arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières, Journal officiel du 10 mai 1995, article 6 y en la norma francesa XPS 31-133".

- **Velocidad media para cada categoría de vehículo.** Siendo el rango de validez para vehículos ligeros 20 a 130 km/h y vehículos pesados 20 a 100 km/h.
- **Tipo de vía de rodadura** (asfalto, hormigón, adoquines, asfalto poroso, etc.).
- **Pendiente.** El factor pendiente es considerado sólo cuando hay un gradiente superior al 2%, independientemente de que se trate de una pendiente de bajada o subida.
- **Tipo de tráfico.** La clasificación se realiza en base al tipo de flujo:
 - Flujo continuo fluido. Aplicable a circulación en autopistas, tráfico interurbano y avenidas principales en tráfico urbano.
 - Flujo continuo pulsado. Aplicable en el centro de las ciudades y avenidas en estado de saturación.
 - Flujo en aceleración pulsado. Aplicable a las entradas a una autopista o a una vía antes de un cruce.
 - Flujo desacelerado pulsado. Aplicable a las salidas de una autopista o a una vía antes de un cruce.

Finalmente, comentar que también existen otros métodos de predicción para el ruido de tráfico, que aunque no son los recomendados por la normativa de referencia, son válidos, ya que cumplen con los requisitos establecidos en el Anexo I del R.D. 1513/2005. Incluso, en algunos casos, pueden ayudar a evaluar ciertas situaciones más complejas. Algunos de ellos son: RLS 90 (Alemania), CRTN (Inglés) y SRM I & II (Holanda)

4.2. RUIDO DE TRENES

En la descripción del ruido de trenes, al igual que con el ruido de tráfico, se atenderá a sus principales fuentes, los factores generadores del ruido y los principales modelos de predicción.

FUENTES SONORAS EN UN TREN

La diferencia más sustancial con respecto al ruido de tráfico es en relación con la gran cantidad de vibraciones que producen los sistemas ferroviarios –Figura 32–. Otro aspecto a reseñar, es que al ser sistemas que circulan por plataforma guiada (vías) no se ven influenciados por determinados factores de generación del ruido como el volumen de tráfico, el modo de conducción o la composición del tráfico. Por tanto, las principales fuentes de ruido que se identifican en un sistema ferroviario se deben principalmente al ruido y las vibraciones de tracción, ruido y vibraciones de rodadura, ruido de equipamiento auxiliar y ruido aerodinámico, así como las vibraciones asociadas a estas fuentes (Bartí, 2010; Thompson, 2009).

RUIDO DE TRACCIÓN

El ruido de tracción, de igual forma que en los automóviles, se corresponde con aquel que procede del motor, o máquina tractora. En el caso de los trenes se diferencian varios tipos de propulsores: diésel, eléctricos, vapor o levitación magnética. Aunque actualmente los más utilizados son los eléctricos en los sistemas de metro ligero.

PROPULSORES ELÉCTRICOS

Los motores eléctricos, en comparación con los diésel, son mucho más silenciosos, esto es debido al elevado par motor que poseen, lo cual les permite iniciar el desplazamiento desde 0 revoluciones. A su vez, al ser motores de pequeño volumen, pueden ser colocados en todos los vagones y repartir la tracción, haciéndola más eficiente en todo el convoy.

En el propulsor eléctrico, las principales fuentes de ruido son el control electrónico del motor, el propio motor (bobinas) y los ventilado-

res auxiliares. También, otra fuente de ruido importante a considerar, pero sólo a altas velocidades, es el pantógrafo o la catenaria³.

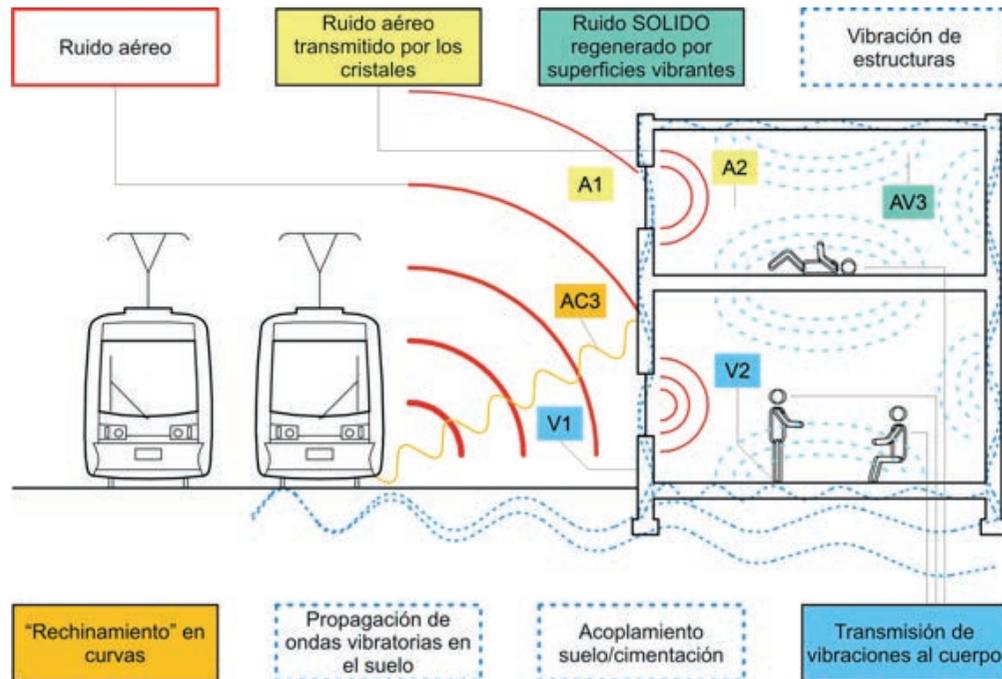


Figura 32. Tipos de ruidos y vibraciones transmitidas por los sistemas ferroviarios. Fuente: elaboración propia a partir de Bartí (2010) y Thompson (2009).

RUIDO DE RODADURA

El ruido de rodadura es el asociado al contacto que se produce entre las vías y las ruedas del tren. Este ruido es producido por los desgastes irregulares que se producen en la vía y la rueda, así como por las holguras que se puedan originar. El efecto producido por estos desajustes se denomina corrugación, el cual consiste en la aparición de irregularidades en la superficie de las ruedas o de las vías a consecuencia del roce de la zapata de freno y la rueda, producto de la gran cantidad de calor producida. Estas se agravan con el tiempo si no exis-

te un buen mantenimiento pudiendo generar aumentos de hasta 20 dB(A) (Bartí, 2010).

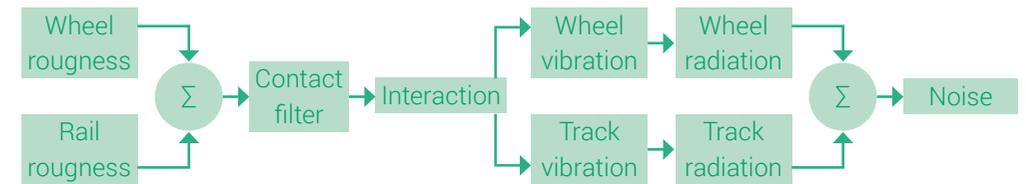


Tabla 22. Modelo de la generación del ruido y la vibración de rodadura. Fuente: Thompson (2009)

RUIDO DE EQUIPAMIENTO AUXILIAR

El equipamiento auxiliar de un tren está compuesto por los sistemas de ventilación (forzado o aire acondicionado), señales acústicas de aviso (silbatos, campanillas, etc.), pantógrafo, catenaria, ventiladores, compresores, sistemas de frenado y ventilación del pasaje.

Todos los elementos que componen el equipamiento auxiliar son fuentes de emisión de ruido, aunque en comparación con las fuentes de ruido por rodadura, tracción e incluso aerodinámico, no alcanzan niveles tan elevados.

RUIDO AERODINÁMICO

El ruido aerodinámico en trenes se produce como consecuencia de presiones en las turbulencias de aire situadas sobre o cerca de la superficie del tren en movimiento (Thompson, 2009). Este ruido aerodinámico es debido a la combinación de capas adyacentes turbulentas y separaciones de flujo laminar. Es decir, el flujo laminar del aire sobre la superficie del tren se convierte en turbulento a medida que va encontrando protuberancias, superficies rugosas o bordes ásperos. Las

³ Se corresponde al elemento mediante el cual el tren toma energía eléctrica para transmitirla al motor.

principales causas de ruido aerodinámico son los remolinos causados por los perfiles de ruedas, parte de los sistemas de suspensión, los bogies que interfieren en la corriente de aire y objetos de la superficie del tren como los limpiaparabrisas y los pantógrafos.

Aunque depende del tipo de tren, dentro del ruido aerodinámico se pueden diferenciar:

- Los bogies, particularmente el de cabecera.
- El pantógrafo, su hueco en el techo y otras instalaciones montadas sobre el techo.
- La cabeza del tren.
- Los huecos entre los coches (unidades móviles).
- Las rejillas de ventilación.
- Protuberancias como manillas y escaleras en las puertas.
- Cavidades resonadoras.
- La propia capa turbulenta sobre la superficie del tren, la cual tiene muy baja potencia pero está distribuida en una gran área.

FACTORES DE LA GENERACIÓN DEL RUIDO DE TRENES

Tal y como se comentaba anteriormente, los trenes al circular por una plataforma guiada no se ven influidos por factores como el volumen de tráfico, el modo de conducción o la composición del tráfico. Sin embargo, sí influyen el tipo de vehículo (Fuentes sonoras de un tren. Ruido de tracción), la velocidad del vehículo, especialmente habrá que tener en cuenta los pasos en curva y su relación con el ruido aerodinámico, la climatología y la presencia de superficies reflectantes (Factores de la generación del ruido de tráfico).

► 4.2.1. MODELO DE PREDICCIÓN DEL RUIDO DE TRENES

En la normativa de referencia (Ley 37/2003, R.D. 1513/2005, Directiva 2002/49/CE y la Recomendación de la Comisión 2003/613/CE) se establece como método de cálculo el modelo "Reken-en Meetvoorschrift Railverkeerslawaaï'96 (RMR)" (Guías para el cálculo y medida del ruido del transporte ferroviario 1996)*. En este manual, en primer lugar, se describen tres procedimientos para la determinación de las nuevas categorías de trenes y el material rodante de nacionalidad no holandesa que circula por vías no holandesas (procedimientos A y B), así como de las vías no holandesas (procedimiento C):

- **Procedimiento A.** Es un método simplificado para determinar si un vehículo ferroviario puede incluirse en una de las categorías preexistentes –Tabla 23–. Es utilizado para vehículos en fase de diseño para los cuales es imposible realizar mediciones de ruido. Esta atribución a una categoría se realiza en base al tipo de propulsor (diésel, eléctrico o hidráulico) y al tipo de frenado (discos o zapatas).

- **Procedimiento B.** En él se describe como obtener datos de emisión de los vehículos ferroviarios que no quedan agrupados en una de las categorías existentes –Tabla 23–. En este caso se introduce una "categoría libre" en la que se puede incluir cualquier tipo de vehículo, siempre que sus emisiones se determinen de conformidad a este procedimiento. Estos datos obtenidos tienen en cuenta la distancia entre vehículos, la radiación sonora de la vía y las rugosidades de esta última y de las ruedas, además de las diferentes fuentes de ruido (ruido de tracción, de rodadura y aerodinámico) y sus alturas.

PUBLICADO EN "REKEN – EN MEETVOORSCHRIFT RAILVERKEERSLAWAAI '96, MINISTERIE VOLKSHUISVESTING, RUIMTELIJKE ORDENING EN MILIEUBEHEER, 20 DE NOVIEMBRE DE 1996". TODO EL CONTENIDO QUE SE RECOGE A CONTINUACIÓN PARA LA PREDICCIÓN DE EMISIONES SONORAS PARA VEHÍCULOS FERROVIARIOS O DE VÍAS ESTÁN RECOGIDOS PORMENORIZADAMENTE EN EL MANUAL "REKEN- EN MEETVOORSCHRIFT RAILVERKEERSLAWAAI 2002, MINISTERIE VOLKSHUISVESTING, RUIMTELIJKE ORDENING EN MILIEUBEHEER, 28 MAART 2002".

- **Procedimiento C.** Este método describe cómo determinar las características acústicas de la construcción de las vías (traviesas, lechos de basalto, etc.). El cálculo se basa en el hecho de que las características de la vía, en banda de octava, son independientes del tipo de vehículo y de su velocidad. Para verificarlo es necesario realizar medidas en un mismo lugar a dos velocidades adicionales (>20%, y >30%, respectivamente). Las diferencias en las características calculadas de la vía deben ser inferiores a 3 dB en cada una de las bandas de octava. En caso contrario, habrá que investigar qué factores pueden seguir considerándose en función de la velocidad.

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN DE LOS TRENES
1	Trenes de viajeros con frenos de zapata.
2	Trenes de viajeros con frenos de disco y frenos de zapata.
3	Trenes de viajeros con frenos de disco.
4	Trenes de carga con frenos de zapata.
5	Trenes diesel con frenos de zapata.
6	Trenes diesel con frenos de disco.
7	Trenes subterráneos metropolitanos con frenos de disco y tranvías rápidos.
8	Intercity y trenes lentos con frenos de disco.
9	Trenes de alta velocidad con frenos de disco y frenos de zapata.
10	Reservada provisionalmente para los trenes de alta velocidad tipo ICE-3 (HST East)

Tabla 23. Categorías de trenes para el modelo RMR.
Fuente: Recomendación de la Comisión 2003/613/CE.

MODELO DE EMISIONES

El modelo proporciona dos sistemas de cálculo distintos (SRM I y SRM II), uno simplificado y otro detallado. Aunque el primer paso, en ambos, es clasificar los vehículos que utilicen un tramo de línea ferroviaria y sigan las directrices de servicio adecuadas en una de las categorías –Tabla 23–.

La determinación de los valores de emisión dB(A), siguiendo el SRM I, se realizan de acuerdo a la siguiente expresión:

$$E = 10 \log \left(\sum_{c=1}^y 10^{10^{E_{nr,c}}} + \sum_{c=1}^y 10^{10^{E_{r,c}}} \right)$$

Donde:

- $E_{nr,c}$: es el factor de emisión por categoría de vehículos ferroviarios cuando el tren no está frenado.
- $E_{r,c}$: es el factor de emisión en fase de frenada.
- c : es la categoría a que pertenece el tren.
- y : es el número total de categorías presentes.

Y el cálculo de los valores de emisión por categoría de vehículos ferroviarios se determina mediante:

$$E_{nr,c} = a_c + b_c \log(v_c) + 10 \log(Q_c) + C_{b,c}$$

$$E_{r,c} = a_{r,c} + b_{r,c} \log(v_c) + 10 \log(Q_{r,c}) + C_{b,c}$$

Y donde los valores de emisión estándar a_c , b_c , $a_{r,c}$ y $b_{r,c}$ figuran en RMR.

- Q_c : es la media de las unidades de la categoría de vehículos ferroviarios considerados que no están en fase de frenado.
- $Q_{r,c}$: es la media de las unidades de la categoría de vehículos ferroviarios considerados que están en fase de frenado.
- $C_{b,c}$: es la corrección por discontinuidades de la vía y rugosidad de los raíles.

En el caso de utilizar el SRM II, los valores de emisión se determinan por bandas de octava para cada categoría de tren y cada altura de fuente acústica (hasta 5 alturas). Una vez caracterizadas las emisiones de las distintas categorías de trenes, se calcula la del tramo de línea ferroviaria especificado teniendo en cuenta el paso de las distintas categorías de trenes y el hecho de que no en todas existen fuentes so-

noras a todas las alturas, así como el paso de los trenes en diferentes condiciones (frenado o no). El factor de emisión en bandas de octava i se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L_{E,i}^h = 10 \text{Log} \left(\sum_{c=1}^n 10^{\frac{A}{10}} + \sum_{c=1}^n 10^{\frac{B}{10}} \right)$$

$$A = E_{nb,i,c}^h$$

$$B = E_{br,i,c}^h$$

Donde n es el número de categorías de trenes que utilizan la línea férrea considerada, A y B son respectivamente los factores de emisión de las unidades de un tren que no están frenando y las que están frenando para cada categoría de trenes ($c=1$ a n), en la banda de octava i , y a la altura de evaluación h ($h=0\text{m}$, $0,5\text{m}$, 2m , 4m y 5m , depende de la categoría del tren), que se calcula:

$$E_{nb,i,c}^h = a_1 + b_1 \log V_{br,c} + 10 \text{Log} Q_{br,c} + C_{bb,i,m,c}$$

$$a_1 = a_{br,i,c}^h$$

$$b_1 = b_{br,i,c}^h$$

$$E_{nb,i,c}^h = a_2 + b_2 \log V_c + 10 \text{Log} Q_c + C_{bb,i,m,c}$$

$$a_2 = a_{i,c}^h$$

$$b_2 = b_{i,c}^h$$

Siendo:

- a_1 y b_1 y, por otra parte, a_2 y b_2 son los factores de emisión para categoría de trenes c respectivamente en fase de no frenado y frenado, para una banda de octava i a una altura h ,
- Q_c es la media de las unidades de la categoría de vehículos ferroviarios considerados que no están en fase de frenado,
- $Q_{br,c}$ es la media de las unidades de la categoría de vehículos ferroviarios considerados que están en fase de frenado,
- V_c es la velocidad media al paso de los vehículos ferroviarios que no están frenando,

- $V_{br,c}$ es la velocidad media al paso de los vehículos ferroviarios que se encuentran en fase de frenado,
- b_b es el tipo de vía/condición de las vías férreas,
- m es una estimación del número de discontinuidades de la vía y rugosidad de los raíles,
- $C_{bb,i,m}$ es la corrección por discontinuidades de la vía y rugosidad de los raíles.

Al igual que en el cálculo del ruido de tráfico, también existen otros métodos de predicción válidos:

- Modelo francés SNCF
- Modelo Nord2000
- Modelo francés NMPB
- Modelo alemán Shall03
- Modelo inglés CNR-2004

4.3. PAISAJE SONORO COMO INNOVACIÓN METODOLÓGICA PARA LA INTEGRACIÓN AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

La integración de proyectos relacionados con el transporte público en la ciudad y en el entorno metropolitano siempre se ha entendido como una implantación determinada, en la mayoría de los casos, por condicionantes comerciales y el consumo, de forma que son obviados otros aspectos que realmente promueven las relaciones entre las personas y la ciudad. Esta interpretación de la integración, al margen del binomio hombre-medio ambiente urbano, provoca una pérdida de

identidad y especificidad hasta el punto de que visitar una ciudad, en términos sonoros, equivale a visitar otra cualquiera (Carles, 2004).

El actual problema que sufren las ciudades, en relación con el ruido ambiental, provoca un interés especial a la hora de abordar análisis sensibles, lo que está dando lugar a la aparición de enfoques más sensoriales donde realmente pueda ser integrado el proyecto objeto de estudio, en este caso el metro ligero. Se trata de un análisis integral del ruido –Figura 33– que, además de la cuantificación de los niveles de presión sonora (componente física), incorpore la percepción de bienestar de la población (Confort Sonoro o Ambiental).



Figura 33. Esquema de interacción entre el individuo y su entorno sonoro.

Fuente: Adaptado de Torija (2010)

Finalmente, la incorporación de estos nuevos métodos permite desarrollar análisis y evaluaciones **más integrales** debido al amplio abanico de datos necesarios (objetivos, subjetivos y ambientales). Por otra parte, se trata de un proceso donde se **fomenta la participación ciudadana**, requiriendo del compromiso y la obligación de aceptar los resultados por parte de los responsables políticos y técnicos (**actitud proactiva**).

► 4.3.1. CONCEPTO

El Paisaje Sonoro es un concepto acuñado por el músico R. Murray Schafer, quien entendía el sonido no como un elemento físico del medio, sino como elemento de comunicación e información entre el hombre y el medio (urbano, rural o natural) y definiendo a este como el campo total de sonidos donde quiera que se esté. Este concepto junto con la aparición de la ecología acústica (Pijanowski, 2011), la definición de una serie de parámetros para la valoración del paisaje sonoro y el desarrollo de análisis más integrales (López-Barrio, 2005), supuso un nuevo enfoque para la investigación en acústica ambiental, dando lugar a conceptos como **identidad sonora**, **ambiente sonoro**, **sound-scapegraphy**, **identidad sonora**, **keynotes**, **sound signals**, **landmarks**, etc. En esta dirección, previamente al desarrollo de la metodología de análisis y evaluación es necesario detenerse en varios conceptos como son *identidad sonora*, *ambiente sonoro* y *soundscapegraphy*.

La **Identidad Sonora** se define como “el conjunto de características sonoras comunes a un lugar, un barrio o una ciudad, es decir, el conjunto de sonidos que hacen que la ciudad produzca un sentimiento de permanecer idéntica a sí misma, los sonidos que permiten reconocerla, identificarla y, por consiguiente, diferenciarla de otra ciudad. En definitiva, se trata de todos los sonidos ordinarios encarnados en la vida cotidiana con los que el habitante se identifica” (Carles, 2004).

Con respecto al término **Ambiente Sonoro**, podría generalizarse hablando de cada uno de los espacios sonoros con identidad sonora

propia que pueden identificarse dentro de un todo acústico (agregado de identidades sonoras de un espacio: barrio, plaza, avenida, etc.) y que constituyen un paisaje sonoro –Figura 34–.

Finalmente, **Soundscapegraph** (Hayashi, 1999) trata de describir el paisaje sonoro como un ambiente sonoro más allá de las características físicas y, con especial énfasis, en la forma en que es percibido y entendido por las personas o por la sociedad, cuyo fin es cartografiarlo.

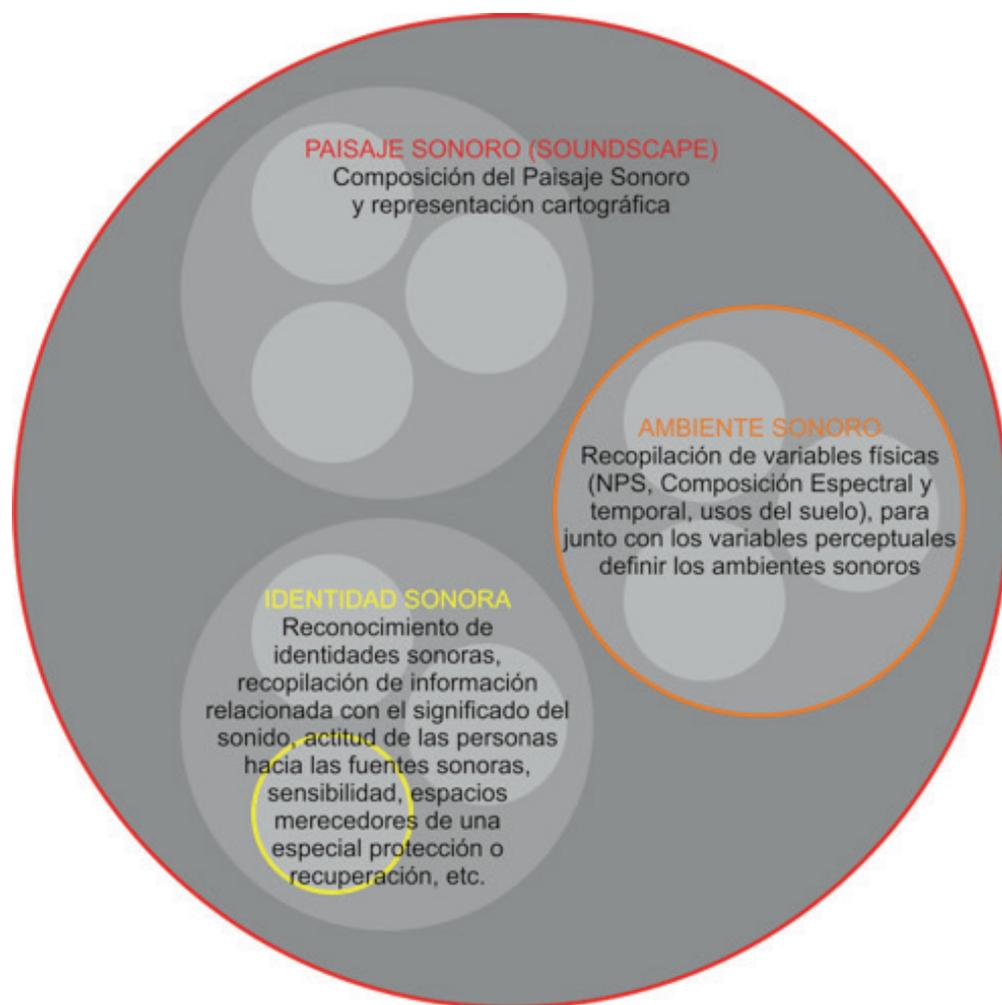


Figura 34. Composición de un Paisaje Sonoro.
Fuente: Elaboración propia.

► 4.3.2. OBJETIVOS

El objetivo principal es introducir el concepto de paisaje sonoro en los estudios de planificación y proyecto de los sistemas de transporte público, de forma que se dispongan de más variables para el análisis, la evaluación y elaboración de propuestas, de cara a garantizar su integración urbana desde el punto de vista acústico. Para ello se propone (Carles, 2004):

- Identificar y estudiar los espacios públicos que en opinión de los usuarios son relevantes para la identidad sonora de la ciudad.
- Conocer el significado, como es percibido y evaluado, atribuido por los ciudadanos a los diferentes ambientes sonoros identificados, determinando la importancia de las características físicas del entorno (diseño del espacio, características arquitectónicas), sociales (usos del espacio), los significados (sociales y culturales), así como las características físicas del sonido (intensidad, frecuencia, distribución temporal) y su incidencia en la valoración subjetiva en la evaluación del ambiente sonoro.
- Elaborar un método práctico que permita establecer criterios de calidad sonora donde se recojan la percepción, identificación y representación que los ciudadanos poseen del ambiente sonoro de su ciudad superando los clásicos análisis basados, únicamente, en instrumentos de medida y control del ruido.

► 4.3.2. CARACTERIZACIÓN DEL PAISAJE SONORO

La irrupción de nuevos conceptos como identidad sonora, ambiente sonoro y soundscapegraph, entre otros, permite incorporarlos como nuevos parámetros con los que evaluar la calidad acústica urbana y metropolitana. En estos nuevos modelos de evaluación, aparte de los criterios físicos, se incorporan factores psicológicos (perceptuales), psicosociales (sociales) y elementos clave (variables espacia-

les) con los caracterizar mejor el paisaje sonoro (Kang, 2010). Para la caracterización de los distintos ambientes sonoros y, por tanto, del paisaje sonoro, se pueden identificar tres grupos de datos básicos –Figura 35–:

- **Datos Objetivos** (Criterio Físicos y Espaciales). Propiedades físicas del sonido ambiental, las cuales pueden ser medidas o registradas (naturaleza, tipología, nivel de intensidad, composición espectral, análisis temporal,...).
- **Datos Subjetivos** (Criterios sonoros y socioculturales). Reconocimiento del sonido, preferencias, congruencia, y otros aspectos medibles mediante encuestas de diferencial semántico.
- **Datos Ambientales** (Criterios sonoros y socioculturales). Aspectos sociales, culturales, históricos, geográficos, demográficos, etc.



Figura 35. Caracterización de los Ambientes Sonoros.
Fuente: elaboración propia.

CRITERIOS FÍSICOS (DATOS OBJETIVOS)

Los criterios físicos para la caracterización y clasificación de los ambientes sonoros son dos: el nivel máximo de presión sonora, la existencia de eventos anómalos (Notice Sounds Events) y la transgresión de la norma.

- Nivel máximo de presión sonora. Una vez delimitados los ámbitos del paisaje sonoro habrá que determinar cuál es el nivel máximo de presión sonora (Ld, Le y Ln). Esta información se puede obtener a partir de los mapas de ruido o, en caso de no disponer de ellos, realizar las mediciones oportunas.
- Existencia de fenómenos anómalos, denominados Notice Sounds Events (Torija, 2012), referidos a eventos sonoros no continuos. Los ejemplos más claros son las sirenas de ambulancias, policía o bomberos. Estos, aún sin ser constantes en el tiempo, ha quedado demostrado que tienen una incidencia notable sobre la percepción de la calidad del ambiente sonoro.
- Transgresión de la norma. En todas las ciudades existen determinadas excepciones donde la normativa es transgredida, provocando rechazo entre la población, además de ser valoradas como ambientes muy ruidosos, desagradables y agresivos. Normalmente, esta transgresión de la norma suele darse en áreas de ambiente nocturno.

CRITERIOS ESPACIALES (DATOS OBJETIVOS)

Es muy importante incluir en la valoración el tipo de espacio donde es escuchado el sonido. El principal distintivo, en este caso, será en relación al uso dominante del suelo (residencial, industrial, equipamiento, etc), la existencia de alguna figura de protección (zonas protegidas o zonas no protegidas) y, en su caso, la identificación del ámbito como espacio de borde o contacto.

USO DEL SUELO

El uso del suelo se deberá acogerse a lo establecido por los Planes Generales de Ordenación Urbanística o documentos análogos, los cuales permitirán caracterizar el ámbito y determinar en base a ellos la existencia o no de transgresión de la norma. El uso dominante del suelo se establecerá de acuerdo con las pautas establecidas por el Decreto 1367/2007.

ESPACIOS PROTEGIDOS

La clasificación de espacios protegidos, como pudiese parecer, no se establece por disponer de figuras legales de protección sino por ser lugares que de forma natural están protegidos de los ambientes más ruidosos o, por el contrario, más expuestos. De acuerdo con lo anterior se pueden distinguir tres categorías:

- Espacios Protegidos: en esta clasificación estarían todas aquellas zonas que quedan alejadas o apartadas de los principales focos de contaminación acústica en las ciudades (tráfico, industria,...). Estas se corresponden con zonas peatonales, plazas, plazoletas, callejuelas, parques, etc., y están caracterizadas por poseer un ambiente sonoro muy variado, con sonidos en constante renovación, claros y legibles. Por otra parte, sus intensidades se ubican en niveles medios o medios altos. Por último, son espacios con una gran aceptación social y valoración positiva por parte de la población.
- Espacios no protegidos. Al contrario que las zonas protegidas son espacios con elevados niveles de intensidad sonora, debido a que se corresponden con las principales vías de comunicación, ámbitos próximos a las líneas ferroviarias, zonas industriales, etc. Existe gran variedad sonora pero estos no son claros ni legibles. Respecto a su intensidad sonora presentan niveles altos o muy altos, siendo espacios poco aceptados socialmente y con una valoración muy negativa.

- Espacios con fuertes contrastes. Son aquellos que coinciden con las zonas de transición entre los espacios protegidos y no protegidos. Están caracterizados por cambios bruscos y mezclas de ambientes sonoros diversos. Cuando el cambio sonoro experimenta un alejamiento del ruido suelen valorarse positivamente y negativamente si es al contrario. Sus niveles de intensidad varían en función de las características de las dos zonas en contacto.

CRITERIOS SONOROS Y SOCIOCULTURALES (DATOS SUBJETIVOS Y AMBIENTALES)

Los criterios en materia sonora están orientados a identificar el tipo de fuentes existentes y el modo que estas conforman el ambiente sonoro. En el análisis de estos aspectos se debe determinar si el espacio está humanizado o no (predominio o enmascaramiento), el tipo de mezcla sonora entre las fuentes y la existencia de transgresiones de la norma.

En el caso de un sistema de transporte público, al desarrollarse en ámbitos urbanos o metropolitanos que suelen estar muy frecuentados por la presencia de personas, un buen criterio para la distinción de estos sería determinar si existe predominio de la voz humana o no. Pudiéndose identificar dos situaciones: voz apreciable o voz enmascarada.

En los ambientes sonoros la situación más común es la combinación de varios sonidos, siendo en algunos casos una mezcla armoniosa y en otros no. Por tanto, esa mezcla de sonidos debe considerarse como otro criterio más de valoración a la hora de analizar el tipo de combinación (equilibrio o armonía) entre las diferentes fuentes.

En cuanto a los aspectos socioculturales habrá que extraer la información de la población en relación con los sentimientos (activación o no activación), el simbolismo, las costumbres y formas de vida en cada uno de los ambientes sonoros previamente identificados.

Analizar el sentimiento hacia el ambiente sonoro, se refiere a identificarlo con un ambiente con una alta actividad, bullicioso o si, por el contrario, se trata de un ambiente tranquilo y apacible.

Por otra parte, estos ambientes sonoros suelen estar muy relacionados con símbolos, la historia, costumbres, tradiciones y formas de vida. En este sentido, el objetivo principal aquí es identificar estos elementos acústicos y protegerlos evitando que queden solapados por otros sonidos.

En definitiva, se trata de poner en valor los aspectos positivos que la población considera merecedores de una especial atención. Es posible citar algunos ejemplos como el sonido de los mercados, de las fiestas tradicionales, el de plazas y plazoletas, fuentes y campanarios, entre otros.

Para facilitar este trabajo de caracterización se ha elaborado una tabla orientativa donde se recogen cada uno de los criterios descritos anteriormente –Tabla 24–.

	IDENTIDAD SONORA	CRITERIOS FÍSICOS					CRITERIOS ESPACIALES			CRITERIOS SONOROS Y CULTURALES	
AMBIENTE SONORO	IDENTIDAD SONORA	Nivel máximo de presión sonora (Ld) (dBA)	Nivel máximo de presión sonora (Le)	Nivel máximo de presión sonora (Ln)	Notice Sounds Events	Transgresión de la norma	Uso dominante del suelo (R: residencial; I: industrial; E: equipamiento; T: terciario; EL: espacio libre)	Espacio protegido	Espacio no protegido	Espacio con fuertes contrastes	
PS-01	Calles y avenidas	73	75	60	Si	Si	R	X	X	Zona con alta actividad comercial	
PS-02	Plazas, plazuelas y rincones	65	62	50	No	No	T	X		Plaza de comercio menor	
PS-03	Espacios verdes urbanos	60	60	55	No	No		X		Parque Cruz Conde	

Tabla 24. Orientación para la caracterización y clasificación de los paisajes sonoros.
Fuente: Elaboración propia a partir de Torija (2008), Ge et al (2009) y Kang (2010)

4.4. PAUTAS PARA LA INTEGRACIÓN ACÚSTICA.

Una vez caracterizado el ruido de tráfico, el ruido de trenes y el paisaje sonoro (ambientes sonoros), se describen y desarrollan, tomando el metro ligero de Granda como contexto, las pautas para la integración acústica urbana de los sistemas de metro ligero. Estas están generadas a partir de los planteamientos de diferentes investigadores (Carles, 2004; De Coensel and Botterldooren, 2007; López-Barrios, 2001; etc.) y apoyada en los fundamentos teóricos, metodológicos y prácticos descritos anteriormente –Figura 36–.

El objetivo de esta metodología –Figura 37– es cambiar los actuales modelos de análisis y evaluación acústica, apostando por dejar de considerar exclusivamente variables físicas e introducir nuevos criterios perceptuales (Paisaje Sonoro). Esta metodología supone una ventaja evidente en cuanto a la integración de las infraestructuras de transporte público, gracias a la mayor participación ciudadana que requiere, el aumento del confort acústico de las áreas urbanas y metropolitanas y del atractivo de las ciudades al permitir la diferenciar acústicamente unas de otras, así como otras externalidades positivas relacionadas con la salud de las personas o la calidad de vida.



Figura 36. Etapas en la elaboración de la metodología.
Fuente: Elaboración propia.

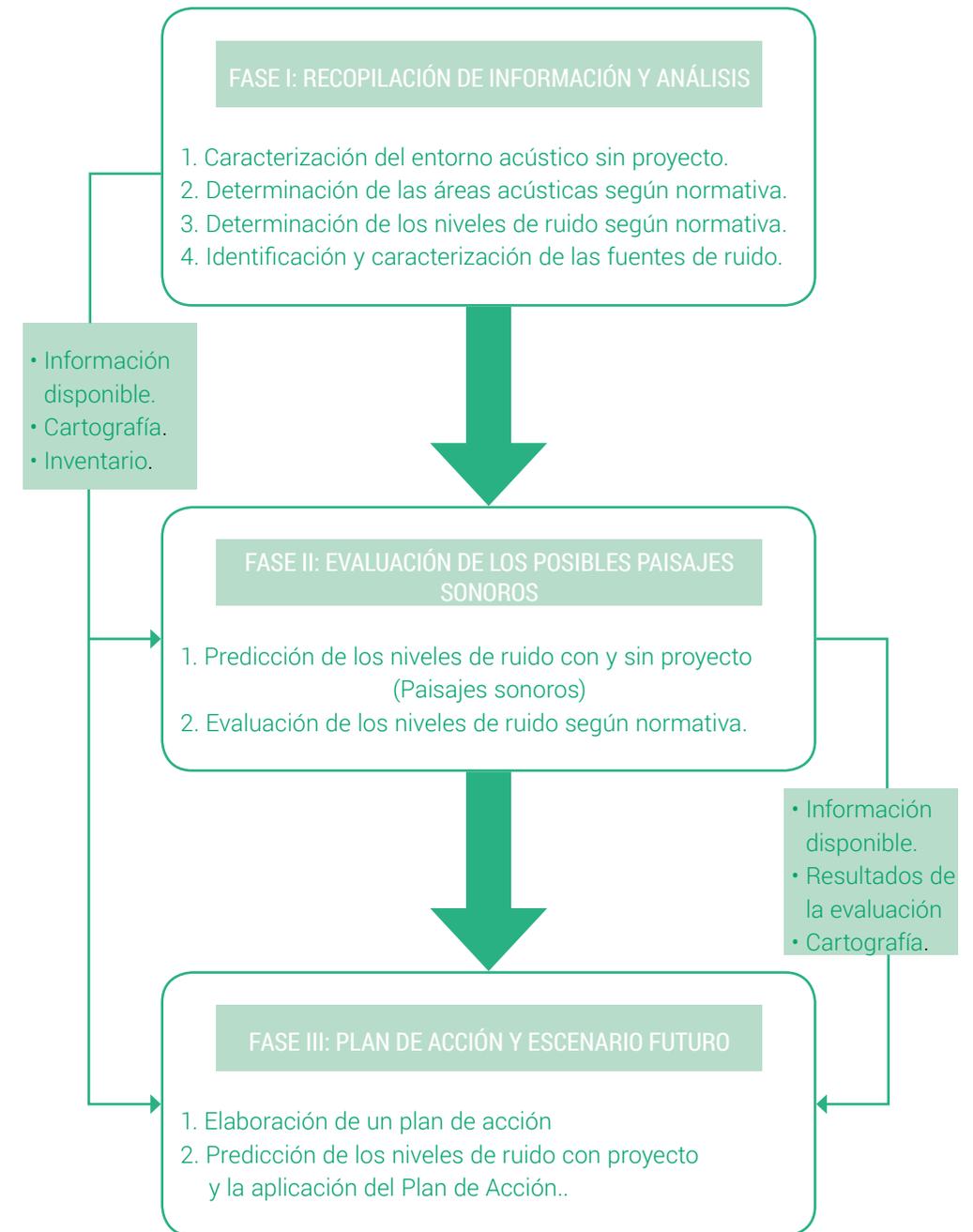


Figura 37. Secuencia metodológica para la integración acústica.
Fuente: Elaboración propia.

► 4.4.1. FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS

La propuesta metodológica está basada en otros trabajos de investigación (Kang, 2010; Raimbault, 2005; Adams, 2008 y 2009; De Coensel, 2007) y la normativa de referencia para la elaboración de estudios acústicos y de impacto ambiental. Fruto de la revisión anterior, se arma la presente propuesta metodológica que está conformada por las fases y subfases que se muestran en la Figura 37, las cuales se detallan pormenorizadamente a continuación.

► 4.4.2. FASE I: RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.

RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

El objetivo de esta etapa es recopilar toda la información posible para realizar la estimación de los niveles de presión sonora en la situación pre-operacional, en la fase de construcción y en la post-operacional. Para esta tarea se requerirá de toda aquella información relacionada con las variables ambientales, sociales y culturales, que permitan delimitar y caracterizar los paisajes sonoros (Kang, et al. 2010; Torija, 2008).

Para los niveles de presión sonora existentes (pre-operacionales) podrá recurrirse a la información disponible en los mapas estratégicos del ruido o, en el caso de no existir, a los datos sobre los índices medios vehiculares, usos actuales del suelo, datos cartográficos, meteorológicos, etc., y calcularlos *–4.1.1. Modelo de predicción de ruido de tráfico–*.

Para la fase de construcción, debido a la imposibilidad de obtener mediciones, será necesario recopilar toda la información sobre las distintas fuentes emisoras (tuneladoras, martillos hidráulicos, excavadoras, etc.), los nuevos ordenamientos de tráfico (intensidades de tráfico,

sentidos de circulación, etc.) y cualquier otra que pudiese influir en los niveles de presión sonora durante esta etapa.

Por último, para la estimación de los niveles de presión sonora en la fase post-operacional se necesitará obtener información sobre la tipología de las fuentes de ruido, el ruido y las vibraciones asociadas al funcionamiento del metro ligero *–4.1.-Ruido de Tráfico y 4.2.-Ruido de Trenes–*, los ambientes sonoros *–4.3.-Paisaje sonoro como innovación metodológica para la integración ambiental de los sistemas de transporte público–* y los ordenamientos viales definitivos con respecto al tráfico.

Esta información es el sustento documental sobre el que se apoyan los trabajos de delimitación y caracterización de ambientes sonoros (paisaje sonoro) y la determinación de las áreas acústicas, por lo que se deberá ser muy riguroso en su recopilación.

DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS AMBIENTES SONOROS (PAISAJE SONORO).

El método que se propone sigue un procedimiento basado en el desarrollado por Ge et al. 2009, en la ciudad de Saga (Japón), aunque con ciertas diferencias. La primera es con respecto a la zonificación de los diferentes ambientes sonoros, la cual se realiza a partir de las isófonas y no de la creación de cuadrículas homogéneas. Otro diferencia más, es la de incluir la información de los usos del suelo y la ortofoto, para poder mejorar la primera delimitación. Se toma el trabajo de Ge et al., (2009) por no tener referencias de trabajos similares para un entorno más próximo (europeo).

Paralelamente a la recopilación de información se deberá delimitar y caracterizar los diferentes ambientes sonoros existentes en el ámbito de estudio. Tarea que se desarrollará en cuatro etapas, basadas

en los planteamientos de varias investigaciones (Torija, 2008; Ge et al, 2009; Kang, 2010):

- Determinación del área de estudio.
- Mapeado de los ambientes sonoros.
- Recopilación de información y caracterización de los ambientes sonoros.
- Obtención del Paisaje Sonoro del ámbito de estudio.

1.- DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La extensión de un sistema de transporte público en algunas ocasiones traspasa el ámbito urbano extendiéndose por parte del área metropolitana. Ante esta circunstancia la determinación del área de estudio debería establecerse en función de su extensión (ciudad, corredor, distrito,...). Lógicamente, para un sistema de transporte público será la zona de influencia del corredor, debiendo ser justificada con el suficiente rigor.

2.- MAPEADO DE LOS AMBIENTES SONOROS

El primer paso para el mapeado de los ambientes sonoros (paisaje sonoro) es obtener el mapa de ruido del área de estudio. Aunque los niveles de presión sonora recogidos en dichos mapas se establecen en función de las franjas horarias del día (Ld, Le, Ln) o de una valoración global (Lden), para esta tarea se recomienda la utilización del indicador de ruido global (Lden). Cuando no se disponga de mapas de ruido será necesaria su elaboración, al menos para los ámbitos (corredores) por donde se establecen las alternativas de proyecto.

Tomando los niveles globales de ruido (Lden) y, en base a las isofonas, se identificarán los principales ambientes sonoros, algunos de ellos serán fácilmente reconocibles como las calles, las avenidas o las plazas –Figura 38–.

Tras esta primera delimitación de ambientes, se deberán utilizar los usos del suelo –Figura 39– y las ortofotos correspondientes –Figura 40– para tratar de establecer los límites de cada uno de los ambientes sonoros identificados anteriormente por las isófonas. No debe olvidarse que el principal elemento para el establecimiento es su identidad sonora, sirviendo el resto de elementos (isófonas, usos del suelo, barreras) de apoyo para el proceso.

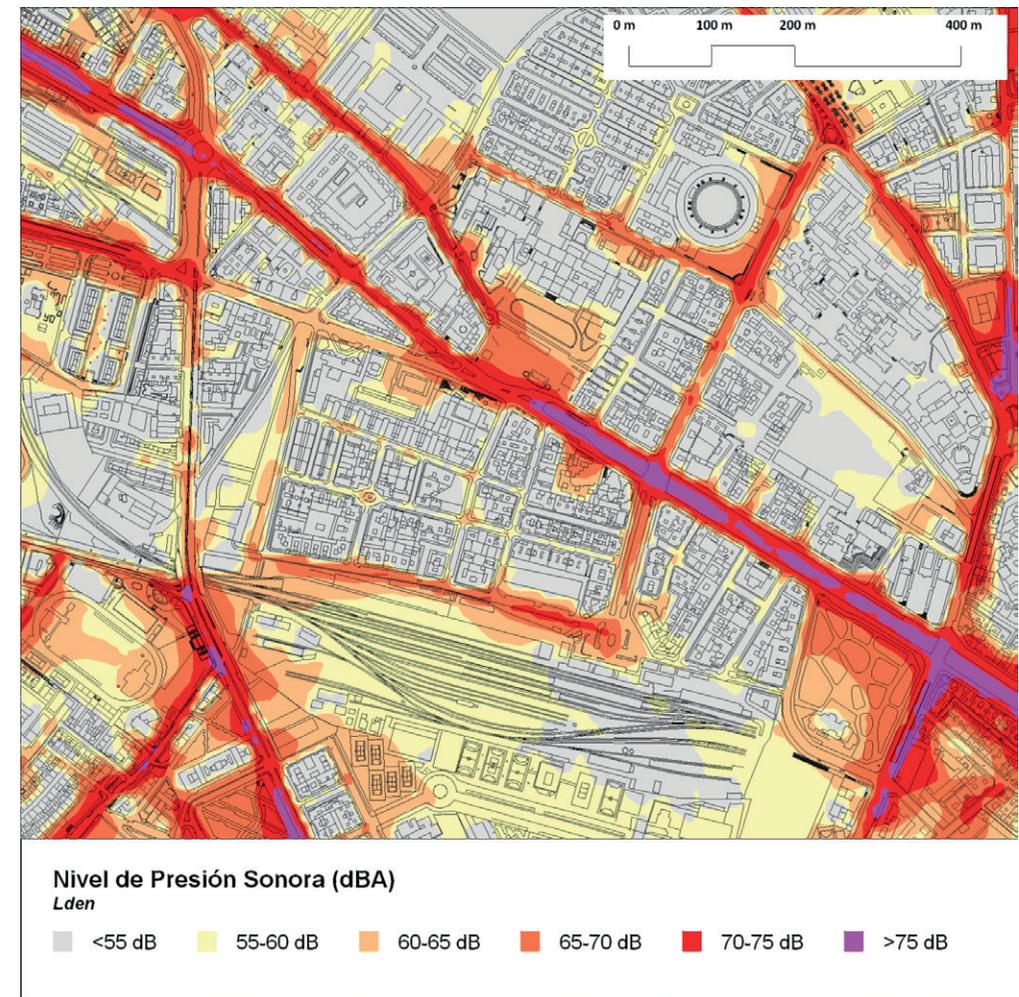


Figura 38. Mapa Acústico.

Fuente: Elaboración propia a partir del mapa estratégico del ruido de la aglomeración urbana de Granada, mapa de ruido total. (SICAWEB: <http://sicaweb.cedex.es/>)

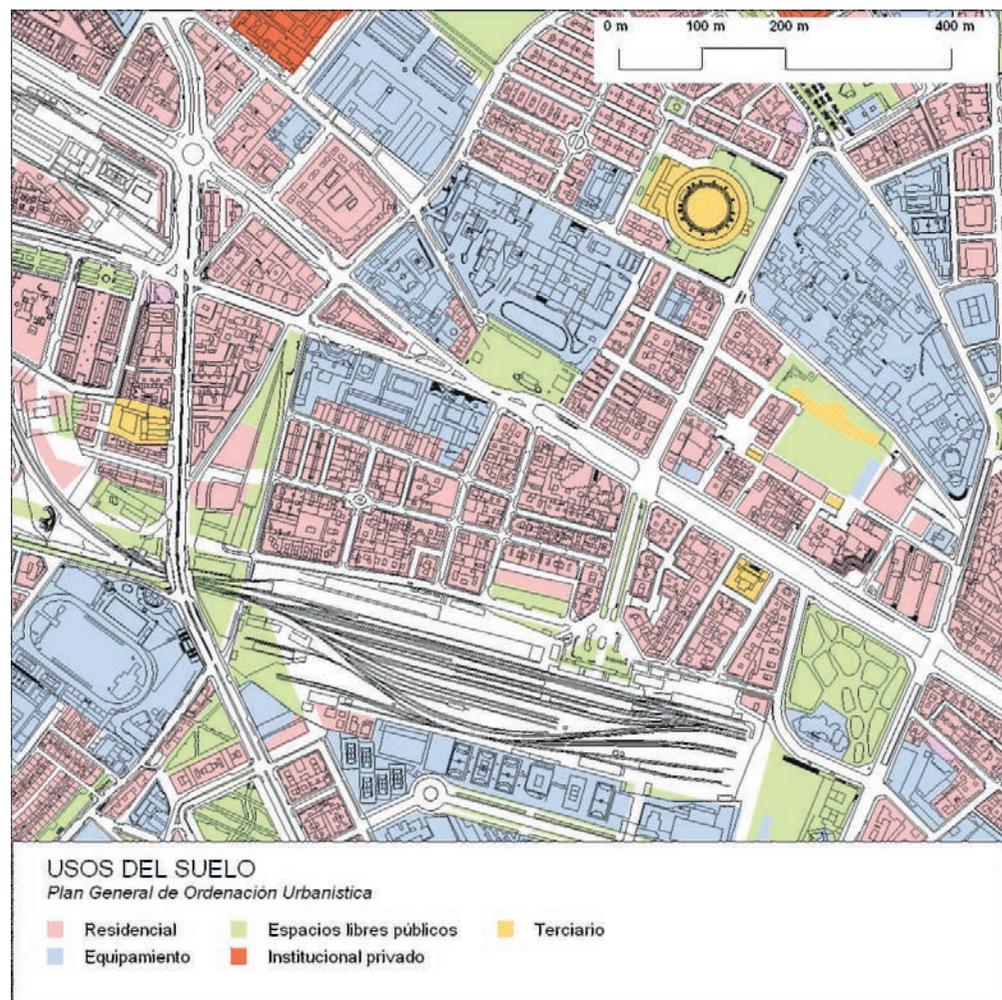


Figura 39. Usos del suelo.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información cartográfica de la Dirección General del Catastro (2008).



Figura 40. Ortofotografía, hoja 1009_3-4.

Fuente: Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía: Line@. Servicio de descarga de mapas y Ortofotografías de Andalucía. (<http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/lineav2/web/>)

3.- RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS AMBIENTES SONOROS

Esta recopilación de información se refiere exclusivamente a la relacionada con la percepción que la población tiene del ambiente sonoro. Por tanto, deberá provenir de la población, es decir, de los resultados de cuestionarios para la evaluación perceptual de paisajes sonoros o cualquier otra técnica o herramienta útil para dicho propósito.

La caracterización se desarrollará asignando atributos para cada uno de los aspectos físicos, espaciales y perceptuales y psicosociales –4.3.2. Caracterización del paisaje sonoro–.

4.- OBTENCIÓN DEL PAISAJE SONORO DEL ÁMBITO DE ESTUDIO

Finalmente, se deberá obtener una cartografía –Figura 41– donde queden reflejados todos los ambientes sonoros identificados en el ámbito de estudio, así como la información referente a su caracterización.

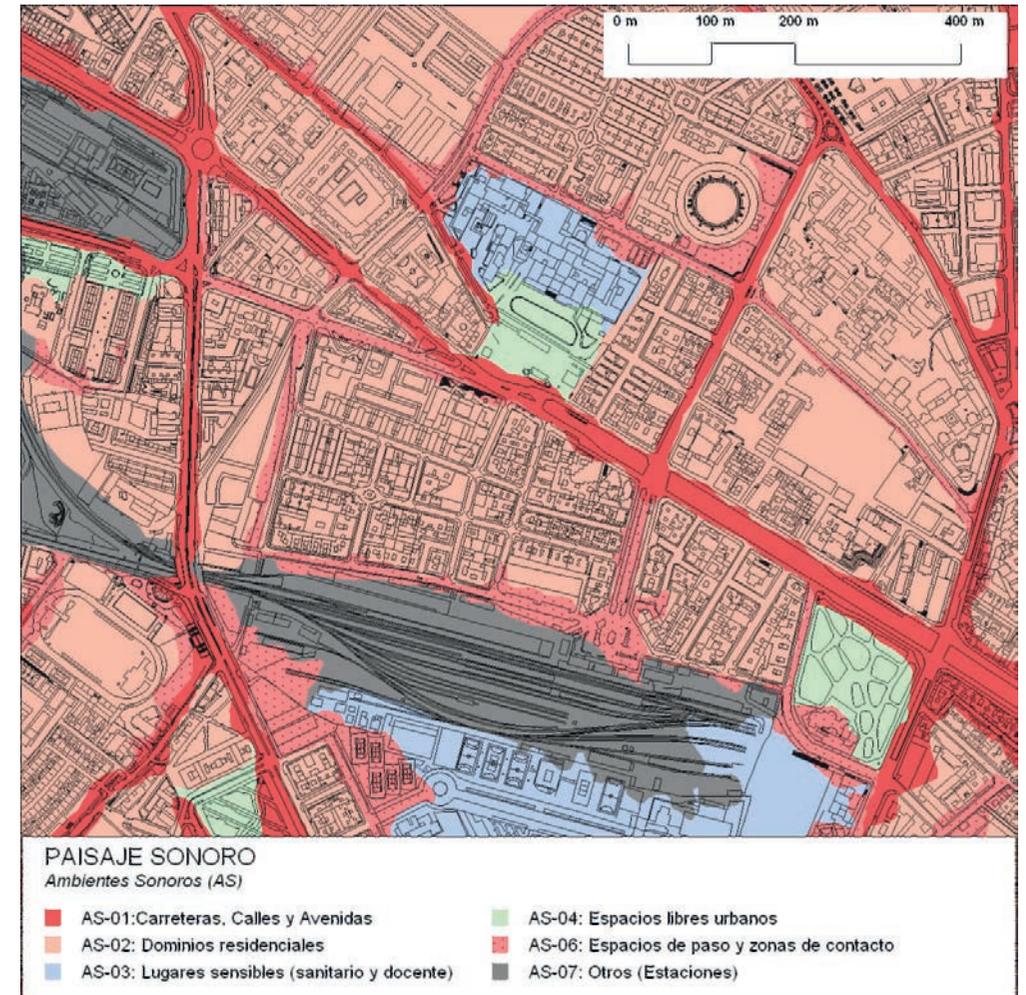


Figura 41. Propuesta de Paisajes Sonoros para el ámbito de estudio.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en las figuras 17, 18, 19 y 20.

DELIMITACIÓN DE ÁREAS ACÚSTICAS.

La definición de las diferentes áreas acústicas, sus criterios de calidad y la metodología para determinar la inclusión de un sector, quedan recogidas, a nivel nacional, en la normativa: Ley 37/2003 del Ruido y el Real Decreto 1367/2007 y, a escala autonómica andaluza, en el Real Decreto 6/2012. A continuación se recogen las diferentes áreas acústicas, sus objetivos de calidad y los criterios para su asignación, delimitación y determinación.

En el caso andaluz, es en el Decreto 6/2012, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía, en su Artículo 9.-Objetivos de calidad acústica para ruido aplicable a áreas de sensibilidad acústica, se recogen las siguientes tablas:

	TIPO DE ÁREA ACÚSTICA	ÍNDICES DE RUIDO		
		Ld	Le	Ln
a	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial.	65	65	55
b	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial.	75	75	65
c	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos.	73	73	63
d	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso característico turístico o de otro suelo terciario no contemplado en el tipo c.	70	70	65
e	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera de especial protección contra la contaminación acústica.	60	60	50
f	Sectores del territorio afectados a sistemas generales de infraestructuras de transporte u otros equipamientos públicos que lo reclamen.	s/d	s/d	s/d
g	Espacios naturales que requieran una especial protección contra la contaminación acústica.	s/d	s/d	s/d

Tabla 25. Objetivos de la calidad acústica para ruido aplicables a áreas urbanizadas existentes. Fuente: R.D. 6/2012, Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía.

	TIPO DE ÁREA ACÚSTICA	ÍNDICES DE RUIDO		
		Ld	Le	Ln
a	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial.	60	60	50
b	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industria.	70	70	60
c	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos.	68	68	58
d	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso característico turístico o de otro suelo terciario no contemplado en el tipo c.	65	65	60
e	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera de especial protección contra la contaminación acústica.	55	55	45
f	Sectores del territorio afectados a sistemas generales de infraestructuras de transporte u otros equipamientos públicos que lo reclamen.	s/d	s/d	s/d
g	Espacios naturales que requieran una especial protección contra la contaminación acústica.	s/d	s/d	s/d

Tabla 26. Objetivos de calidad acústica para ruido aplicables a las nuevas áreas urbanizadas. Fuente: R.D. 6/2012, Reglamento contra la Contaminación Acústica en Andalucía.

En los sectores del territorio, áreas urbanizadas y nuevas áreas urbanizadas (Tipo de Área Acústica F), se adoptarán las medidas adecuadas de prevención de la contaminación acústica, en particular mediante la aplicación de las tecnologías de menor incidencia acústica de entre las mejores técnicas disponibles, de acuerdo con el párrafo a), del artículo 18,2 de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre.

Además de esta normativa, deberá tenerse en cuenta cualquiera de las ordenanzas municipales u otra legislación relacionada con la materia, tomándose siempre aquella que presente los valores más conservadores.

Previamente a la identificación de los criterios de calidad a aplicar, se deberán delimitar las áreas acústicas. Esta delimitación deberá ajustarse a lo establecido en el R.D. 1367/2007, Anexo V: "Criterios

para determinar la inclusión de un sector del territorio en un tipo de área acústica”:

Tratando de facilitar la comprensión de la metodología de delimitación y caracterización de los ambientes sonoros, se toma como ejemplo un ámbito de la ciudad de Granada por donde se ha planificado que discurra el metro ligero, mostrando gráficamente cada uno de los pasos a seguir –Figuras 42 y 43–.

En primer lugar, hay que conocer los usos del suelo para cada sector de los que se están analizando –Figura 42–, para incluirlos en un tipo de área u otra. Y en segundo lugar, de acuerdo con los usos predominantes se obtendrá una primera asignación por manzana o edificio, a partir de la cual delimitar y definir las zonas acústicas, así como las áreas de transición entre aquellos contactos (ACC) que presenten una diferencia acústica superior a 5 dBA –Figura 43–.



Figura 42. Tipos de sectores del territorio según el Decreto 6/2012.
Fuente: elaboración propia a partir del Decreto 6/2012.

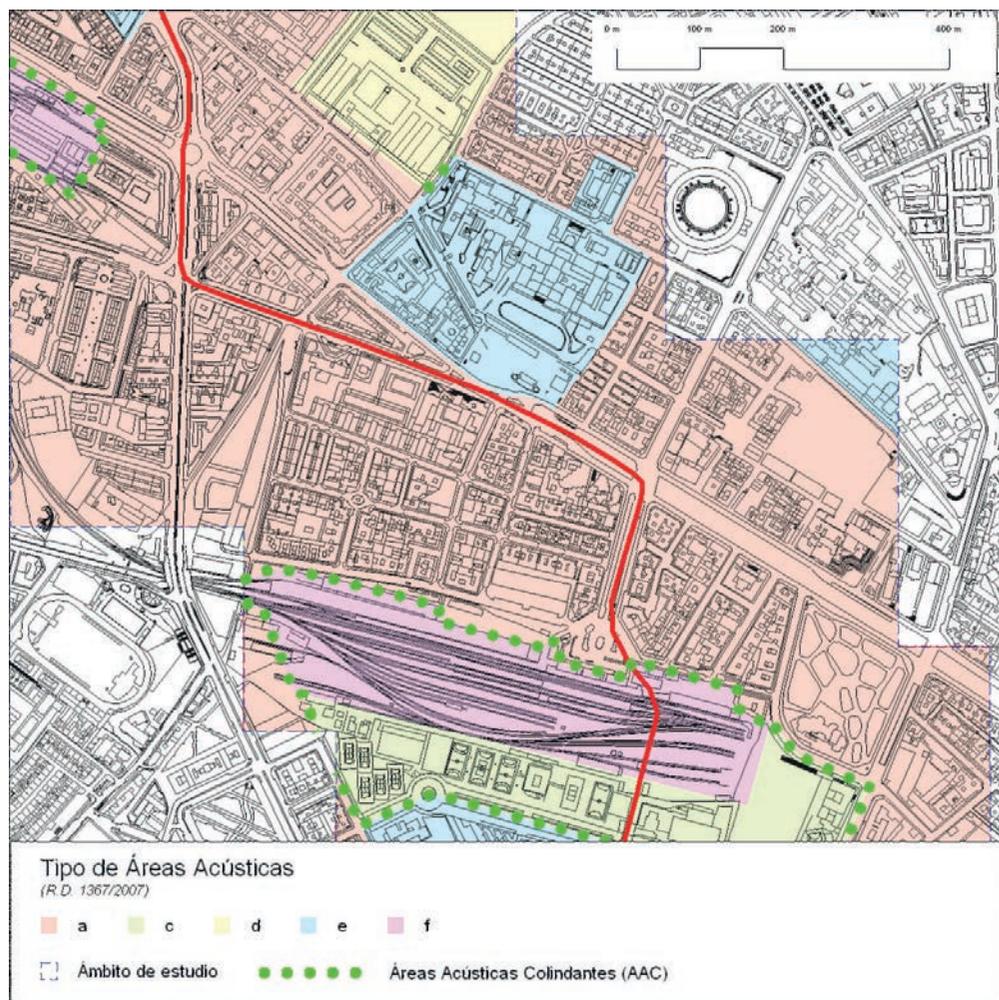


Figura 43. Tipos de Zonas Acústicas según criterios del R.D. 1367/2007.
Fuente: elaboración propia a partir de R.D. 1367/2007.

MODELIZACIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO: PRE-OPERACIONAL, CONSTRUCCIÓN Y POST-OPERACIONAL.

La modelización implica obtener o generar escenarios acústicos para las situaciones pre-operacional, construcción y post-operacional.

El escenario pre-operacional deberá mostrar la situación actual, previa a la construcción y explotación de la infraestructura. Esta información es muy posible que ya esté disponible en los mapas estratégicos de ruido (<http://sicaweb.cedex.es/>). En caso de no disponerla se deberán medir los niveles de presión sonora y elaborar los mapas de ruido pertinentes.

En una infraestructura de transporte público, los mayores impactos acústicos, en el caso del metro ligero, suelen tener lugar durante la fase de construcción. Esta particularidad hace que la determinación de estos niveles sea imprescindible para localizar y prevenir, con la mayor precisión posible, los impactos que se van a producir. La única posibilidad para conocer estos escenarios acústicos es mediante la modelización.

Por último, en la situación post-operacional se desarrollará utilizando los métodos recomendados por la Directiva 2002/49/CE –4.1.1 Modelo de predicción de ruido de tráfico y 4.2.1 Modelo de predicción de ruido de trenes–.

► 4.4.3. FASE II: EVALUACIÓN ACÚSTICA DE ALTERNATIVAS.

Los ambientes sonoros, tomados como ejemplo, no han sido caracterizados con el suficiente rigor, ya que no se ha realizado ningún tipo de encuesta sobre la percepción de la población. Con lo cual la caracterización del paisaje sonoro es simplemente un ejemplo para poder explicar las diferentes etapas que se proponen en la metodología. Sin embargo, los referentes a los estudios acústicos si han sido obtenidos de documentación real y contrastada con la realidad.

La evaluación acústica de alternativas busca identificar aquellos ámbitos donde los niveles de presión sonora superan los objetivos de calidad propuestos por la normativa –*Tablas 26 y 27*– y los objetivos establecidos para cada uno de los ambientes sonoros identificados –*estos valores deberán ser fruto de la información extraída de la población consultada mediante las encuestas de evaluación de la percepción de paisajes sonoros: 4.4.2.Fase I: Recopilación y análisis de información. b) Delimitación y caracterización de los ambientes sonoros: Paisajes Sonoros*–. El objetivo principal es identificar ámbitos que van a precisar un tratamiento especial durante la fase de construcción y las áreas donde en la fase de explotación deberán proponerse actuaciones dirigidas a la reducción de los niveles de presión sonora. Conjuntamente se estimará el número de personas expuestas a niveles superiores a los objetivos de calidad. Esta última información deberá ser extraída a partir de los mapas de conflictos, es decir la representación gráfica de “la superación o no por los valores existentes de los índices acústicos de los valores límites aplicables, y cumplimiento o no de los objetivos aplicables de calidad” (Art. 15c, de la Ley 37/2003 del Ruido).

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE PRESIÓN SONORA PRE-OPERACIONALES.

De acuerdo con la Directiva 2002/49/CE, se establecieron dos fases para la elaboración de los mapas estratégicos de ruido para ciertos ámbitos urbanos e infraestructuras (<http://sicaweb.cedex.es/>). La primera finalizó en 2007 exigiendo la elaboración de los mapas de ruido para todas aquellas aglomeraciones con más de 250.000 habitantes, grandes ejes viarios cuyo tráfico supere los 6 millones de desplazamientos, grandes ejes ferroviarios con un tráfico superior a 60.000 trenes al año y grandes aeropuertos. Y la segunda en 2012, para aglomeraciones con más de 100.000 habitantes, grandes ejes viarios con un tráfico superior a los 3 millones de desplazamientos al año y grandes ejes ferroviarios cuyo tráfico supere los 30.000 trenes al año. Por tanto,

es muy probable que ya se tenga información acústica sobre los niveles de presión sonora pre-operacionales.

Partiendo de la información anterior habrá que evaluar la situación pre-operacional para conocer en qué ámbitos, en relación con los criterios de calidad, se superan dichos valores y posteriormente calcular el número de personas que se ven afectadas.

Para ejemplificar gráficamente los pasos a seguir se toma un tramo perteneciente a la línea del metro ligero de Granada y los datos existentes en su *Anexo 2: Estudio Acústico del Proyecto constructivo de la infraestructura y superestructura de la vía de la línea metropolitana del metro ligero de Granada. Tramo 1. Subtramo 2: Villarejo – Méndez Núñez*.

En la Figura 44 se aprecian los niveles de presión sonora (Ld) pre-operacionales. A partir de estos se identifican las zonas de conflicto para criterios de calidad sonora –*Figura 45*– y para los ambientes sonoros –*Figura 46*– y el número de personas afectadas en cada caso –*Tabla 26*–. Aunque en el ejemplo sólo se toma el nivel sonoro diurno (Ld), se deberán contemplar el resto de rangos horarios (Le y Ln).

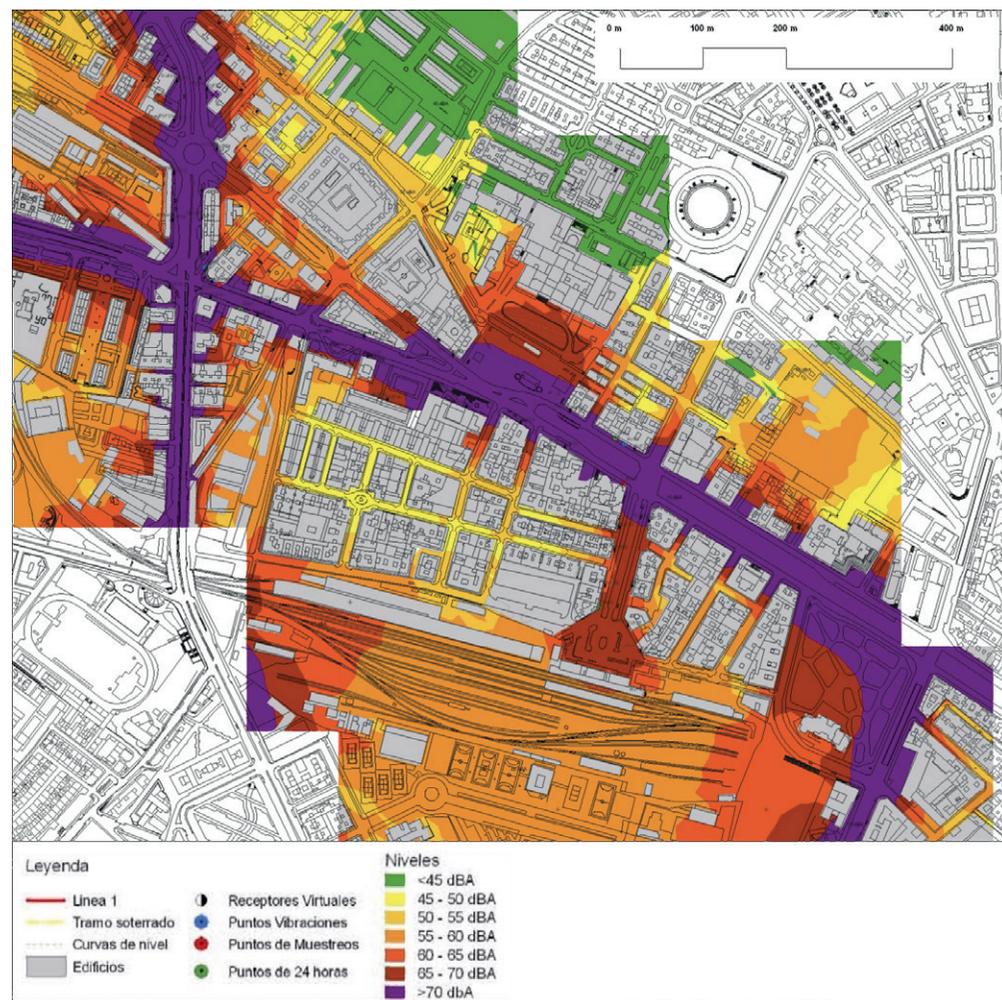


Figura 44. Nivel de presión sonora pre-operacional (Ld).

Fuente: Proyecto constructivo de la infraestructura y superestructura de la vía de la línea metropolitana del metro ligero de Granada. Tramo 1. Subtramo 2: Villarejo – Méndez Núñez. ANEXO 2: ESTUDIO ACÚSTICO



Figura 45. Mapa de conflictos de acuerdo con los criterios de calidad para la situación pre-operacional (Ld).

Fuente: elaboración propia a partir del mapa de ruido del sistema de metro ligero de Granada y el Decreto 6/2012.

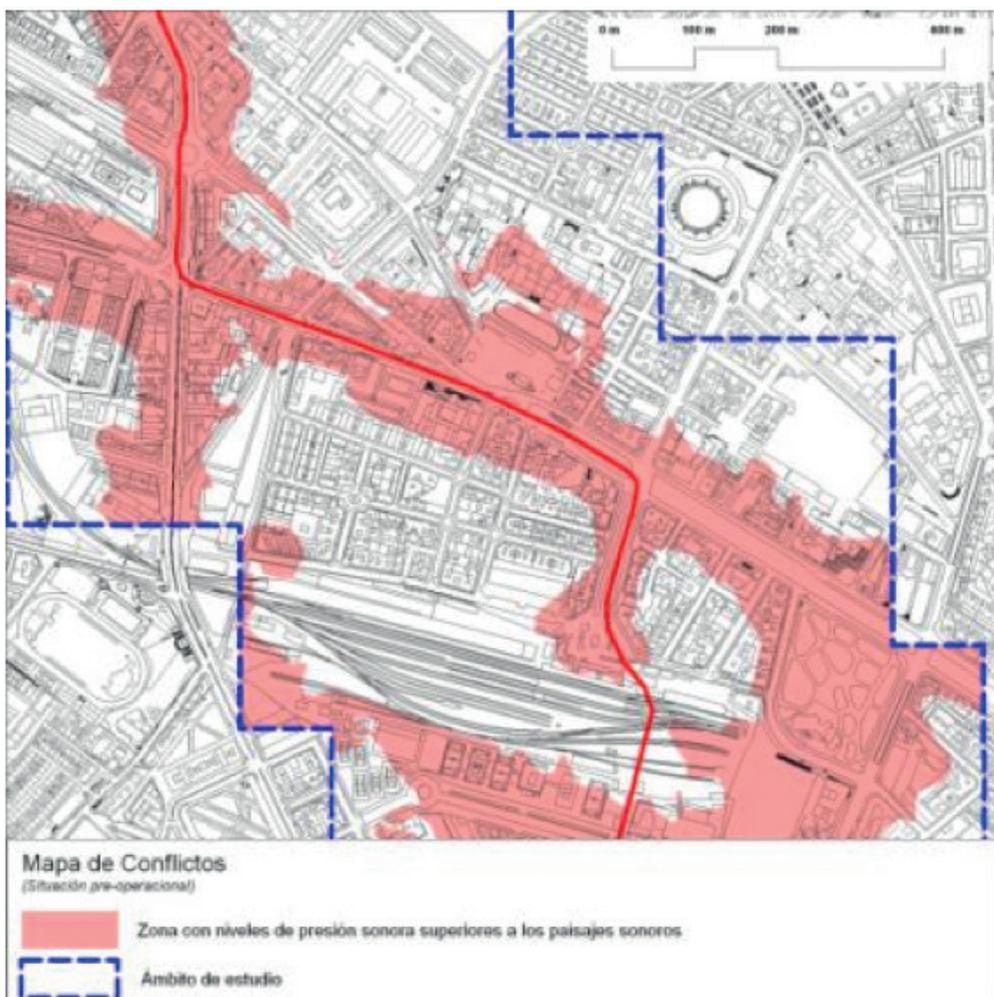


Figura 46. Mapa de conflictos de acuerdo con los paisajes sonoros para la situación pre-operacional (Ld).

Fuente: Elaboración propia.

	POBLACIÓN AFECTADA (Nº PERSONAS)	POBLACIÓN AFECTADA (%)	TOTAL ÁMBITO ESTUDIO (Nº PERSONAS)
Criterios de Calidad	7368	34,48	21367
Ambientes Sonoros	9558	43,88	21783

Tabla 27. Población afectada por niveles superiores a los criterios de calidad y los ambientes sonoros en la fase pre-operacional.

Fuente: elaboración propia a partir de las figuras 27, 28 y del padrón municipal para 2008.

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE PRESIÓN SONORA EN LA FASE DE CONSTRUCCIÓN

Durante la fase de construcción suelen generarse los mayores impactos acústicos. A diferencia de la situación pre-operacional, no será posible medir los niveles de presión sonora para su evaluación sino que habrá que estimarla teniendo en cuenta todas las fuentes sonoras previstas en la construcción de la infraestructura, el ruido de actividades ajenas al metro y los ordenamientos viales propuestos.

Una vez modelizada la situación, se elaborarán los mapas de conflictos para, de nuevo, identificar los ámbitos sometidos a niveles de presión sonora superiores a los criterios de calidad (según normativa y paisajes sonoros identificados) y estimar el número de personas afectadas. Previstos los principales impactos acústicos será más fácil actuar y planificar las medidas necesarias para la eliminación o reducción de los impactos acústicos y, consecuentemente, para mejorar su integración ambiental.

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE PRESIÓN SONORA POST-OPERACIONALES

Los niveles de presión sonora para situación post-operacional sólo podrán ser obtenidos para su evaluación ex-ante mediante modelización. Al igual que en la situación pre-operacional y construcción, los pasos a seguir son los mismos: modelizar para conocer los niveles de presión sonora –Figura 47–, calcular mapas de conflictos –Figura 48 y 49– y el número de personas afectadas –Tabla 27–.

Una particularidad es la posibilidad de calcular los mapas de conflictos según los “paisajes sonoros deseados”. Se trata simplemente de un ejercicio donde se plantea la modificación, recuperación, protección o mejora de la calidad de los paisajes sonoros identificados en el ámbito de estudio.

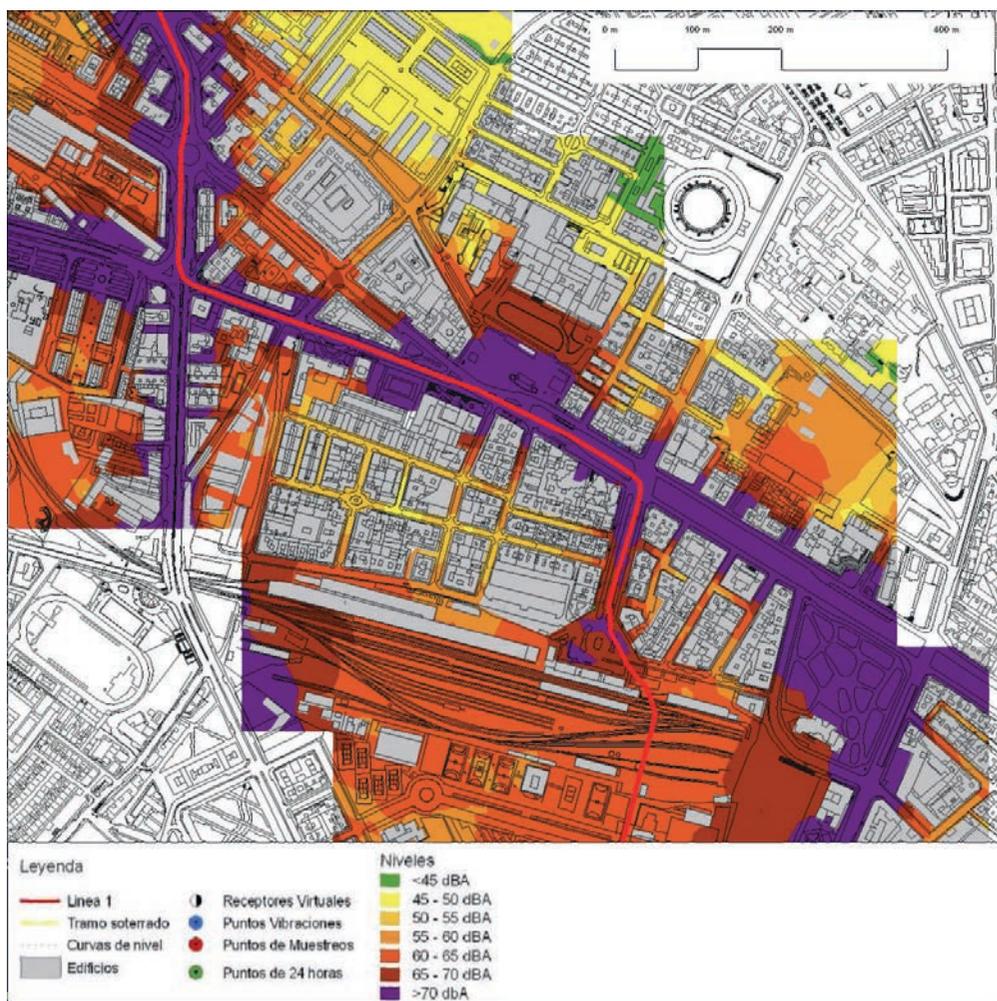


Figura 47. Nivel de presión sonora post-operacional (Ld).

Fuente: Proyecto constructivo de la infraestructura y superestructura de la vía de la línea metropolitana del metro ligero de Granada. Tramo 1. Subtramo 2: Villarejo – Méndez Núñez. ANEXO 2: ESTUDIO ACÚSTICO

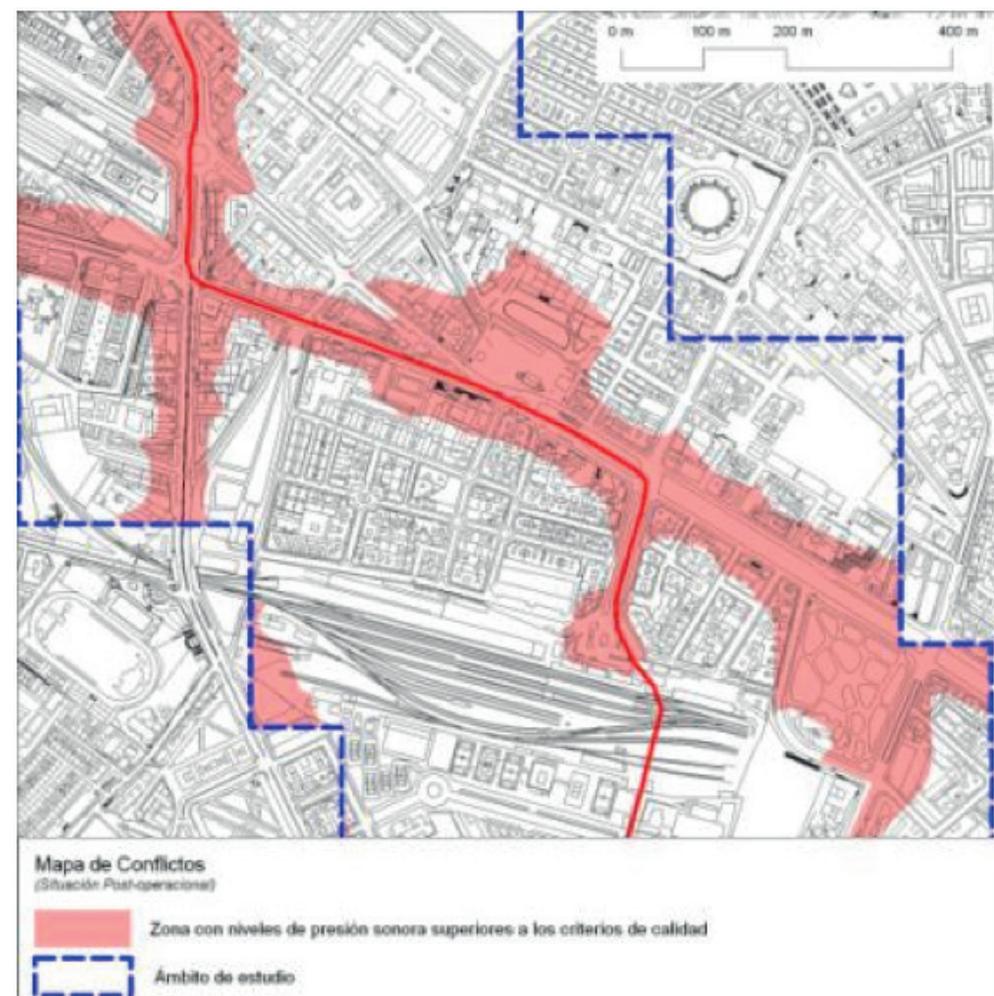


Figura 48. Mapa de conflictos de acuerdo con los criterios de calidad para la situación post-operacional (Ld).

Fuente: elaboración propia a partir del mapa de ruido del sistema de metro ligero de Granada y el Decreto 6/2012.

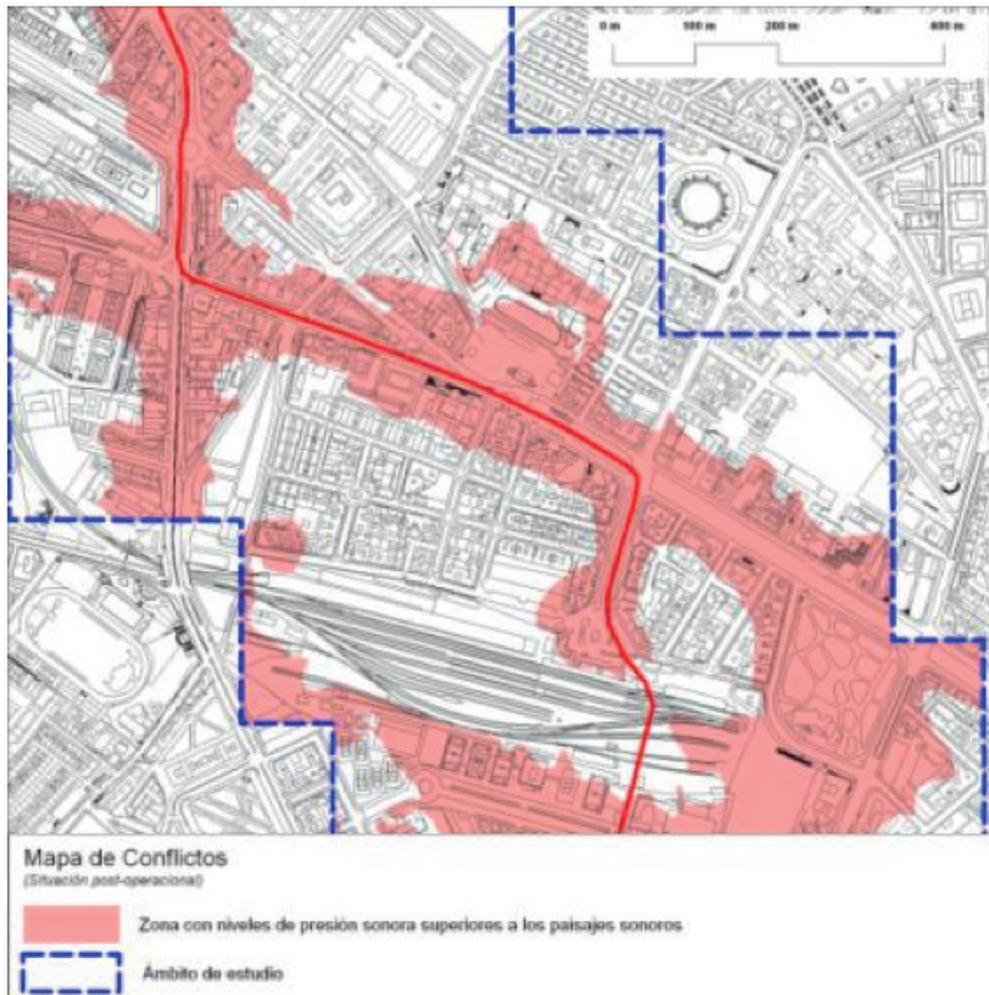


Figura 49. Mapa de conflictos de acuerdo con los paisajes sonoros para la situación pre-operacional (Ld).

Fuente: Elaboración propia.

	POBLACIÓN AFECTADA (Nº PERSONAS)	POBLACIÓN AFECTADA (%)	TOTAL ÁMBITO ESTUDIO (Nº PERSONAS)
Criterios de Calidad	7482	35,12	21305
Ambientes Sonoros	9650	44,62	21625

Tabla 28. Población afectada por niveles de ruido superiores a los criterios de calidad y los ambientes sonoros en la fase post-operacional.

Fuente: elaboración propia a partir de las figuras 27, 28 y el padrón municipal.

Una vez obtenidos los resultados de la evaluación de alternativas se dispondrá de información suficiente sobre qué ámbitos de la ciudad son los que van a recibir los mayores impactos, además de una estimación sobre el número de personas que se ven afectadas.

La principal ventaja de esta metodología es poder determinar las zonas prioritarias de intervención (mapas de conflictos), además de introducir nuevas variables perceptuales y sociales (paisaje sonoro) que permitirán intervenir para reducir el ruido e introducir nuevos aspectos relacionados con el confort sonoro.

► 4.4.4. FASE III: REDACCIÓN DEL PLAN DE ACCIÓN.

Evalrados los ambientes sonoros (**Paisaje Sonoro**) sólo queda elaborar un **Plan de Acción** donde se recojan las medidas y acciones propuestas para la eliminación y/o mitigación de los impactos acústicos producidos por cada una de las alternativas evaluadas. Del mismo modo se definirá el Paisaje Sonoro resultante tras la implantación del sistema de metro ligero y se recogerán las medidas necesarias para su correcta integración, así como para la protección, mejora y conservación de los ambientes sonoros.

El contenido que debe poseer un de Actuación se ha extraído de las directrices que marca la normativa europea (DIRECTIVA 2002/49/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental), en la cual se establecen las características y contenidos mínimos. La aportación o innovación de esta guía en relación con el Plan de acción consiste en añadir a esos contenidos mínimos los resultados obtenidos al incorporar el paisaje sonoro en el proceso de análisis y evaluación.

OBJETIVOS Y CARACTERÍSTICAS DEL PLAN DE ACTUACIÓN

El objetivo principal de un plan de acción en el contexto de los sistemas de transporte público es evitar y reducir el ruido, además de mejorar la situación de los ámbitos residenciales expuestos a niveles elevados y proteger zonas sensibles (hospitales, centros educativos, zonas de recreo, entornos naturales, etc.). Es decir, proteger la salud y el bienestar de los habitantes de las ciudades, mejorar la calidad de vida y la calidad de las viviendas e incrementar el atractivo de la ciudad, en definitiva, mejorar la integración ambiental en términos de acústica ambiental.

- El plan de acción establecerá prioridades y organizará la aplicación de las medidas previstas. Además, designará a los organismos responsables, establecerá los costes previstos de las medidas y los medios económicos que se deben utilizar para su aplicación. De acuerdo con todo lo anterior, en la elaboración del plan de acción se deberá:
- Realizar una evaluación cuantitativa y cualitativa de los resultados para identificar los conflictos –4.4.3 Fase II: Evaluación acústica de alternativas– y, en base a ellos, establecer prioridades.
- Implicar a todos los actores pertinentes en el proceso de evaluación.
- Los resultados del plan de acción deberán vincularse a otros planes y estrategias (Por ejemplo al Plan General de Ordenación Urbánística).
- Las soluciones adoptadas deberán ser tomadas en consenso por todas las partes implicadas –Véase *Guía de Participación Ciudadana*–.
- Poner en marcha las medidas con la ayuda de todas las partes.

CONTENIDO DE UN PLAN DE ACCIÓN

El contenido de un Plan de Acción está establecido por la **DIRECTIVA 2002/49/CE** sobre evaluación y gestión del ruido ambiental, de acuerdo al **Artículo 8.4.**, los planes de acción cumplirán los requisitos mínimos establecidos en el *Anexo V. Requisitos Mínimos de los Planes de Acción*, debiendo su estructura y contenido contener al menos:

- **Descripción del ámbito.** Descripción de los principales ejes viarios, ferroviarios o aeropuertos y otras fuentes de ruido, en los diferentes corredores que conforman cada una de las alternativas consideradas.
- **Autoridad responsable.** Autoridad responsable y competente para el desarrollo del correspondiente plan, así como el ámbito de aplicación y las administraciones implicadas en determinadas actuaciones zonales.
- **Normativa de referencia.** Establecimiento de la normativa (directivas, leyes, decretos, ordenanzas municipales, normas técnicas, etc.) de referencia para la definición de los valores límite (Criterios de Calidad).
- **Valores límite establecidos.** Determinación de los valores límite por ámbitos o zonas, establecidos en etapas previas.
- **Resumen de la recopilación y análisis de información y de los resultados de los posibles escenarios.**
- **Evaluación del número estimado de personas expuestas al ruido, determinación de los problemas y las situaciones que deben mejorar.**
- **Relación de las consultas públicas** organizadas con arreglo al apartado 7 del artículo 8 de la Directiva 2002/49/CE sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.
- **Medidas y Estrategias para la mitigación del Ruido Ambiental.**

ELABORACIÓN DE UN PLAN DE ACCIÓN

No existe una normativa de referencia donde se establezcan los pasos a seguir en la elaboración de un plan de acción. Ante esta situación se ha recurrido a la bibliografía especializada para ofrecer in-

formación al respecto. Como documento guía se propone recurrir al Manual profesional para la elaboración de planes de acción contra el ruido en el ámbito local (http://www.silence-ip.org/site/fileadmin/SP_J/E-learning/Planners/SILENCE_Handbook_ES_-_LR.pdf), en el cual es posible identificar varias etapas para la confección de este tipo de documentos.

ALGUNAS MEDIDAS PARA EL PLAN DE ACCIÓN

La revisión bibliográfica ha permitido recopilar una serie de medidas genéricas válidas para ser incorporadas en los planes de acción. Estas se clasifican, según su naturaleza, en tres categorías: **medidas legales, medidas de ingeniería y medidas de educación y formación** –Tablas 29 a 31–.

CATEGORÍA	MEDIDAS LEGALES
Control de las emisiones.	Elaboración de ordenanzas municipales para establecer los límites de emisión de: <ul style="list-style-type: none"> • Automóviles, motos y ciclomotores. • Equipos de construcción y usos en el exterior. • Plantas industriales.
Control de la transmisión del sonido.	Elaboración de normativa que obligue a establecer apantallamientos del ruido en actividades constructivas, nuevos viales, etc.
Cartografía y zonificación.	Programa de medida y modelización del ruido para, entre otros, las nuevas carreteras, viales, ferrocarriles y zonas industriales.
Control de inmisiones.	Limitación de los niveles de exposición: <ul style="list-style-type: none"> • Regulación de las situaciones complejas. Planes zonales. • Regulación de las actividades recreativas.
Restricciones al tráfico.	En Áreas Acústicas de tipo e) aplicar medidas de limitación de la velocidad o restricciones al tráfico.
Aplicación de normativas.	Elaboración de Planes de Acción preventivos y correctivos. Planes que deberán ser revisables cada 5 años.
Requerimientos acústicos mínimos a los edificios.	Código técnico para el aislamiento acústico de edificios.

Tabla 29. Medidas legales. Actuaciones para la legislación del ruido.

Fuente: elaboración propia a partir de Acústica Ambiental: análisis, legislación y soluciones.

CATEGORÍA	MEDIDAS DE INGENIERÍA
Reducción de emisiones por modificación de la fuente.	<ul style="list-style-type: none"> • Capas de rodadura silenciosas.
Aplicación de Mejoras Tecnológicas Disponibles (MTD's).	<ul style="list-style-type: none"> • Vehículos. • Material Ferroviario. • Maquinaria de construcción y uso en el exterior.
Reducción de la transmisión.	<ul style="list-style-type: none"> • Encapsulamiento de maquinaria. • Apantallamiento acústico.
Orientación de los edificios.	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño y estructuración para usos tranquilos. • Uso de edificios para apantallamiento acústico.
Gestión del tráfico rodado.	<ul style="list-style-type: none"> • Límites de velocidad. • Regulación por medios electrónicos.
Protección pasiva.	<ul style="list-style-type: none"> • Aislamiento de viviendas. • Diseño de fachadas.
Planificación territorial y urbanística.	<ul style="list-style-type: none"> • Zonificación acústica. • Separación de usos incompatibles. • Implantación de zonas de servidumbre acústica en el entorno de infraestructuras del transporte. • Corredores by-pass para el tráfico pesado. • Protección de áreas tranquilas.

Tabla 30. Medidas de Ingeniería. Actuaciones para la gestión del ruido.

Fuente: Elaboración propia a partir de Acústica Ambiental: análisis, legislación y soluciones.

CATEGORÍA	MEDIDAS DE EDUCACIÓN E INFORMACIÓN
Concienciación del público.	Información al público sobre: <ul style="list-style-type: none"> • Efectos del ruido sobre la salud. • Presentación de quejas. • Niveles de exposición al ruido. • Participación en los Planes de Acción.
Elaboración de mapas de exposición al ruido.	Publicación de los resultados.
Formación de expertos en evaluación y gestión del ruido.	Programas educativos en la Universidad y Escuelas.
Potenciar programas de investigación y desarrollo.	Generación de fondos de información sobre las necesidades de investigación científica.
Potenciar cambios de comportamiento.	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de la velocidad de conducción. • Uso de bocinas. • Usos de altavoces para la publicidad. • Uso de sirenas y alarmas.

Tabla 31. Medidas de educación e información. Actuaciones para la gestión del ruido.

Fuente acústica ambiental: análisis, legislación y soluciones.

4.5. INDICADORES ACÚSTICOS

Tras el estudio y análisis de los diferentes ambientes sonoros y la correspondiente redacción del plan de acción, solamente quedaría poner en marcha las medidas y acciones propuestas. Esta implantación debería ir acompañada de un sistema de indicadores que permita su monitorización, de manera que se obtenga información sobre la implantación de las medidas.

► 4.5.1. INDICADORES DE APLICACIÓN

Los indicadores recopilados proceden de la revisión de diversos documentos (Escobar, 2006, Fernández, 2011, Castro, 2004) y son simples, es decir, están asociados solamente a uno o dos datos para su cálculo. Estos versan sobre el número de personas afectadas, la superficie expuesta a niveles de presión sonora superiores a los criterios de calidad, % de calles de mayor tráfico o vías principales con niveles de presión sonora superiores a los establecidos en los criterios de calidad, control del número de actuaciones y del número de reclamaciones o denuncias –Tabla 32–.

INDICADOR	DEFINICIÓN	UNIDADES	TENDENCIA DESEABLE
INRU-1	Evalúa niveles sonoros en el intervalo temporal de T segundos	dBA	Disminuya
INRU-2	Número de personas con niveles de presión sonora superiores a los criterios de calidad	%	Disminuya
INRU-3	Superficie viaria con niveles de presión sonora superiores a los criterios de calidad.	%	Disminuya
INRU-4	Superficie con niveles de presión sonora superiores a los criterios de calidad	%	Disminuya
INRU-5	Número de medidas adoptadas para la reducción de la molestia por ruido	Nº	Aumente
INRU-6	Número de denuncia o reclamaciones por año/semestre/trimestre	Nº	Disminuya

Tabla 32. Resumen de los indicadores de ruido.

Fuente: elaboración propia.

NIVEL EQUIVALENTE DÍA-TARDE-NOCHE (LDEN)⁴

El primer índice y más práctico, en términos cuantitativos, es la medición del nivel de presión sonora en la situación previa a la puesta en marcha de una medida o iniciativa en comparación con su situación posterior. Para ello podrá recurrirse a este índice:

$$L_{den} = 10 * Lg \frac{1}{24} [12 * 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 * 10^{\frac{L_{evening+5}}{10}} + 8 * 10^{\frac{L_{night+10}}{10}}]$$

EXPOSICIÓN DE PERSONAS (INRU-2)

Porcentaje de personas expuestas (Castro, 2004) a niveles de ruido superiores a los criterios de calidad establecidos en la normativa para los distintos momentos del día (L_d , L_e y L_n). Indicador que puede aplicarse a diferentes ámbitos (ciudad, distrito, sección, barrio, etc).

INRU-1 = (Nº. Personas afectadas por niveles superiores a los criterios de calidad / Nº. Total de personas en el ámbito de referencia) x 100

VIALES (INRU-3)

Consiste en conocer los niveles acústicos de las calles de mayor tráfico o vías principales de la ciudad (Gómez-Orea, 2007). Será necesario conocer el nivel de ruido de la situación pre-operacional, para comparar como varía la superficie de vías que supera los criterios de calidad. El objetivo es dar seguimiento a la variación de los niveles de presión sonora en los viales donde se interviene.

⁴ DIRECTIVA 2002/49/CE sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.

INRU-2 = (Superficie viales con niveles superiores a los criterios de calidad / Superficie total viales) x 100

SUPERFICIE EXPUESTA AL RUIDO (INRU-4)

Al igual que en el indicador de viales se puede plantear la opción de calcular la superficie expuesta a niveles de ruido superiores a los establecidos en la normativa (Gómez-Orea, 2007). Nuevamente, habrá que contar con un nivel de presión sonora base para observar y calcular la variación.

INRU-3 = (Superficie en Ha de la zona con niveles superiores a los criterios de calidad / Superficie total de la zona) x 100

NÚMERO DE INICIATIVAS PARA EL CONTROL DE RUIDOS (INRU-5)

El propósito es dar seguimiento al número de iniciativas para el control de ruido puestas en marcha cada año (Castro, 2004).

INRU-4 = (Nº de medidas adoptadas para reducir las molestias por ruido)

Es posible esbozar el indicador por temática, de forma que se compare el % de iniciativas tomadas para cada una de las temáticas (cumplimiento de la normativa, reducción del ruido de tráfico, mejora de ambientes sonoros, etc.)

NÚMERO DE DENUNCIAS O RECLAMACIONES (INRU-5)

INRU-5 = (Nº de denuncias o reclamaciones / año)

El indicador podrá establecerse para diferentes ámbitos (distrito, sección, barrio o calle).

DENUNCIAS POR RUIDO (INRU-6)

La molestia provocada sobre la población residente puede estimarse en relación al número de denuncias o reclamaciones registradas. Este indicador, utilizado en otros estudios (Fernández, 2011, Castro, 2004), permitirá valorar la efectividad de las medidas adoptadas en relación con la molestia sobre las personas mediante la variación de denuncias o reclamaciones en periodos temporales (trimestre, semestre, año, etc.).

5 BIBLIOGRAFÍA

- Adams, M., Bruce, N., Davies, W., Cain, R., Jennings, P., Carlyle, A., Cusak, P., Hume, K. And Plack, C.** (2008). Soundwalking as methodology for understanding soundscapes. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, vol. 30, pt. 2.
- Adams, M., Davies, B. and Bruce, N.** (2009). Soundscapes: an urban planning process map. Inter-Noise, 23-26 August 2009. Ottawa, Canada.
- Ayuntamiento de Madrid** (1991). *El ruido en la ciudad. Gestión y Control*. Ed. Concejalía de Medio Ambiente- Sociedad Española de Acústica, Madrid.
- Banister** (2005). *Unsustainable transport: City transport in the new century*. London, Routledge.
- Banister, D.** (1996). Energy, quality of life and the environment: the role of transport. *Transport Reviews* 16(1), pp. 23-25.
- Bartí Domingo, R.** (2010). *Acústica Medioambiental*. Ed. Club Universitario.
- Bertolini, L. y Djist, M.** (2008). Urban planning in transition. *Transport policy*, 2, pp. 69-72.
- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K-H., Ekvall, T. and Finnveden, G.** (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, vol. 38, Issue 7, pp. 723-739.
- Carles, J.L. y Palmese, C.** (2004). Identidad sonora urbana. *Revista Digital: www.eumus.edu.uy/ps/txt. Escuela Universitaria de Música*. Universidad de Montevideo. Uruguay.
- Castro Bonaño, J.M.** (2004). *Indicadores de desarrollo sostenible urbano. Una aplicación para Andalucía*. Instituto de Estadística de Andalucía. Consejería de Economía y Hacienda.
- Commission of the European Communities. CEC** (1992). *The future Development of the common transport policy: a global approach to the cons-*

truction of a community framework for sustainable mobility. COM 92 (46). Bursseles. CEC.

- CONAMA 10** (2010). Planes locales de acción contra el ruido. (www.conama10.es)
- Consejería de Medio Ambiente** (1997). *El medio ambiente urbano en Andalucía*. Junta de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente.
- Consortio de Transportes de Bizkaia CTB** (2009). Plan de Acción en Materia de Contaminación Acústica Acorde con el R.D. 1513/2005.
- Corral, C.** (1992). Tratamiento viario y transporte en los cascos históricos. El plan especial de la ciudad antigua de León. *Revista Ciudad y Territorio*, 91-92, pp. 109-117.
- Cos Juez, F.J.; Ordieres Meré, J.; Castejón Limas, M. y Martínez de Pisón, J.** (2001). *Sonometría y contaminación acústica*. Universidad de la Rioja. Servicio de Publicaciones.
- Crespo, M.** (1995). Dificultades mutuas del planeamiento urbanístico y sectorial. *Revista Ciudad y Territorio*, 91-92, pp. 11-19.
- De Borger, B., Kertens, K. y Costa, A.** (2002). Public transit performance: What does one learn from frontier studies?. *Journal of Transport Reviews*, 22(1), pp. 1-38.
- De Coensel, B. And Botteldooren, D.** (2007). Models for soundscape perception and their use in planning. Inter-Noise, 28-31 August 2007. Istanbul, Turkey.
- De Ruiter, E.** (2004). Reclaiming land from urban traffic noise impact zones-the great canyon. Tesis doctoral. Technical University of Delft, Holanda.

- Deakin, M., Mitchell, G. y Nijkamp, P.** (2007). *Sustainable urban development. The environmental assessment methods*. Taylor and Francis. New York, USA.
- Den Boer, L.C. and Schroten, A.** (2007). *Traffic noise reduction in Europe. Health effects, social costs and technical and policy options to reduce road and rail traffic noise*. CE, Delft. Publication code: 07.4451.27.
- Dupuy, G.** (1999). *La dépendance automobile: symtômes, analyses, diagnostic, traitements*. Paris. Anthropos.
- Escobar, L.** (2006). Indicadores sintéticos de calidad ambiental: un modelo general para grades zonas urbanas. *Revista Eure Vol. XXXII, nº 96*. pp. 73-98.
- Espelt, P.; Miro, J.** (2008). Ordenación de la calle en los planes de movilidad urbana a partir de criterios de capacidad ambiental: aplicación a una ciudad mediana y una ciudad pequeña de Cataluña. A: Congreso de Urbanismo y Ordenación del Territorio. "I Congreso de Urbanismo y Ordenación del Territorio. ¿ciudad y territorio?". Bilbao: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, p. 1-30.
- Estevadordal, J., Parés, J. y Ruano, J.** (2002). Plan de actuación para el desarrollo de áreas de movilidad ambiental: ejemplo de la ciudad de Amposta, Tarragona. III Conferencia Internacional Walk 21: Pasos hacia la ciudad del peatón. San Sebastián, 8-11 mayo de 2002.
- European Environment Agency. EEA.** (2009). *Transport at a crossroads. TERM 2008: indicators tracking transport and environment in the European Union*. Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities (EEA report, no. 3/2009)
- Fariña, J. y Naredo, J.M.** (2010). *Libro blanco de la sostenibilidad en el planeamiento urbanístico español*. Ministerio de Vivienda. Gobierno de España.

- Fernández Gutiérrez, F.** (2011). Estudio general de la contaminación acústica en las ciudades de Andalucía. *Cuadernos Geográficos, 49(2)*, pp. 55-93.
- García Rodríguez, A.; Sanz Sa, J.M.; Segués Echazarreta, F. y Perera Melero, P.** (2009). *Acústica Ambiental: análisis, legislación y soluciones*. Ed. Sociedad Española de Acústica.
- Ge, J., Lu, J., Morotomi, K. and Hokao, K.** (2009). Developing Soundscape-graphy for the notation of urban soundscape: Its concept, method, analysis and application. *Acta Acustica United with Acustica 95*, pp. 65-75.
- Gómez-Orea, D.** (1999). *Evaluación de impacto ambiental: un instrumento para la gestión ambiental*. Mundi Prensa. Madrid.
- Gómez-Orea, D.** (2007). *Ordenación territorial*. Mundi-Prensa Libros.
- Hayashi, F.** (1999). An attempt on urban soundscapegraphy – a case study of Himeji City (in Japanese). *Soundscape 1*, pp. 89–98.
- Herce, M.** (2009). *Sobre la movilidad en la ciudad*. Editorial Reverte. Barcelona.
- Herce, M., Magrinyà, F. y Miró, J.** (2007). *L'espai urbà de la mobilitat*. Ediciones UPC. Universitat Politècnica de Catalunya.
- INE** (2001). *Censo de Población y Vivienda (2001)*. Instituto Nacional de Estadística.
- INFRAS** (2000). *External costs of transport*. INFRAS-IWW.
- Jacobs, A.B., Rofé, Y.Y. y Mcdonald, E.** (1997). *Guidelines for the design of multiple roadway boulevards*. Institute of Urban and Regional Development. University of Berkeley. CA 94720.
- Junta de Andalucía** (2001). *Bases para un Sistema de Indicadores de Medio Ambiente Urbano en Andalucía. Experiencias internacionales en la medición de la sostenibilidad en las ciudades*. Consejería de Medio Ambiente.

- Junta de Andalucía** (2010). *Mapa de tráfico, provincia de Granada. Plan de aforos de la red principal de carreteras de Andalucía 2010*. Consejería de Obras Públicas y Vivienda. Dirección General de Carreteras.
- Kang, J.** (2007). *Urban sound environment*. Ed. Taylor & Francis. New York (USA).
- Kang, J. And Zhang, M.** (2010). Semantic differential analysis of the soundscape in urban open public spaces. *Building and environment* 45, pp 150-157.
- López Barrio, I.** (2001). El significado del medio ambiente sonoro en el entorno urbano. *Estudios Geográficos, LXII, 244*, pp. 447-466.
- López Barrio, I. y Domingo Guillén, R.** (2005). Calidad acústica urbana: influencia de las interacciones audiovisuales en la valoración del ambiente sonoro. *Medio Ambiente y Comportamiento Humano* 6(1), pp. 101-107. Ed. Resma.
- Machón, L.F. y Santamera, J.R.** (1995). *Recomendaciones para el proyecto y diseño del viario urbano*. Monografías. Dirección General de Urbanismo, Vivienda y Arquitectura.
- Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., van Essen, H.P., Boon, B.H., Smoker, R., Schroten, A., Doll, C., Pawlowska, B. y Bak, M.** (2008). Internalisation measures and policies for all external cost of transport (IMPACT), Handbook on estimation of external costs in the transport sector, Version 1.1 Report Delft.
- May, A.D., Tight, M.R.** (2006). Innovation and integration in urban transport policy. *Transport Policy*, 13, pp. 157-164.
- Miralles, C. y Cebollada, A.** (2003). *Movilidad y transporte. Opciones políticas para la ciudad*. Universidad Autónoma de Barcelona. Servicio de Publicaciones.

- Moreno Jiménez, A. y Martínez Suárez, P.** (2005). El ruido ambiental urbano en Madrid. Caracterización y evaluación cuantitativa de la población potencialmente afectable. *Boletín de la A.G.E.*, 40, pp. 153-179.
- Naess, P.** (2006). *Urban structure matters. Residential location, car dependence and travel behaviour*. The RTPI Library Series. Routledge.
- Newman, P. y Kenworthy, J.** (1999). *Sustainability and cities. Overcoming automobile dependence*. Island Press, Washington, D.C. Covelo, California.
- Nijkamp, P.** (2004). *Transport system and policy*. Edward Elgar Publishing. Massachusetts, USA.
- Nijland, H. A. & Van Wee, G. P.** (2005). Traffic Noise in Europe: A Comparison of Calculation Methods, Noise Indices and Noise Standards for Road and Railroad Traffic in Europe. *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, 25:5, pp. 591-612.
- Otaola, P.** (1992). Una política para recuperar el centro de las ciudades (El caso de San Sebastian). *Revista Ciudad y Territorio*, 91-92, pp. 87-108.
- Owens, S.** (1995). From predict and provide to predict and prevent?: pricing and planning in transport policy. *Transport Policy*, 2(1), pp. 43-49.
- Pijanowski, B.C., Farina, A., Stuart, H.G., Dumyahn, S.L. and Krause, B.L.** (2011). What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecol*, 26, pp. 1213-1232.
- Pozueta, J.** (1992). Planificación urbanística y transporte. Diseño de carreteras en áreas urbanas. *Revista Ciudad y Territorio*, 91-92, pp. 51-66.
- Pozueta, J.** (2000). *Movilidad y planeamiento sostenible: hacia una consideración inteligente del transporte y la movilidad en el planeamiento y en el diseño urbano*. Cuadernos de Investigación Urbanística, 30, Instituto Juan de Herrera. Madrid.

- Pozueta, J., Lamíquiz, F.J., Porto, M.** (2009). *La ciudad paseable. Recomendaciones para la consideración de los peatones en el planeamiento, el diseño urbano y la arquitectura*. CEDEX. Ministerio de Fomento. Madrid.
- Puig-Pley, P.** (1992). Carreteras en medio urbano. *Revista Ciudad y Territorio*, 91-92, pp. 67-74.
- Raimbault, M. and Dubois, D.** (2005). Urban soundscapes: Experiences and knowledge. *Cities*, Vol 22, No. 5, pp. 339-350.
- Rejano de la Rosa, M.** (2000). *Ruido Industrial y Urbano*. Ed. Paraninfo.
- Romero Ibañez, A.** (2010). Estudio de la Reducción del Ruido Aerodinámico de Trenes de Alta Velocidad con Pantallas Acústicas (Tesis doctoral). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria.
- Rubio, J.** (1992). Las carreteras urbanas. Un plan estatal de infraestructuras y transporte. *Revista Ciudad y Territorio*, 91-92, pp. 45-50.
- Ruiz, D., Valenzuela, L.M. y Navarro, M.L.** (2010). *El metropolitano de Granada como instrumento de innovación, calidad y sostenibilidad urbana*. Tomo III: Eficiencia y calidad ambiental. Informe final del convenio de investigación realizado entre la Universidad de Granada y la empresa pública Ferrocarriles de Andalucía.
- Santos, L. y De las Rivas, J.L.** (2008). Ciudades con atributos: conectividad, accesibilidad y movilidad. *Revista de Ciudades*, 8, pp. 13-32.
- Schafer, R. M.** (1977). *The Tuning of the World*. Nueva York: Knopf, publicado nuevamente en 1994 como *The Soundscape*, Destiny books, Rochester, Vermont.
- Schwanen, T. Disjt, M. y Dieleman, M.** (2004). Policies for urban form and their impact on travel: The Netherlands Experience. *Urban Studies*, 41(3), pp. 579-600.

- Segués, F.** *Conceptos básicos del ruido ambiental*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – CEDEX. España. (<http://sicaweb.cedex.es/docs/documentos/Conceptos-Basicos-del-ruido-ambiental.pdf>)
- Soria, A.** (1980). ¿A qué se llama transporte?. *Ciudad y Territorio*, 2, pp. 19-32.
- Soria, J.A.** (2011). *Modelo de umbrales para la evaluación ambiental de la movilidad urbana*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- Soria-Lara, J.A. y Valenzuela-Montes, L.M.** (2014). Diseño de un sistema de evaluación del rendimiento ambiental en corredores de movilidad urbana. *Revista Arquitectura, Ciudad y Ambiente*, nº 25
- Thompson D.** (2009). *Railway noise and vibration. Mechanisms, modelling and means of control*. Elsevier.
- Torija, A.J.** (2010). *Modelización y predicción de la estructura temporal y espectral del nivel de presión sonora como herramienta para la gestión de paisajes sonoros urbanos*. (Tesis doctoral). Universidad de Granada.
- Torija, A.J.; Ruiz, D.P.; Alba-Fernández, V. and Ramos-Ridao, A.** (2012). Noticed sound events management as a tool for inclusion in the action plans against noise in medium-sized cities. *Landscape and Urban Planning* 104. pp. 148-156.
- Wrightson, K.** (2004). Una Introducción a la Ecología Acústica. *Revista Digital: www.eumus.edu.uy/ps/txt*. Escuela Universitaria de Música. Universidad de Montevideo. Uruguay.
- Zamorano Martín, C.; Bigas Serrallonga, J.M. y Sastre González, J.** (2006). *Manual de tranvías, metros ligeros y sistemas en plataforma reservada: diseño, proyecto, financiación e implantación*. Ed. Consorcio Reginal de Transportes de Madrid-Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

6
ÍNDICE DE FIGURAS
Y TABLAS

FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de jerarquización del viario en el Plan de Movilidad Urbana Sostenible de Figueras.	54
Figura 2. Tramos de metro ligeros con diferentes grados de ocupación no motorizada (Sheffield).	56
Figura 2. Tramos de metro ligeros con diferentes grados de ocupación no motorizada (Turín).	57
Figura 2. Tramos de metro ligeros con diferentes grados de ocupación no motorizada (Dublín).	57
Figura 3. Zonas funcionales en los espacios del peatón.	58
Figura 4. Sección 5 de la Tabla 12.	60
Figura 5. Sección 6 de la Tabla 12.	60
Figura 6. Superficie para movilidad no motorizada en la Avenida América sin Metro Ligero.	61
Figura 7. Superficie para movilidad no motorizada en la Avenida América con Metro Ligero.	62
Figura 8. Configuración de la sección viaria sin metro ligero.	63
Figura 9. Configuración de la sección viaria con metro ligero.	63
Figura 10. Tramo del metro ligero de Burdeos con bajo efecto barrera.	65
Figura 11. Tramo del metro ligero de Burdeos con alto efecto barrera.	65

Figura 12. Eficiencia superficial de la movilidad (en viajeros-día/m ²) por tramo del trazado de la línea 1 del Metro Ligero de Granada, comparando los escenarios actual (sin metro) y metropolitano (con metro).	67
Figura 13. Variación porcentual por tramo de la superficie viaria ocupada por modos de transporte públicos y privados, tras la implantación de la línea 1 de Metro Ligero de Granada.	68
Figura 14. Variación porcentual de la eficiencia superficial por tramo, tras la implantación de la línea 1 de Metro Ligero de Granada.	69
Figura 15. Índice Agregado de Calidad del Aire por tramo del trazado de la línea 1 del Metro Ligero de Granada, comparando los escenarios actual (sin metro) y metropolitano (con metro).	88
Figura 16. Variación del Índice Agregado de Calidad del Aire por tramo, tras la implantación de la línea 1 de Metro Ligero de Granada.	89
Figura 17. Índice de Precursores de Ozono Troposférico por tramo del trazado de la línea 1 del Metro Ligero de Granada, comparando los escenarios actual (sin metro) y metropolitano (con metro).	91
Figura 18. Nivel de reducción en los niveles de inmisión viarios inmediatos para los distintos contaminantes contemplados en la evaluación.	91
Figura 19. Variación del Índice de Precursores de Ozono Troposférico por tramo, tras la implantación de la línea 1 de Metro Ligero de Granada.	92
Figura 20. Consumo energético local (en MW) por tramo del trazado de la línea 1 del Metro Ligero de Granada, comparando los escenarios actual (sin metro) y metropolitano (con metro).	94

Figura 21. Consumo energético global (en MW) por tramo del trazado de la línea 1 del Metro Ligero de Granada, comparando los escenarios actual (sin metro) y metropolitano (con metro).	94
Figura 22. Variación porcentual del consumo energético local por tramo, tras la implantación de la línea 1 de Metro Ligero de Granada.	95
Figura 23. Variación porcentual del consumo energético global por tramo, tras la implantación de la línea 1 de Metro Ligero de Granada.	96
Figura 24. Tasa global de emisiones de CO2 (en kT/año) por tramo de trazado de la línea 1 del Metro Ligero de Granada, comparando los escenarios actual (sin metro) y metropolitano (con metro).	98
Figura 25. Variación porcentual de la tasa global de emisiones de CO2 por tramo, tras la implantación de la línea 1 de Metro Ligero de Granada.	99
Figura 26. Eficiencia energética (en viajeros-km/MJ) por tramo del trazado de la línea 1 del Metro Ligero de Granada, comparando los escenarios actual (sin metro) y metropolitano (con metro).	101
Figura 27. Variación porcentual de la eficiencia energética por tramo, tras la implantación de la línea 1 de Metro Ligero de Granada.	102
Figura 28. Factores de la generación del ruido de tráfico.	108
Figura 29. Plan de aforos de la red principal de carreteras de Andalucía.	110
Figura 30. Calle en L.	113
Figura 31. Calle en U.	113
Figura 32. Tipos de ruidos y vibraciones transmitidas por los sistemas ferroviarios.	122

Fuente: elaboración propia a partir de Bartí (2010) y Thompson (2009).	122
Figura 33. Esquema de interacción entre el individuo y su entorno sonoro.	130
Figura 34. Composición de un Paisaje Sonoro.	132
Figura 35. Caracterización de los Ambientes Sonoros.	134
Figura 36. Etapas en la elaboración de la metodología.	140
Figura 37. Secuencia metodológica para la integración acústica.	141
Figura 38. Mapa Acústico.	145
Figura 39. Usos del suelo.	146
Figura 40. Ortofoto, hoja 1009_3-4.	147
Figura 41. Propuesta de Paisajes Sonoros para el ámbito de estudio.	149
Figura 42. Tipos de sectores del territorio según el Decreto 6/2012.	153
Figura 43. Tipos de Zonas Acústicas según criterios del R.D. 1367/2007.	154
Figura 44. Nivel de presión sonora pre-operacional (Ld).	158
Figura 45. Mapa de conflictos de acuerdo con los criterios de calidad para la situación pre-operacional (Ld).	159
Figura 46. Mapa de conflictos de acuerdo con los paisajes sonoros para la situación pre-operacional (Ld).	160
Figura 47. Nivel de presión sonora post-operacional (Ld).	162

Figura 48. Mapa de conflictos de acuerdo con los criterios de calidad para la situación post-operacional (Ld).

163

Figura 49. Mapa de conflictos de acuerdo con los paisajes sonoros para la situación pre-operacional (Ld).

164

TABLAS

Tabla 1. Vehículos motorizados por cada 1.000 hab.	30
Tabla 2. Las dimensiones de los costes de la movilidad.	31
Tabla 3. Comparativa de enfoques de planificación de la movilidad.	34
Tabla 4. Sistemas de evaluación del rendimiento vs sistemas de monitorización.	39
Tabla 5. The EU Transport Sustainability Indicators.	39
Tabla 6. Transport and Environment Reporting Mechanism	41
Tabla 7. "Umbrales ambientales" con regulación normativa vs "Umbrales ambientales" sin regulación normativa.	43
Tabla 8. Jerarquización del viario según intensidades de tráfico.	53
Tabla 9. Anchuras mínimas de cada área funcional para la superficie viaria no motorizada.	59
Tabla 10. Secciones viarias de referencia (con una longitud de 606,3 m) con reparto modal óptimo.	59
Tabla 11. Valores hipotéticos para el cálculo del efecto barrera.	64
Tabla 12. Factores de emisiones directas: datos de base y medias ponderadas por los coeficientes de distribución.	76
Tabla 13. Factores de emisiones indirectas: datos de base y medias ponderadas por los coeficientes de distribución.	77

Tabla 14. Factores de emisiones indirectas por producción de energía: datos de base y medias ponderadas por los coeficientes de distribución.	77
Tabla 15. Factores de energía primaria y secundaria, retorno de energía, distribución y ocupación media: datos de base y medias ponderadas por los coeficientes de distribución.	79
Tabla 16. Valores límite empleados en el cálculo IACA.	87
Tabla 17. Valores medios de fondo urbano empleados en el cálculo del IACA, estimados a partir de la estación de medida de los Paseos Universitarios.	88
Tabla 18. Corrección meteorológica.	112
Tabla 19. Reducción del ruido según velocidad.	114
Tabla 20. Procedimiento de corrección recomendado.	117
Tabla 21. Rendimiento acústico de los asfaltos porosos.	117
Tabla 22. Modelo de la generación del ruido y la vibración de rodadura.	123
Tabla 23. Categorías de trenes para el modelo RMR.	126
Tabla 24. Orientación para la caracterización y clasificación de los paisajes sonoros. Fuente: Elaboración propia a partir de Torija (2008), Ge et al (2009) y Kang (2010)	139
Tabla 25. Objetivos de la calidad acústica para ruido aplicables a áreas urbanizadas existentes.	150

Tabla 26. Objetivos de calidad acústica para ruido aplicables a las nuevas áreas urbanizadas. Fuente: R.D. 6/2012, Reglamento contra la Contaminación Acústica en Andalucía.	151
Tabla 27. Población afectada por niveles superiores a los criterios de calidad y los ambientes sonoros en la fase pre-operacional.	160
Tabla 28. Población afectada por niveles de ruido superiores a los criterios de calidad y los ambientes sonoros en la fase post-operacional.	164
Tabla 29. Medidas legales. Actuaciones para la legislación del ruido.	168
Tabla 30. Medidas de Ingeniería. Actuaciones para la gestión del ruido.	169
Tabla 31. Medidas de educación e información. Actuaciones para la gestión del ruido.	169
Tabla 32. Resumen de los indicadores de ruido.	170

