

UNIVERSIDAD DE GRANADA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



Programa de Doctorado: Seguridad, Calidad y Optimización de
Recursos en Infraestructuras y su Relación Medioambiental

TESIS DOCTORAL

**Desarrollo de una metodología de toma de decisiones
para el establecimiento de prioridades de actuación
contra el ruido de tráfico en carreteras**

Alejandro Ruiz Padillo

GRANADA, 2014

Editorial: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Alejandro Ruiz Padillo
ISBN: 978-84-9125-087-6
URI: <http://hdl.handle.net/10481/40108>

UNIVERSIDAD DE GRANADA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



UGR



Ingeniería Civil
Universidad de Granada

Tesis Doctoral presentada por Alejandro Ruiz Padillo para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Granada con mención de Doctorado Internacional.

Desarrollo de una metodología de toma de decisiones para el establecimiento de prioridades de actuación contra el ruido de tráfico en carreteras.

Development of a decision-making methodology for classification by priority for action against road traffic noise.

Directores de Tesis:

Dr. Diego Pablo Ruiz Padillo

Dr. Antonio José Torija Martínez

UNIVERSIDAD DE GRANADA

El doctorando Alejandro Ruiz Padillo y los directores de la tesis Diego Pablo Ruiz Padillo y Antonio José Torija Martínez garantizamos, al firmar esta tesis doctoral, titulada «Desarrollo de una metodología de toma de decisiones para el establecimiento de prioridades de actuación contra el ruido de tráfico en carreteras», que el trabajo ha sido realizado por el doctorando bajo la dirección de los directores de la tesis y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores a ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

Granada, diciembre de 2014.

Los Directores de Tesis,

Fdo. D. Diego Pablo Ruiz Padillo, Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad de Granada y Profesor Titular del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada.

Fdo. D. Antonio José Torija Martínez, Doctor por la Universidad de Granada e Investigador Postdoctoral Marie Curie en el Institute of Sound and Vibration Research (ISVR) de la Universidad de Southampton (Reino Unido).

El doctorando,

Fdo. Alejandro Ruiz Padillo
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Esta Tesis Doctoral ha sido financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad de España a través del proyecto TEC2012-38883-C02-02.

AGRADECIMIENTOS.

Largo ha sido el camino que ahora llega a su culminación y, por tanto, muchas son las personas a las que debo agradecer por su colaboración y ayuda, sin las cuales no hubiera sido posible de ninguna manera conseguir el objetivo marcado. Por todo ello y por todos ellos en primer lugar doy las gracias fundamentalmente a Dios, que me ha permitido alcanzar la meta que tantas veces veía difícil y alejada de lograr.

Por supuesto, debo un agradecimiento especial a Diego y Antonio, mis directores de tesis, por sus orientaciones, consejos e inestimables correcciones acerca de la investigación, la redacción de la tesis y la consecución de la producción científica. Y gracias concretamente a Diego por todo su auxilio en tantos aspectos desde el inicio de mi carrera universitaria hasta el día de hoy que no sería capaz de poner por escrito.

Gracias personalmente también para Ángel, cuya ayuda ha sido tan importante en este proceso, así como su apoyo en todas las cuestiones que le he planteado en estos años.

No quiero dejarme atrás a Jorge, profesor al que siempre estaré sinceramente agradecido por su orientación durante el proyecto fin de carrera y los inicios de este posgrado y los cursos de doctorado, aunque finalmente todo fuera por otros derroteros.

Mi agradecimiento también para mis compañeros del Servicio en Almería y de la Dirección General, por su colaboración en cuantas dudas y peticiones les he trasladado, así por el acceso a muchos de los datos empleados en la investigación. Gracias concretamente a Guillermo por sustituirme durante mi estancia, solo gracias a su buena voluntad y enorme profesionalidad pude ausentarme del trabajo ese tiempo y que casi ni se notara. Y, por supuesto, a Pepe, por su inestimable ayuda con el diseño y cálculos por ordenador, sin él para mí hubiera sido muy difícil.

Gracias también a todos los expertos cuyos datos anónimos han sido procesados en la presente investigación, pero que para mí todos tienen sus nombres y apellidos y soy consciente de que pusieron a mi disposición desinteresadamente su escaso y preciado tiempo.

Muito obrigado às professoras Ana e Carla e ao professor Paulo em Porto Alegre, obrigado pelas suas orientações e, sobre tudo, pela sua acolhida na UFRGS. Obrigado também aos meus colegas do laboratório no Instituto de Informática, Gabriel, Jorge, Ricardo e Marcelo, pela sua amizade e ajuda em tudo o que precisei durante o doutorado sanduíche. Nunca esquecerei esse tempo com vocês!

Por supuesto, quiero dar las gracias a mis padres, que me han facilitado acceder a la mejor formación y me han ayudado en todo lo he necesitado siempre. Gracias también a ellos, a Raúl, a Belén y a Mercedes por su comprensión y apoyo en este proceso y en todos los aspectos que han podido colaborar. Y a mis amigos y amigas, por su ánimo y entender mi dedicación.

Y... gracias a Carla. No hay palabras suficientes para expresarle mi gratitud por su constante ánimo y consejo, por su imprescindible ayuda no solo durante mi estancia sino en todo lo relacionado y no relacionado con esta tesis desde hace casi ocho años. Ella sabe que una parte muy importante de este trabajo es suyo y todo él va a ella dedicado. ¡¡Gracias!!

RESUMEN.

La evolución histórica, técnica y socioeconómica de las carreteras en los últimos años, particularmente en España, han hecho que el ruido generado por el tráfico que circula por ellas cobre especial importancia en el conjunto de impactos medioambientales de las mismas, problema que debe ser abordado técnicamente desde una visión eficiente.

La Directiva Europea de Ruido Ambiental 2002/49/CE y sus trasposiciones a la legislación nacional y autonómica, en su aplicación directa sobre los efectos nocivos de la exposición al ruido ambiental procedente del tráfico de las carreteras, requieren que las autoridades competentes elaboren mapas estratégicos de ruido de los ejes viarios así como los correspondientes planes de acción donde los niveles superen los objetivos de calidad acústica establecidos.

Sin embargo, no existe en la citada normativa ni en la bibliografía especializada al respecto un proceso reglado que establezca prioridades de actuación en dichos Planes de Acción contra el Ruido, por lo que la presente tesis doctoral desarrolla una metodología que, por un lado, define un índice ponderado y normalizado que permite ordenar por prioridad de actuación los tramos del Plan y, por otro, propone un análisis multicriterio para la elección de las alternativas idóneas contra el ruido en cada uno de esos tramos.

Para todo ello, se han estudiado las principales características de los parámetros que intervienen en la generación, propagación y atenuación del ruido debido al tráfico rodado, así como las técnicas de mitigación del mismo en sus diferentes tipos y principios de actuación, analizando la relación entre ellos y seleccionando los más influyentes en los problemas de toma de decisiones citados. Dada la capital importancia de los pesos asignados a estas variables y criterios, han sido determinados de manera satisfactoria a partir de la aplicación de la técnica de las jerarquías analíticas difusas sobre los resultados obtenidos de los cuestionarios planteados en sendos paneles de expertos elaborados al respecto.

Finalmente, se ha llevado a cabo una aplicación práctica de la metodología desarrollada a la revisión del Plan de Acción contra el Ruido de las carreteras autonómicas de la provincia de Almería (España) para comprobar su adaptabilidad a casos reales.

Esta información se desarrolla en la presente Memoria de Tesis Doctoral, que se estructura en siete capítulos, ordenados según un proceso lógico de desarrollo en función de los objetivos de la investigación:

- El Capítulo 1, «Introducción y planteamiento del problema», constituye un acercamiento a las carreteras como infraestructura viaria que luego será analizada como fuente de ruido, así como se expone la normativa sectorial relacionada y las herramientas novedosas introducidas por la misma (Mapas Estratégicos de Ruido y Planes de Acción contra el Ruido).
- Seguidamente, en el Capítulo 2, «Herramientas y marco de trabajo», se presenta el lenguaje computacional que va a servir de apoyo al desarrollo de la metodología, la lógica difusa y su particular modelado lingüístico, así como la herramienta fundamental en la que se basará el sistema de toma de decisiones perseguido, el análisis multicriterio, pormenorizando los detalles de los métodos aplicados en la tesis: jerarquías analíticas, suma ponderada, ELECTRE y TOPSIS. Igualmente se estudia la técnica del panel de expertos como tipo concreto de encuesta estadística utilizada en la investigación para el proceso de obtención de datos.
- El Capítulo 3 se centra en la justificación y objetivos de la investigación y presenta el plan de trabajo seguido en el desarrollo de la tesis.
- Los dos capítulos siguientes albergan los resultados de la investigación y la discusión de sus aportaciones al conocimiento, es decir, propiamente la metodología de toma de decisiones desarrollada, que se presenta fraccionada en sus dos fases. De este modo, el Capítulo 4 acomete el método para la asignación de prioridades de actuación a los tramos de carretera de un Plan de Acción contra el Ruido y en el Capítulo 5 se culmina la metodología con el análisis multicriterio para la elección de las soluciones idóneas de un Plan de Acción contra el Ruido en carreteras (en aquellos tramos previamente seleccionados), incluyendo una especial revisión bibliográfica de las técnicas de atenuación que ofrece actualmente la ingeniería para el ruido debido al tráfico.
- El Capítulo 6 presenta la aplicación a los casos de estudio seleccionados y la discusión de los resultados obtenidos.
- El Capítulo 7 recoge las conclusiones de la tesis y cita las líneas futuras de investigación que se abren a partir de ella.

Finalmente, la Memoria incluye las referencias y la bibliografía de apoyo para el desarrollo de esta tesis doctoral y dos apéndices que recogen los modelos de encuestas empleados en los paneles de expertos.

Palabras clave: ruido de carreteras, directiva de ruido ambiental, planes de acción contra el ruido, mapas de ruido, toma de decisiones, análisis multicriterio, técnica de las jerarquías analíticas difusa.

ABSTRACT.

The historical, technical and socioeconomic evolution of roads in recent years, especially in Spain, is the main reason why road traffic noise becomes of outstanding importance within the overall environmental impacts. So, this problem must be technically addressed from an efficient and rigorous point of view.

The Environmental Noise Directive (2002/49/EC) and its transpositions to the national and regional legislation in its application to the evaluation and control of the harmful effects derived from environmental road traffic noise exposure, required competent authorities to draw up strategic noise maps of the all major roads, with the objective of developing Action Plans in those areas where noise levels are higher than the established noise quality standards.

However, there is not a regulated process for both to look for or to set up for action in the corresponding action plans against noise (named Noise Action Plans), either in such legislations or in the scientific literature. So, this doctoral research focuses in this subject and it develops a new methodology which, firstly, defines a normalized weighted index that sorts by priority for actions in the different sections of the Action Plan and, secondly, it contains a multicriteria analysis for the choice of the most appropriate alternatives against noise for each section.

To accomplish this, we have studied the main characteristics of the parameters involved in the generation, propagation and attenuation of noise due to traffic, as well as the techniques of noise mitigation, analysing the relationships between them, and then selecting the most influential parameters for the decision-making problems. Due to the paramount importance of the weightings assigned to each variable and criterion, an especial care has been taken on assign them, and they have been successfully defined by applying the fuzzy analytic hierarchy process to the results obtained from suitable questionnaires through two expert panels.

Finally, a practical implementation of the proposed methodology was carried out to a revision of the Noise Action Plan for the road network of the regional government of Andalusia in the province of Almería (Spain) to test its adaptability and reliability to actual cases.

This information will be developed in the present Doctoral Thesis Dissertation, which is divided into seven chapters, arranged according to a logical process of development on the basis of the objectives of the research:

- Chapter 1, “Introduction and approach to the problem”, constitutes an approach to the roads as an infrastructure which will then be analyzed as a source of noise. It also contains the sectoral legal framework and the related tools introduced by the regulations (Strategic Noise Maps and Noise Action Plans).
- Then, in Chapter 2, “Tools and framework”, it is presented the mathematical and computational language that is going to support the development of the methodology, the fuzzy logic, and its precise linguistic modeling, as well as the fundamental tool in which the desired decision-making system is based, i.e., the multicriteria analysis, spelling out the details of the methods used in this PhD Thesis: Analytical Hierarchy Process, weighted sum, ELECTRE and TOPSIS. It is also studied and applied the technique of Expert Panels as a specific type of statistical survey used in the research for data collection.
- Chapter 3 focuses on the rationale and objectives of the research and it presents the work plan accomplished in the development of the research.
- The following two chapters (Chapter 4 and 5) contain the results of the research and a discussion of the contributions to the scientific knowledge, i.e., the actual decision making methodology developed, which is presented divided in its two phases. So, Chapter 4 is involved in the method for the allocation and selection of priorities for action at the stretches of road in a specific Noise Action Plan, and Chapter 5 concludes the proposed methodology with a multicriteria analysis for the choice of the best solutions for a Noise Action Plan in roads (in the stretches selected before), including a special review of the literature of the noise control and attenuation techniques that currently offers the engineering for traffic noise mitigation.
- Chapter 6 presents the application to the selected case studies and a discussion of the results obtained.
- Chapter 7 includes the conclusions of the developed research and the open lines for future research as a result of the presented work.

And finally, the Ph. D. Dissertation includes references and the bibliography used as a support for the development of this research, and two appendices with the models of surveys used in the expert panel inquiry.

Keywords: road noise, environmental noise directive, noise action plan, noise maps, decision-making, multicriteria analysis, fuzzy analytical hierarchy process.

ÍNDICE GENERAL.

| | |
|--|------|
| AGRADECIMIENTOS. | i |
| RESUMEN. | iii |
| ABSTRACT. | v |
| ÍNDICE GENERAL. | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS. | xiii |
| ÍNDICE DE TABLAS. | xvii |
| GLOSARIO. | xxi |
| PRODUCCIÓN CIENTÍFICA. | xxix |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. | 1 |
| 1.1. Desarrollo de las carreteras en España y Andalucía. | 1 |
| 1.1.1. Aspectos históricos..... | 1 |
| 1.1.2. Aspectos técnicos. | 16 |
| 1.1.3. Aspectos socioeconómicos..... | 23 |
| 1.2. Contaminación sonora. | 33 |
| 1.2.1. El ruido. | 33 |
| 1.2.2. Parámetros acústicos. | 35 |
| 1.2.3. Las carreteras y el ruido. | 47 |
| 1.3. Normativa de aplicación. | 54 |
| 1.3.1. Normativa europea. | 54 |
| 1.3.2. Normativa nacional. | 58 |
| 1.3.3. Normativa autonómica. | 61 |
| 1.3.4. Normativa municipal..... | 63 |
| 1.4. Mapas Estratégicos de Ruido. | 64 |
| 1.4.1. Introducción..... | 64 |
| 1.4.2. Definición..... | 66 |
| 1.4.3. Tipos..... | 67 |
| 1.4.4. Metodologías para la realización de los mapas estratégicos de ruido. | 70 |

| | |
|---|-----|
| 1.5. Planes de Acción contra el Ruido. | 74 |
| 1.5.1. Definición..... | 74 |
| 1.5.2. Situación actual en España y Andalucía. | 77 |
| CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS Y MARCO DE TRABAJO. | 87 |
| 2.1. Sistemas difusos. | 87 |
| 2.1.1. Lógica difusa..... | 87 |
| 2.1.2. Definición de conjunto difuso..... | 91 |
| 2.1.3. Conceptos básicos sobre conjuntos difusos. | 95 |
| 2.1.4. Definición de números difusos. | 101 |
| 2.1.5. Operaciones con números difusos..... | 104 |
| 2.1.6. Modelado lingüístico difuso..... | 107 |
| 2.2. La toma de decisiones. | 114 |
| 2.2.1. Técnicas de decisión. | 114 |
| 2.2.2. Conceptos básicos sobre decisión. | 119 |
| 2.2.3. Clasificación de los problemas de decisión. | 127 |
| 2.3. Análisis multicriterio. | 137 |
| 2.3.1. Introducción. | 137 |
| 2.3.2. Conceptos básicos. | 141 |
| 2.3.3. Ponderación de criterios..... | 145 |
| 2.3.4. Fases..... | 150 |
| 2.3.5. Ventajas e inconvenientes..... | 154 |
| 2.3.6. Principales métodos. | 157 |
| 2.3.7. Metodologías de toma de decisión en carreteras. | 168 |
| 2.3.8. Análisis multicriterio difuso..... | 170 |
| 2.4. Método de las jerarquías analíticas. | 173 |
| 2.4.1. Características principales y axiomas básicos. | 173 |
| 2.4.2. Metodología del proceso analítico jerárquico..... | 179 |
| 2.4.3. Ventajas e inconvenientes..... | 188 |

| | |
|--|------------|
| 2.4.4. Método de jerarquías analíticas difuso..... | 195 |
| 2.5. Método de la suma ponderada..... | 201 |
| 2.5.1. Conceptos básicos y metodología..... | 201 |
| 2.5.2. Ventajas e inconvenientes..... | 202 |
| 2.6. Método ELECTRE..... | 204 |
| 2.6.1. Conceptos básicos..... | 204 |
| 2.6.2. Metodología..... | 207 |
| 2.6.3. Ventajas e inconvenientes..... | 211 |
| 2.7. Método TOPSIS..... | 211 |
| 2.7.1. Conceptos básicos..... | 211 |
| 2.7.2. Metodología..... | 213 |
| 2.7.3. Ventajas e inconvenientes..... | 214 |
| 2.7.4. Método TOPSIS difuso..... | 216 |
| 2.8. Técnica del panel de expertos como encuesta estadística..... | 217 |
| 2.8.1. Características generales de las encuestas estadísticas..... | 217 |
| 2.8.2. Paneles de expertos..... | 226 |
| 2.8.3. Aplicaciones..... | 229 |
| CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... | 231 |
| 3.1. Justificación de la investigación..... | 231 |
| 3.2. Objetivo general de la tesis..... | 234 |
| 3.3. Objetivos específicos..... | 235 |
| 3.4. Plan de trabajo..... | 236 |
| CAPÍTULO 4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO..... | 241 |
| 4.1. Material y métodos..... | 241 |
| 4.1.1. Planteamiento del problema..... | 241 |
| 4.1.2. Presentación del método..... | 244 |
| 4.2. Variables de la metodología..... | 247 |

| | |
|--|------------|
| 4.2.1. Identificación de parámetros y factores. | 247 |
| 4.2.2. Preselección de variables. | 260 |
| 4.3. Ponderación de variables. | 265 |
| 4.3.1. Planteamiento del sistema de jerarquía. | 265 |
| 4.3.2. Panel de expertos y encuestas. | 267 |
| 4.3.3. Agregación de la información recibida. | 273 |
| 4.3.4. Resultados. | 276 |
| 4.4. Índice de Prioridad de Tramo. | 285 |
| 4.5. Diagrama de flujo de aplicación de la metodología. | 289 |
| CAPÍTULO 5. PROPUESTA DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA ELECCIÓN DE LAS SOLUCIONES IDÓNEAS DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN CARRETERAS. | 293 |
| 5.1. Material y métodos. | 293 |
| 5.1.1. Planteamiento del problema. | 293 |
| 5.1.2. Presentación de la metodología. | 295 |
| 5.2. Soluciones técnicas al ruido debido al tráfico de las carreteras. | 296 |
| 5.2.1. Acción sobre los vehículos. | 300 |
| 5.2.2. Planificación de las infraestructuras y ordenación del territorio. | 300 |
| 5.2.3. Barreras acústicas. | 302 |
| 5.2.4. Pavimentos silenciosos. | 310 |
| 5.2.5. Gestión del tráfico. | 323 |
| 5.2.6. Aislamiento de edificios. | 326 |
| 5.3. Alternativas en análisis. | 328 |
| 5.3.1. Identificación de soluciones técnicas. | 328 |
| 5.3.2. Preselección de alternativas. | 333 |
| 5.4. Criterios de análisis. | 342 |
| 5.4.1. Identificación de factores influyentes en el análisis. | 342 |
| 5.4.2. Preselección de criterios. | 350 |
| 5.4.3. Definición de indicadores. | 352 |

| | |
|--|-----|
| 5.5. Ponderación de criterios. | 356 |
| 5.5.1. Planteamiento del sistema de jerarquía. | 356 |
| 5.5.2. Panel de expertos y encuestas. | 358 |
| 5.5.3. Agregación de la información recibida. | 362 |
| 5.5.4. Resultados. | 364 |
| CAPÍTULO 6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA. CASOS DE ESTUDIO. | 371 |
| 6.1. Presentación de los casos de estudio. | 371 |
| 6.1.1. La red de carreteras autonómicas en Almería. | 371 |
| 6.1.2. Los mapas estratégicos de ruido de la red de carreteras autonómicas en Almería. | 377 |
| 6.1.3. El plan de acción contra el ruido de la red de carreteras autonómicas en Almería. | 382 |
| 6.1.4. Definición del campo de aplicación. | 385 |
| 6.2. Aplicación de la metodología de asignación de prioridades de actuación a los tramos del plan de acción contra el ruido de la red de carreteras autonómicas en Almería. | 399 |
| 6.2.1. Valores de las variables de prioridad de tramo. | 400 |
| 6.2.2. Cálculo del índice de prioridad de tramo. | 403 |
| 6.2.3. Discusión de resultados. | 404 |
| 6.3. Aplicación del análisis multicriterio para la definición del plan de acción contra el ruido de la red de carreteras autonómicas en Almería. | 408 |
| 6.3.1. Alternativas en análisis..... | 409 |
| 6.3.2. Evaluación de criterios e indicadores..... | 420 |
| 6.3.3. Aplicación de los métodos propuestos..... | 427 |
| 6.3.4. Discusión de resultados..... | 435 |
| CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS. | 441 |
| 7.1. Conclusiones. | 441 |
| 7.2. Líneas abiertas tras esta investigación. | 446 |

| | |
|---|-----|
| CHAPTER 7. CONCLUSIONS AND FURTHER RESEARCH LINES. | 451 |
| 7.1. Conclusions. | 451 |
| 7.2. Research lines for further developments after this thesis. | 456 |
| BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS. | 461 |
| APÉNDICES. | 501 |
| Apéndice 1. Cuestionario modelo del panel de expertos utilizado en el desarrollo de la primera fase de la metodología. | |
| Apéndice 2. Cuestionario modelo del panel de expertos utilizado en el desarrollo de la segunda fase de la metodología. | |

ÍNDICE DE FIGURAS.

| | |
|---|-----|
| Figura 1.1: Calzadas romanas en la Península Ibérica. | 2 |
| Figura 1.2: Caminos en el siglo XVIII en España. | 3 |
| Figura 1.3: Carreteras españolas incluidas en el Plan de 1761. | 4 |
| Figura 1.4: Carreteras españolas incluidas en el Plan de 1860. | 6 |
| Figura 1.5: Carreteras españolas incluidas en el Plan Peña de 1926. | 8 |
| Figura 1.6: Carreteras españolas incluidas en el Plan de 1951. | 10 |
| Figura 1.7: Autovías incluidas en el Plan de 1984 en España. | 13 |
| Figura 1.8: Carreteras españolas incluidas en el Plan del Circuito Nacional de Firmes Especiales. | 20 |
| Figura 1.9: Carreteras españolas incluidas en el Plan REDIA. | 22 |
| Figura 1.10: Influencia de la temperatura en la propagación del ruido. | 44 |
| Figura 1.11: Influencia del viento en la propagación del ruido. | 45 |
| Figura 1.12: Influencia de los obstáculos en la propagación del ruido. | 46 |
| Figura 1.13: Principales fuentes de ruido urbano. | 48 |
| Figura 1.14: Resultados de opinión de los andaluces sobre los más importantes problemas medioambientales. | 50 |
| Figura 1.15: Carreteras de la Red de Carreteras del Estado y de las Comunidades Autónomas incluidas en la primera fase de aplicación de la Directiva 2002/49/CE en España. | 57 |
| Figura 2.1. Representación del conjunto clásico o crisp «x es igual a 5». | 93 |
| Figura 2.2: Ejemplo de función de pertenencia de un conjunto difuso. | 95 |
| Figura 2.3: Representación gráfica de función de pertenencia de inicio de dominio o L. .. | 97 |
| Figura 2.4: Representación gráfica de función de pertenencia triangular o Λ | 98 |
| Figura 2.5: Representación gráfica de las funciones de pertenencia trapezoidal o Π | 99 |
| Figura 2.6: Representación gráfica de función de pertenencia de fin de dominio o Γ | 99 |
| Figura 2.7: Representación gráfica de la función de pertenencia gaussiana. | 100 |
| Figura 2.8: Ejemplos de números difusos. | 102 |

| | |
|---|-----|
| Figura 2.9. Representación de un número difuso triangular con sus tres puntos fundamentales (a ,b, c). | 103 |
| Figura 2.10. Comparación entre dos números difusos triangulares. | 107 |
| Figura 2.11. Escala de tres términos lingüísticos. | 113 |
| Figura 2.12. Escala de cinco términos lingüísticos (tipo 2). | 114 |
| Figura 2.13. Esquema de un proceso de toma de decisión. | 118 |
| Figura 2.14: Representación de una matriz de decisión de alternativas frente a criterios. | 126 |
| Figura 2.15: Relaciones entre decisiones. | 133 |
| Figura 2.16. Representación de las fases de un proceso de decisión multicriterio. | 151 |
| Figura 2.17. Procedimiento para realizar la jerarquización analítica en el AHP. | 180 |
| Figura 2.18: Representación del modelo AHP. | 180 |
| Figura 2.19: Representación de la matriz de criterios del AHP. | 182 |
| Figura 2.20: Representación de la matriz de criterios normalizada del AHP. | 184 |
| Figura 2.21: Representación de una matriz de valoración de alternativas del AHP. | 187 |
| Figura 2.22. Diagrama de flujo del AHP. | 189 |
| Figura 4.1. Sistema de jerarquía para ponderación de variables y subvariables de la primera fase de la metodología. | 266 |
| Figura 4.2: Diagrama de flujo de aplicación de la primera fase de la metodología y obtención de variables de prioridad de tramo. | 291 |
| Figura 5.1: Ejemplos de cubrición de carretera para reducción de ruido. | 301 |
| Figura 5.2: Ejemplos de pantallas acústicas. | 303 |
| Figura 5.3: Esquema de un dique de tierra como barrera acústica. | 303 |
| Figura 5.4: Ejemplo de muro de gaviones. | 304 |
| Figura 5.5: Ejemplo de pantallas vegetales. | 304 |
| Figura 5.6: Ejemplo de barrera acústica mixta. | 305 |
| Figura 5.7: Representación del efecto de los pavimentos silenciosos sobre el ruido. | 311 |
| Figura 5.8: Diagrama de flujo de depuración de alternativas según tramos urbanos, vías urbanas o travesías. | 340 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.9: Diagrama de flujo de depuración de alternativas según existencia previa de medidas antirruído..... | 340 |
| Figura 5.10: Diagrama de flujo de depuración de alternativas según atenuación necesaria. .. | 341 |
| Figura 5.11: Diagrama de flujo de depuración de alternativas según velocidad media del tramo. | 342 |
| Figura 5.12: Sistema de jerarquía para ponderación de criterios para la elección de alternativas contra el ruido en carreteras. | 358 |
| Figura 6.1: Red de Carreteras de Andalucía..... | 372 |
| Figura 6.2: Red de Carreteras de la provincia de Almería. | 374 |
| Figura 6.3: Detalle de la Red de Carreteras de la aglomeración urbana de Almería y datos de aforos de las carreteras cercanas..... | 376 |
| Figura 6.4: Detalle del mapa de L_{den} de la carretera A-1000 obtenido en los MER de la primera fase de aplicación de la Directiva..... | 382 |
| Figura 6.5: Detalle del mapa de afección acústica de la carretera A-1000 obtenido en los MER de la primera fase de aplicación de la Directiva. | 383 |
| Figura 6.6: Localización de los tramos de carreteras analizados. | 387 |
| Figura 6.7: Vista del inicio del primer subtramo de la carretera A-1000..... | 388 |
| Figura 6.8: Vista del final del primer subtramo de la carretera A-1000..... | 389 |
| Figura 6.9: Vista de la glorieta de «La Fuensanta» en la carretera A-1000. | 390 |
| Figura 6.10: Vista del subtramo 3 de la carretera A-1000 (al fondo) y de la travesía de la A-1001 desde el colegio «Buenavista» de Huércal de Almería. | 391 |
| Figura 6.11: Vista del subtramo 3 de la carretera A-1000..... | 392 |
| Figura 6.12: Vista de la glorieta del «Vía Park» en la carretera A-1051. | 393 |
| Figura 6.13: Vista del subtramo 3 de la carretera A-1051..... | 395 |
| Figura 6.14: Vista del subtramo 4 de la carretera A-1051..... | 396 |
| Figura 6.15: Vista del tramo de la carretera A-1201 desde la estructura del P.K. 14+150. | 398 |
| Figura 6.16: Vista de una pantalla acústica instalada en un tramo diferente de la carretera A-1201. | 399 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.17: Vista de un bloque de viviendas junto al tramo de la carretera A-1051 estudiado..... | 406 |
| Figura 6.18: Ortofoto de la carretera A-1000 en la zona de estudio..... | 409 |
| Figura 6.19: Aplicación del diagrama de flujo de depuración de alternativas en la A-1000 según tramos urbanos, vías urbanas o travesías..... | 410 |
| Figura 6.20: Aplicación del diagrama de flujo de depuración de alternativas en la A-1000 según existencia previa de medidas antirruído..... | 410 |
| Figura 6.21: Diagrama de flujo de depuración de alternativas en la A-1000 según atenuación necesaria..... | 411 |
| Figura 6.22: Diagrama de flujo de depuración de alternativas en la A-1000 según velocidad media del tramo..... | 411 |
| Figura 6.23: Planta de estudio de la carretera A-1000..... | 412 |
| Figura 6.24: Simulación de la colocación de la pantalla acústica junto al tramo de estudio de la carretera A-1000..... | 413 |
| Figura 6.25: Alzado de la pantalla acústica propuesta para el tramo de estudio de la carretera A-1000..... | 414 |
| Figura 6.26: Planta de diseño de la berma de tierra propuesta para el tramo de estudio de la carretera..... | 416 |
| Figura 6.27: Esquema de disposición de pantalla acústica sobre berma de tierra..... | 416 |
| Figura 6.28: Ejemplo de grupo semafórico de preaviso y gestión del tráfico en una carretera..... | 418 |
| Figura 6.29: Tipos de ventanas para aislamiento acústico según datos de RA tr..... | 418 |
| Figura 6.30: Grafo ELECTRE aplicado a las alternativas planteadas en la carretera A-1000..... | 432 |

ÍNDICE DE TABLAS.

| | |
|--|-----|
| Tabla 1.1: Red de carreteras por competencia y tipo de vía antes y después de las transferencias a las Comunidades Autónomas. | 25 |
| Tabla 1.2: Red de carreteras por competencia, tipo de vía y período 1990-2010. | 26 |
| Tabla 1.3: Red de carreteras de Andalucía por competencia y período 1990-2010. | 27 |
| Tabla 1.4: Red de carreteras de alta capacidad de Andalucía por tipo de vía y período 1990-2010. | 27 |
| Tabla 1.5: Parque nacional de vehículos por tipo y período (1995-2010). | 28 |
| Tabla 1.6: Relación el parque de vehículos y la población de España (1982-2009). | 29 |
| Tabla 1.7: Datos de tráfico según IMD en la RIGE por tipo de vía y período, con porcentaje de pesados (2004-2012). | 30 |
| Tabla 1.8: Distribución relativa de vehículos según su velocidad media en las autovías de la Red de Carreteras del Estado por período (2004-2012). | 31 |
| Tabla 1.9: Distribución relativa de vehículos según su velocidad media en las carreteras convencionales de la Red de Carreteras del Estado por período (2004-2012). | 31 |
| Tabla 1.10: Niveles máximos de ruido originados por diversas fuentes de transporte. | 54 |
| Tabla 1.11: Definición del grado de afección. | 81 |
| Tabla 1.12: Resumen de datos de los PAR publicados en España. | 83 |
| Tabla 2.1. Resumen de los términos empleados en las escalas para conversión de términos lingüísticos. | 113 |
| Tabla 2.2. Resumen de los principales procedimientos de normalización. | 144 |
| Tabla 2.3: La Escala Fundamental de Saaty. | 176 |
| Tabla 2.4: Escala simple de valoración. | 176 |
| Tabla 2.5: Índice de Consistencia Aleatorio. | 185 |
| Tabla 2.6. Comparación de métodos para asignación de pesos. | 195 |
| Tabla 4.1: Objetivos de calidad acústica para ruido aplicables a áreas urbanizadas existentes. | 253 |
| Tabla 4.2: Obtención del valor de la RSPV E_{MAR} | 263 |
| Tabla 4.3: Relación de variables y subvariables de prioridad de tramo. | 264 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 4.4: Población de participantes en panel de expertos sobre las RSPV..... | 273 |
| Tabla 4.5: Escala triangular para conversión de variables lingüísticas a números difusos..... | 274 |
| Tabla 4.6: Cálculo de posición media de las RSPV según el panel de expertos..... | 281 |
| Tabla 4.7: Comparativa de ordenación y ponderación de las RSPV. | 282 |
| Tabla 4.8: Cálculo de pesos de las subvariables de las RSPV. | 285 |
| Tabla 4.9: Listado y ponderación de las RSPV..... | 287 |
| Tabla 5.1: Medidas de reducción del ruido debido al tráfico de las carreteras..... | 299 |
| Tabla 5.2: Efectos de las limitaciones de velocidad y de las reducciones de tráfico sobre la reducción del ruido..... | 325 |
| Tabla 5.3: Principales medidas de acción contra el ruido del tráfico en carreteras. | 329 |
| Tabla 5.4: Listado y denominación de alternativas preseleccionadas de la metodología. | 337 |
| Tabla 5.5: Criterios y subcriterios y sus indicadores y caracteres para la elección de alternativas contra el ruido en carreteras..... | 357 |
| Tabla 5.6: Resumen de expertos colaboradores en panel de expertos sobre criterios para la elección de alternativas contra el ruido en carreteras..... | 362 |
| Tabla 5.7: Ponderaciones de subcriterios para la elección de alternativas contra el ruido en carreteras. | 367 |
| Tabla 5.8: Listado y ponderación de subcriterios para la elección de alternativas contra el ruido. | 369 |
| Tabla 6.1: Datos del tramo de la A-1000 para aplicación de la primera fase de la metodología..... | 401 |
| Tabla 6.2: Datos del tramo de la A-1051 para aplicación de la primera fase de la metodología..... | 401 |
| Tabla 6.3: Datos del tramo de la A-1201 para aplicación de la primera fase de la metodología..... | 402 |
| Tabla 6.4: Valores de las RSPV de los tramos de carreteras analizados en la primera fase de la metodología. | 403 |
| Tabla 6.5: Cálculo del RSPI de los tramos de carreteras analizados en la primera fase de la metodología..... | 404 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 6.6: Valores de los indicadores de los subcriterios analizados para las alternativas planteadas en la carretera A-1000. | 425 |
| Tabla 6.7: Valores normalizados de los criterios para todas las alternativas planteadas en la carretera A-1000. | 427 |
| Tabla 6.8: Aplicación del método de la suma ponderada a las alternativas planteadas a la carretera A-1000. | 428 |
| Tabla 6.9: Ordenación de alternativas planteadas a la carretera A-1000 según el método de la suma ponderada. | 429 |
| Tabla 6.10: Matriz de índices de concordancia de aplicación del método ELECTRE a las alternativas planteadas a la carretera A-1000. | 429 |
| Tabla 6.11: Matriz de índices de discordancia de aplicación del método ELECTRE a las alternativas planteadas a la carretera A-1000. | 430 |
| Tabla 6.12: Matriz de dominancia concordante de aplicación del método ELECTRE a las alternativas planteadas a la carretera A-1000. | 430 |
| Tabla 6.13: Matriz de dominancia discordante de aplicación del método ELECTRE a las alternativas planteadas a la carretera A-1000. | 431 |
| Tabla 6.14: Matriz de dominancia agregada de aplicación del método ELECTRE a las alternativas planteadas a la carretera A-1000. | 431 |
| Tabla 6.15: Ordenación de alternativas planteadas a la carretera A-1000 según el método ELECTRE. | 433 |
| Tabla 6.16: Aplicación del método TOPSIS a las alternativas planteadas a la carretera A-1000. | 434 |
| Tabla 6.17: Ordenación de alternativas planteadas a la carretera A-1000 según el método TOPSIS. | 435 |

GLOSARIO.

A: nivel o amplitud de la onda del sonido.

AENOR: Asociación Española de Normalización y Certificación.

AHP: *analytic hierarchy process* (proceso analítico jerárquico o método de las jerarquías analíticas).

AIR: criterio de calidad del aire.

AMB: criterio ambiental.

ANP: *analytical network process* (proceso analítico en red).

BC: betunes mejorados con caucho.

BMAVC: betunes modificados de alta viscosidad con caucho.

BMC: betunes modificados con caucho.

BOE: Boletín Oficial del Estado.

BOJA: Boletín Oficial de la Junta de Andalucía.

c: velocidad del sonido.

CEN: Comité Europeo de Normalización.

CMAOT: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía.

CNOSSOS-EU: *common noise assessment methods in Europe*.

CONS: criterio de costes de conservación y rehabilitación.

CORR: criterio funcional.

COST: criterio de coste económico.

CS: criterio de número de centros sensibles corregidos.

CS_{exp}: número de centros sensibles al ruido expuestos.

CS_{exp,55}: número de centros sensibles al ruido expuestos a valores de L_{den} mayores o iguales que 55 y menores que 65 dB(A).

CS_{exp,65}: número de centros sensibles al ruido expuestos a valores de L_{den} mayores o iguales que 65 y menores que 75 dB(A).

CS_{exp,75}: número de centros sensibles al ruido expuestos a valores de L_{den} mayores de 75 dB(A).

d: densidad del medio.

DDPP: Diputaciones Provinciales.

DGC MFOM: Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento.

DGI CFV: Dirección General de Infraestructuras de la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía.

EEA: *European Environmental Agency* (Agencia Ambiental Europea).

ELECTRE: *elimination et choix traduisant réalité*.

E_{MAR}: existencia o planificación previa de medidas de atenuación acústica.

E_Q: Existencia de quejas de ciudadanos en relación al ruido del tráfico de la carretera.

f: frecuencia del sonido.

FAHP: *fuzzy analytical hierarchy process* (proceso analítico jerárquico difuso o técnica de las jerarquías analíticas difusa).

FUNC: criterio de costes de funcionamiento.

GPG: *good practice guide* (guía de buenas prácticas).

HARMONOISE: *harmonised, accurate and reliable methods for the European Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise* (métodos armonizados, precisos y fiables para la Directiva Europea sobre Evaluación y Gestión del Ruido Ambiental).

I: intensidad de la onda del sonido.

IC: índice de consistencia.

ICAFIR: instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía.

ILUM: criterio de calidad de visión/iluminación.

IMAGINE: *improved methods for the assessment of the generic impact of noise in the environment* (métodos mejorados para la evaluación del impacto genérico del ruido en el medio ambiente)

IMD: intensidad media diaria de vehículos.

INE: Instituto Nacional de Estadística.

INFR: criterio de afección a la infraestructura

INV: criterio de coste de primera inversión.

IR: índice de consistencia aleatorio o *randómico*.

ISO: *International Organization for Standardization* (Organización Nacional de Normalización)

L: nivel del sonido.

L_A: nivel sonoro ponderado A.

L_{Aeq,T}: nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A.

L_{den}: indicador de ruido día-tarde-noche.

L_{día}: indicador de ruido diurno.

L_{exist}: índice de ruido existente.

L_I: nivel de intensidad sonora.

L_{noche}: indicador de ruido en período nocturno.

L_{obj}: índice de ruido del objetivo de calidad acústica.

L_p: nivel de presión sonora.

L_{tarde}: indicador de ruido en período vespertino.

L_w: nivel de potencia sonora.

MACBETH: *measuring by a categorical based evaluation technique*.

MAUT: *multi-attribute utility theory* (teoría de la utilidad multi-atributo)

MCDM: *multiple criteria decision making* (toma de decisiones multicriterio).

MER: mapa estratégico de ruido.

MOL: criterio de mejora social de los afectados.

NBE: norma básica de la edificación.

NFU: neumáticos fuera de uso.

NMPB: nouvelle méthode de prevision du bruit.

NOISE: *Noise Observation and Information Service for Europe.*

OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.

OMS: Organización Mundial de la Salud.

ORESTE: *organisation, rangement et synthèse de données relationnelles.*

OWA: *ordered weighted average.*

p.d.b.i.: decisión multicriterio bajo incertidumbre.

P.K.: punto kilométrico.

P: presión sonora.

PAIS: criterio de calidad paisajística.

PAR: plan de acción contra el ruido.

PEIT: Plan Estratégico de Infraestructuras del Transporte.

PERM: criterio de permeabilidad territorial.

PERS: criterio de número de personas corregidas.

P_{exp}: población expuesta.

P_{exp,55}: población expuesta a valores de L_{den} mayores o iguales que 55 y menores que 65 dB(A).

P_{exp,65}: población expuesta a valores de L_{den} mayores o iguales que 65 y menores que 75 dB(A).

P_{exp,75}: población expuesta a valores de L_{den} mayores de 75 dB(A).

PISTA: Plan de Infraestructuras para la Sostenibilidad del Transporte en Andalucía.

PITVI: Plan de Infraestructuras, Transporte y Vivienda.

Plan MÁS CERCA: Plan de Mejora de la Accesibilidad, Seguridad vial y Conservación en la Red de Carreteras de Andalucía.

P.K.: punto kilométrico.

PP.KK.: puntos kilométricos.

PROMETHEE: *preference ranking organization method for enrichment evaluations.*

PROP: criterio de valor de las propiedades colindantes.

RA, tr: índice global de reducción acústica ponderado A.

RC: razón de consistencia.

REDIA: Red de Itinerarios Asfálticos.

RF: refuerzo de firme.

RIGE: Red de Interés General del Estado.

RMR: *reken en meetvoorschrift railverkeerslawaaai* (modelo holandés para el cálculo de ruido ferroviario).

RSPI: *road stretch priority index* (índice de prioridad de tramo).

RSPV: *road stretch priority variables* (variables de prioridad de tramo).

SEAT: Sociedad Española de Automóviles de Turismo.

SEG: criterio de seguridad vial.

SEL: nivel de exposición sonora.

S_{exp}: superficie expuesta.

S_{exp,55}: superficie expuesta a valores de L_{den} mayores o iguales que 55 y menores que 65 dB(A).

S_{exp,65}: superficie expuesta a valores de L_{den} mayores o iguales que 65 y menores que 75 dB(A).

S_{exp,75}: superficie expuesta a valores de L_{den} mayores de 75 dB(A).

SICA: Sistema de Información Acústica del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

SIG: sistemas de información geográfica.

SMA: *stone mastic asphalt*.

SMART: *simple multi-attribute rating technique*.

SOC: criterio social.

STEM: *step method*.

SUP: criterio de superficie corregida.

T: período de la onda del sonido.

TODIM: tomada de decisión interactiva multicriterio.

TOPSIS: *technique for order preference by similarity to ideal solution*.

TRER: *technische regeling emissiemeetmethoden railverkeer* (nuevo modelo holandés para el cálculo de ruido ferroviario)

v: velocidad media del tráfico.

VEH: criterio de gastos en vehículos.

VEL: criterio de velocidad del tráfico.

VIKOR: *visekriterijumska optimizacija i kompromisno resende* (optimización multicriterio y solución de compromiso).

VIS: criterio de visibilidad en carretera.

VIV: criterio de número de viviendas corregidas.

W: potencia sonora.

WG-AEN: *working group on the assessment of exposure to noise* (grupo de trabajo de evaluación de la exposición al ruido)

ZAPROS: procedimientos cerrados cerca de situaciones de referencia (en ruso).

ΔL : atenuación necesaria.

ΔL_d : atenuación necesaria en período diurno.

ΔL_n : atenuación necesaria en período nocturno.

λ : longitud de onda del sonido.

λ_{\max} : valor característico promedio.

%A: porcentaje de personas que encuentran el ruido del tráfico molesto.

%HA: porcentaje de personas que encuentran el ruido del tráfico muy molesto.

%vp: porcentaje de vehículos pesados.

7EAP: Séptimo Plan de Acción Medioambiental de la Unión Europea.

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA.

PUBLICACIONES REALIZADAS.

Parte de los resultados de esta tesis han sido publicados mediante los siguientes artículos científicos:

***“A methodology for classification by priority for action: selecting road stretches for network noise action plans”.* Ruiz-Padillo, Alejandro, Torija, Antonio J; Ramos-Ridao, Ángel; Ruiz, Diego P. “Transportation Research Part D” 29 (2014). Pages 66-78.**

Revista internacional indexada (Elsevier ISSN: 1361-9209) de categoría Q2 *Transportation Science & Technology* (posición 12 de 32). *JCR Impact Factor* 1,801.

«Índice para determinación de la prioridad de actuación en los tramos de carretera de un plan de acción contra el ruido». Ruiz-Padillo, Alejandro; Ramos-Ridao, Ángel; Torija, Antonio J; Ruiz, Diego P. Revista «Carreteras» número 195 (mayo-junio de 2014). Páginas 40-49.

Revista nacional de referencia en el campo profesional de las Carreteras en España (ISSN: 02126389) editada por la Asociación Española de la Carretera (AEC). Indexada en la base de datos *Scopus Civil and Structural Engineering* Categoría Q4 (posición 205 de 331) con índice o factor de impacto SJR = 0,139. Indexada igualmente en *Engineering Index*, *Dialnet*, DIIT (Documentación Internacional de Investigación del Transporte), *Ulrichs*, *Latindex* y *Google Scholar* (Índice H =2).

APORTACIONES A CONGRESOS.

Del mismo modo, parte de los resultados alcanzados durante el proceso de investigación de esta tesis doctoral fueron presentados en el siguiente congreso internacional:

Comunicación invitada dentro de la Sección Estructurada de Nuevas tecnologías y metodologías para la elaboración de los Mapas de Ruido en el ***EAA EUROPEAN SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL ACOUSTICS AND NOISE MAPPING*** celebrado en Valladolid de 2 al 4 de Octubre de 2013, con el siguiente título: ***“Priority Index on road sections for Noise Action Plan”***.

Congreso anual organizado por la *European Acoustical Association*, que integra a las 32 sociedades nacionales acústicas europeas, e indexado en las principales bases de datos de congresos internacionales.

La comunicación fue publicada en las actas del congreso, ISBN 978-84-87985-23-2, páginas 257-264. Véase <https://www.euracoustics.org/events/aaa-conferences>.

Además, actualmente se está trabajando en la producción de otros dos artículos para revistas internacionales, así como presentaciones en Congresos relacionados con la materia de esta investigación.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.1. DESARROLLO DE LAS CARRETERAS EN ESPAÑA Y ANDALUCÍA.

1.1.1. Aspectos históricos.

Desde hace cientos de años y dadas las crecientes necesidades de la humanidad, la construcción de vías de comunicación ha sido uno de los primeros signos de civilización avanzada. El aumento de tamaño y densidad de las poblaciones en las ciudades de las primeras civilizaciones y la necesidad de comunicación con otras regiones se tornó necesaria para hacer llegar suministros alimenticios o transportarlos a otros consumidores, y es allí donde surgen las **calzadas y caminos como antecesores de las carreteras** [Uriol Salcedo, 2001].

Los mesopotámicos fueron uno de los primeros constructores de carreteras hacia el año 3500 a.C. [Pellicer Armiñana, 2004]. Le siguieron los chinos, los cuales desarrollaron un sistema de carreteras en torno al siglo XI a.C., y construyeron la Ruta de la Seda (la más larga del mundo) durante 2.000 años [Zorio Blanco, 1987]. Los incas de Sudamérica construyeron una avanzada red de caminos que no se consideran estrictamente carreteras, ya que ni la rueda ni las caballerías eran conocidas por los incas y todos sus desplazamientos se realizaban a pie. Estas llamadas carreteras recorrían todos los Andes e incluían galerías cortadas en rocas sólidas [Alonzo Salomón y Rodríguez Rufino, 2005].

Otros precursores de la red de carreteras es el sistema descrito en el siglo I por el geógrafo griego Estrabón, que partía de la antigua Babilonia, así como las vías mencionadas en los escritos de Herodoto, historiador griego del siglo V a.C., construidas en Egipto para transportar los materiales con los que construyeron las pirámides y otras estructuras monumentales levantadas por los faraones.

Pero, sin duda, el mayor desarrollo de las carreteras en la Antigüedad fue debido a los romanos, de los que se conservan las más antiguas en España [Pellicer Armiñana, 2004]. De hecho, en la cumbre de su poder, el Imperio romano tenía un sistema de

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

carreteras de unos 80.000 km, consistente en 29 calzadas que partían de la ciudad de Roma, y una red que cubría todas las provincias conquistadas importantes. En Hispania, la red llegó a alcanzar los 30.000 km, de los que 10.000 constituían la red oficial, destacando la vía Augusta o la ruta de la Plata, entre otras [Moreno Gallo, 2006]. Toda persona tenía derecho a usar las calzadas, según la ley romana, pero los responsables del mantenimiento eran los habitantes del distrito por el que pasaba [Uriol Salcedo, 2001]. Este sistema era eficaz para mantener las calzadas en buen estado mientras existiera una autoridad central que lo impusiera, pero con la ausencia de la organización del Imperio romano durante la Edad Media, el sistema de calzadas ibérico empezó a desaparecer y sobrevivirían tan solo restos de sus calzadas, muy deterioradas por la falta de conservación, y pequeños circuitos comarcales sin firme localizados en torno a monasterios y débiles aglomeraciones y enlazados por las necesidades de las campañas militares.



Figura 1.1: Calzadas romanas en la Península Ibérica. Fuente: [Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Fomento, 2008].

La única novedad destacable del Medievo fue la red de itinerarios ganaderos que en tiempos del rey Alfonso X ya tenían definidas las tres cañadas principales: Leonesa,

Manchega y Segoviana, a la que se uniría más adelante la Soriana [Miranda García y Guerrero Navarrete, 2008].

En la Edad Moderna, durante el período de los Austrias en España, el esquema de la red es similar al de las calzadas romanas, limitándose a la conservación de unos 18.000 km, pertenecientes a los caminos más usados, principalmente a pie o por caballerías y relacionados con itinerarios de correo.

Pero no sería hasta el siglo XVIII cuando se puede empezar a hablar estrictamente de carreteras en nuestro país, ya que hasta entonces las vías de comunicación se componían estrictamente de caminos y calzadas en condiciones muy diversas. Los dos **primeros tramos de carreteras** propiamente dichos fueron construidos en 1749, durante el reinado de Fernando VI, y se denominaron «caminos carreteros» de Reinosa a Santander (de 74 km, para facilitar la salida de las lanas castellanas hacia la exportación) y del Puerto de Guadarrama (de 17 km, que permitía la conexión de las dos mesetas a través de Madrid) [Rueda Hernanz, 2006].



Figura 1.2: Caminos en el siglo XVIII en España. Fuente: [Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Fomento, 2008]

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Pero fue en 1761, ya bajo el mandato de Carlos III, cuando se elaboró el **primer plan de carreteras de España**, mediante un Real Decreto impulsado por el ministro Bernardo Ward que planificaba «...hacer caminos rectos y sólidos en España que faciliten el comercio de unas provincias a otras, dando principio por los de Andalucía, Cataluña, Galicia y Valencia...». Se inicia así el sistema radial de caminos con origen en Madrid y a las cuatro rutas inicialmente propuestas se sumarían pronto las vías hacia Francia por Irún y hacia la frontera portuguesa por Badajoz [Frax Rosales y Madrazo Madrazo, 2001].



Figura 1.3: Carreteras españolas incluidas en el Plan de 1761. Fuente: [Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Fomento, 2008]

En todo caso, el ritmo de construcción de la red resultó a largo plazo extraordinariamente lento, ya que en 17 años se construyeron 300 km (unos 15 km/año) y al término del reinado de Carlos III (1788) la red pavimentada apenas superó los 1.500 kilómetros.

Al inicio del siglo XIX solo se habían abierto al tráfico unos 2.000 kilómetros de carreteras afirmadas, de los que cerca de 1.350, el 75%, correspondían al dispositivo radial,

y seguidamente la paralización y los daños sufridos por la Guerra de Independencia, en primer lugar, y los convulsos años del reinado de Fernando VII a continuación, sumieron en la atonía el desarrollo de la red de carreteras, de modo que en 1840 no se había concluido todavía la pavimentación de las seis arterias básicas a las que se ha hecho referencia [Menéndez Pidal, 1951].

Acabada la Guerra Carlista, ya con Isabel II en el trono, la disminución en los gastos bélicos permitió que se incrementara el ritmo de construcción, de modo que, entre 1840 y 1855, se superó la tasa de 300 kilómetros de carreteras/año. Precisamente en 1855 ya se encontraban abiertos al tráfico 10.323 kilómetros de caminos pavimentados, de los que 6.787, el 65,7%, eran carreteras generales, y 3.456, el 34,3% restante, arterias transversales y provinciales. En realidad, al mediar la década de los años cincuenta únicamente se habían cubierto las necesidades básicas de la red principal, quedando pendiente el grueso de la caminería provincial y local [Reguera Rodríguez, 1998; Anes y Álvarez de Castrillón *et al.*, 2004].

De estos años datan también la «Ley de Travesías» (abril de 1849), donde se señalan las obligaciones en orden a la construcción y conservación de carreteras, y la «Ley de Clasificación de Carreteras» (mayo de 1851), que establece cuatro clases: generales, transversales, provinciales y locales [Reguera Rodríguez, 1998]. La importancia que ya por entonces iban tomando los ferrocarriles hizo que esta última fuera sustituida en julio de 1857 por la «Ley de Instrucción Pública», en la que se contemplan conjuntamente carreteras y ferrocarriles [Martínez Alcubilla, 1894]. Así, las carreteras pasaron a clasificarse como vías de servicio público de primero, segundo y tercer orden y en vías de servicio particular.

Tras la primera planificación de carreteras desarrollada por Carlos III, hubo que esperar hasta 1860 para tener un nuevo Plan General de Carreteras en España. Así, el Real Decreto de 7 de septiembre de 1860, modificado por el Real Decreto de 16 de septiembre de 1864, programa la construcción de hasta 36.931 km de nuevas vías [Menéndez Pidal, 1951]. Y en 1877 nacería la **primera Ley de Carreteras de España** (ley de 4 de mayo), a cuya luz se aprobaría un nuevo Plan General (ley de 11 de junio de 1877) en relación a la construcción, conservación y reparación de las carreteras dependientes del Estado, puesto

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

que la Ley diferenciaba estas de las que eran competencia de las provincias, los municipios, los particulares o mixta entre unas y otras [Lazcano Acedo *et al.*, 1999].



Figura 1.4: Carreteras españolas incluidas en el Plan de 1860. Fuente: [Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Fomento, 2008]

Así las cosas, el nuevo siglo se estrenaría con 32.000 kilómetros ya pavimentados en la red estatal, a los que habría que sumar los casi 7.000 km de las diputaciones y 19.300 km de caminos vecinales [Rueda Hernanz, 2006]. De 1911 data la Ley de Caminos Vecinales que suprimiría el Plan General de Carreteras de 1877 y que determinó taxativamente aquellas carreteras que eran competencia del Estado: las terminadas o incautadas hasta esa fecha, las que estuvieran en ejecución y las que «el Ministro de Fomento, oyendo al Consejo de Obras Públicas» incluyera, siempre que procedieran del suprimido plan y cumplieran una serie de requisitos [Ponte Arrebola, 2007].

El siguiente Plan de Carreteras sería el denominado **Plan Gasset**, de 1914, que se mantendría vigente hasta 1939. Con él se programaba de nuevo la construcción de carreteras, pero abordar la reforma de toda la red de carreteras era además tan

imprescindible como impensable en esa época. Por eso, se redujeron las pretensiones de mejora a un puñado de vías principales con dos objetivos fundamentales: fomentar el turismo y atender al tráfico importante de automóviles [Correyero Ruiz y Cal, 2008]. Así lo estipulaba el Real Decreto Ley de 9 de febrero de 1926, que establece la creación de un Circuito Nacional de Firmes Especiales que agrupara a las carreteras que supusieran estos itinerarios principales, enlazando las poblaciones de mayor importancia y los circuitos de valor artístico e histórico, hasta un total de 7.000 km de vías con mayor tráfico en España [Puncel Chornet, 1996]. El Real Decreto, además, obligaba a las diputaciones y ayuntamientos a colaborar en dicho mantenimiento. Entre otras, las medidas que proponía son: la utilización de nuevos firmes, la supresión de los pasos a nivel y la mejora de travesías, curvas y rasantes [Soto Carmona, 1989].

Con la mejora de las calzadas y la evolución del automóvil, cada vez más resistente, la velocidad que se podía alcanzar con un turismo era ya de 65 km/h y así apareció otro problema, el exceso de velocidad, y su consecuencia: las primeras restricciones. El Reglamento de Circulación de 1926 no establece un límite concreto para automóviles y motocicletas sino que obliga a sus conductores a «moderar la marcha y, si preciso fuera, a detenerla al aproximarse a los animales de tiro y de silla que dieran muestras de espanto, así como cuantas veces sea conveniente para la seguridad de las personas y cosas situadas en las vías por las que circulen». Sin embargo, sí se establecen límites para autobuses y camiones: entre 35 y 40 km/h los primeros y entre 30 y 35 los camiones [Menéndez Pidal, 1951].

Los rápidos avances de la industria del automóvil y el desarrollo del transporte de viajeros hicieron necesaria la redacción de un Código de la Circulación, aprobado en septiembre de 1934 [Decreto de 25 de septiembre de 1934]. Con este código se consigue que todos los reglamentos y disposiciones existentes queden recogidos en un solo documento. La nueva normativa sigue sin poner límite de velocidad a los coches, a cuyos propietarios se les vuelve a conminar a ser dueños en todo momento del movimiento y a moderar la marcha si fuera preciso. Introduce, sin embargo, otros cambios: se incrementa, por ejemplo, la velocidad máxima a la que pueden circular los camiones, que pasa de los 30/35 km/h del Reglamento de 1926 a 60/80 para camiones de menos de 8.000 kilos de peso total en carga. Desaparecen los límites para los autobuses.

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Guerra Civil española (1936-1939), catastrófica para el país en todos los órdenes, supuso la destrucción de un incontable número de infraestructuras viarias, y la pérdida de buena parte del parque móvil (de 1934 a 1940 disminuye en casi un 40%) así como el envejecimiento de los vehículos por su exhaustiva utilización durante la guerra y la falta de renovación durante los años de contienda.

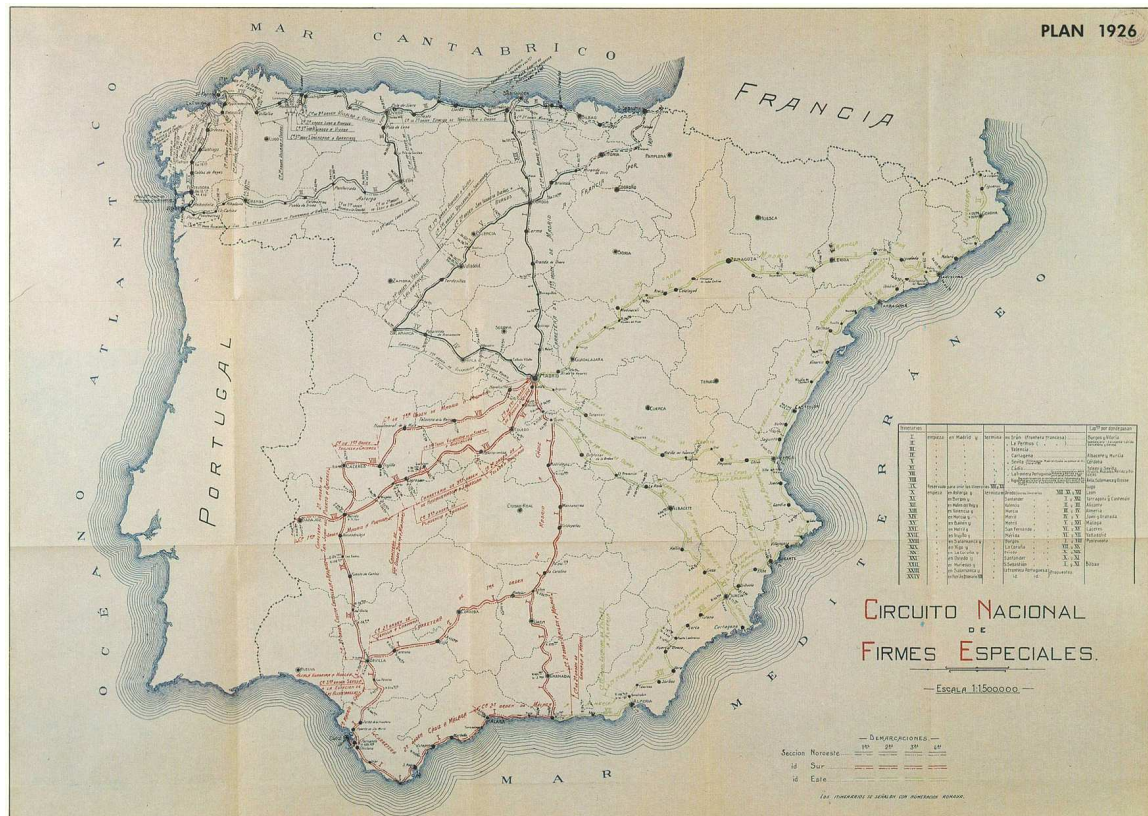


Figura 1.5: Carreteras españolas incluidas en el Plan Peña de 1926. Fuente: [Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Fomento, 2008]

El nuevo Plan General de Carreteras, conocido como **Plan Peña**, fue aprobado por dos leyes, de 11 de abril de 1939 y de 18 de abril de 1941, sustituyendo al Plan de 1914 [Díaz Fernández, 2007]. Comprendía un Plan inmediato y un Plan complementario:

- el Plan inmediato pretendía la reparación de los destrozos causados por la guerra.
- el Plan complementario, cuya ejecución estaba supeditada a su viabilidad financiera, comprendía la construcción de nuevas carreteras y el

acondicionamiento de las existentes a la nueva Instrucción para el Trazado y Construcción de Carreteras de fecha 11 de agosto de 1939.

El nuevo Plan clasificaba las carreteras en: nacionales, con anchura tipo de 9,00 m; comarcales, con anchura tipo de 7,50 m; y locales, con anchura tipo de 6,00 m. Sin embargo, la tarea prevista por el plan se comprobó harto difícil, no solo por los enormes daños provocados en la Guerra, sino por la escasez absoluta de materiales, transporte, medios auxiliares e incluso de mano de obra especializada.

Fruto de este Plan, que aún perdura en la actualidad, es el sistema de identificación de las carreteras nacionales, que luego ha sido trasladado a otras redes, como la andaluza [Pendleton Hart, 1940]. Así, se denominaron las seis carreteras radiales que partían históricamente de Madrid de N-I a N-VI y los seis sectores en que dividían la Península darían lugar a la nomenclatura de las demás mediante unas reglas básicas.

En 1950 confluyen dos importantes hechos. Por un lado, nace la Sociedad Española de Automóviles de Turismo, la SEAT, y, por otro, se aprueba, por ley de 18 de diciembre de 1950, el Plan de Modernización de las Carreteras Españolas. La **SEAT**, primera empresa nacional de fabricación de automóviles, pondría a la venta su primer coche en 1953, y a finales de la década de los 50 circularían más de 50.000 automóviles de esta marca [Font Mezquita y Dols Ruiz, 2004]. El coche ya es el vehículo de transporte por excelencia. Como resultado de la producción de esta firma y de algunas importaciones, entre 1950 y 1960 el número de turismos se triplicó, el de camiones se duplicó y el de autobuses creció un 50%. Y por primera vez en la historia, el transporte de mercancías y viajeros por carretera superó las cifras alcanzadas por las del ferrocarril, que había mantenido su primacía en los años 40 [Requeijo González *et al.*, 2007].

Por su parte, el **Plan de Modernización** tenía como objetivo la mejora del firme por el deterioro sufrido por la red viaria dadas las carencias de medios, la escasa conservación y el previsible aumento de los tráfico por carretera. Así, trató de enfrentarse a dos problemas: el mal estado de los firmes, incapaces de soportar la circulación de vehículos de gran tonelaje, y la falta de adecuación de los trazados a la velocidad que podían ya alcanzar los coches, con lo que también dedicó parte de su presupuesto, además

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

de a la construcción de variantes y a la modificación del trazado en curvas peligrosas, a las siguientes actuaciones [Ministerio de Obras Públicas, 1956]: «Ensanche sistemático a siete metros, equivalente a dos circulaciones rápidas de 3,50 metros; supresión sistemática de los pasos a nivel, excepto aquellos que por las grandes dificultades de orden técnico y económico aconsejen su aplazamiento; variaciones mínimas de trazado, respondiendo a un criterio racional y ponderado».

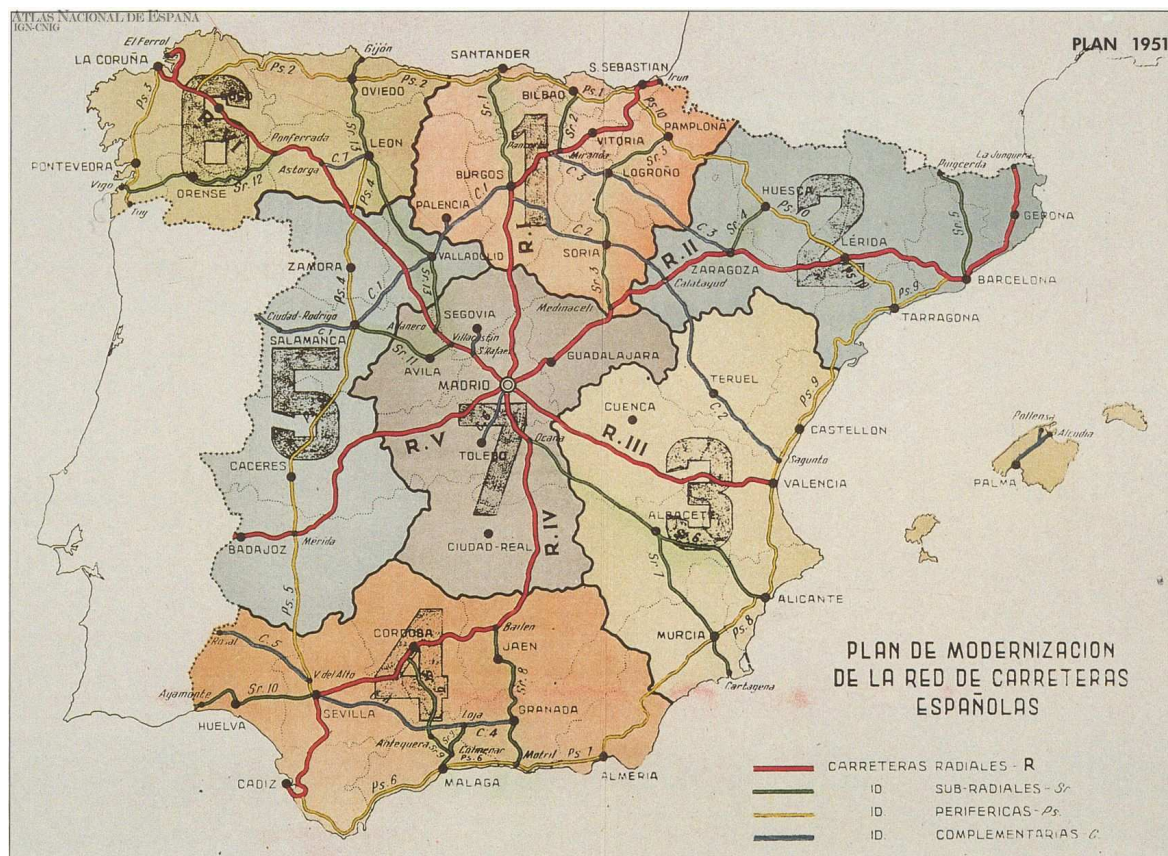


Figura 1.6: Carreteras españolas incluidas en el Plan de 1951. Fuente: [Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Fomento, 2008]

Sin embargo, el Plan, debido fundamentalmente a los insuficientes recursos económicos, solo llegaría a aplicarse en los itinerarios de mayor circulación (que comprendían, según la clasificación efectuada, seis itinerarios radiales, trece subradiales, diez periféricos, nueve complementarios y tres insulares) y no tuvo el éxito buscado en cuanto al arreglo de los firmes, que siguieron deteriorándose por el paso de los camiones [Macías Muñoz, 2002]. La red afectada, cuyo acondicionamiento se llevaría a cabo entre 1951 y 1955, totalizaba 10.909 km.

El inicio de la política de carreteras de peaje aparece con la Ley de 26 de febrero de 1953, en la que se prevé la concesión administrativa. La fórmula solo se aplica a las carreteras con una intensidad de tráfico suficiente como para ser rentables a la empresa privada concesionaria, que tenía que pagar la construcción y el mantenimiento a cambio de cobrar el peaje. De todos los tramos que cumplían estos requisitos, solo uno llegó a realizarse al amparo de esta Ley, el túnel de Guadarrama, cuya concesión se otorga en 1960, y comprendía el túnel y sus accesos desde el kilómetro 51 hasta el 60 de la N-VI (Madrid – La Coruña), que fueron abiertos al servicio público el 5 de diciembre de 1963 [Rodríguez, 2009(b)].

El siguiente Plan General de Carreteras sería el correspondiente al de los años 1962-77, aprobado por la Ley de 23 de diciembre de 1961, pero en él no se relacionan las obras a realizar, por lo que su programación se suponía había de ser efectuada según su necesidad. A este período pertenece la **Ley de Carreteras 51/1974**, de 19 de diciembre, que sustituyó a la hasta entonces vigente de 1877.

El fin de la dictadura y la transición a la democracia produce un reajuste de toda la política nacional, que afecta por supuesto a las carreteras y no de forma muy positiva. Los primeros gobiernos de la Monarquía tienen demasiados problemas para invertir en infraestructuras viarias y, sobre todo, porque a la nueva situación de incertidumbre política se suma un acontecimiento económico de carácter internacional: la crisis del petróleo, que comenzó en 1973 con la guerra árabe-israelí del Yom Kippur [Ocampo Suárez-Valdés, 2006]. La crisis alcanza a nuestro país con una subida sin precedentes hasta entonces de los precios del crudo que modifica todos los planes sobre infraestructuras para el transporte. Todo ello se refleja en una caída de las inversiones, que desaparecen prácticamente para autopistas de peaje y disminuyen mucho en el resto, aunque las inversiones en conservación se mantienen [Díaz Fernández, 2007].

Y otros aspectos fundamentales de este final del siglo XX en nuestro país, que afectarían también a las carreteras, fueron el **traspaso de competencias a las comunidades autónomas y la entrada de España en la Comunidad Europea**, que supuso un nuevo reto para la red nacional de carreteras, pero reforzó la inversión en infraestructuras viarias dentro del nuevo Plan General de Carreteras 1984-93.

Por su parte, tras un intenso debate político y social, en 1984 comienza el traspaso de competencias en carreteras a todas las Comunidades Autónomas, excepto Cataluña, Galicia, Navarra y el País Vasco, que ya lo habían conseguido con anterioridad [Abad Licerias *et al.*, 2007]. Desde febrero a septiembre, trece Reales Decretos van estableciendo el cambio en la gestión de un número determinado de infraestructuras viarias, que desde entonces pasaban de la gestión del Estado a ser de competencia autonómica dentro de sus territorios, tanto en construcción de nuevos kilómetros como en las materias de explotación, conservación y mantenimiento. De 79.632 kilómetros de vías, el Estado se queda tan solo con 20.108 una vez finalizado este proceso, es decir, un 77% menos. Sin embargo, según reza la Memoria del entonces Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, el tráfico que por estas carreteras estatales circula se reduce solo un 40%, «debido a que en los itinerarios que constituyen ésta (red) es donde se producen las mayores intensidades de tráfico». Pero no hay que olvidar las carreteras que siguen bajo tutela de las Diputaciones Provinciales, que suman en torno a los 70.000 km y que permiten el acceso a muchos municipios y son determinantes en la ordenación del territorio y la redistribución de la riqueza. Pese a ello, son carreteras que, históricamente, han estado marcadas por la adversidad de todo tipo: geológica, geotécnica, orográfica, climática, de inseguridad presupuestaria, de equipos, de explotación...

De este modo, el **nuevo Plan**, que afecta ya solo a los 20.000 kilómetros de la Red del Estado, se articuló en cuatro programas en un marco más favorable gracias a la estabilidad política del país y la mejora de la situación económica general [Puncel Chornet, 1996]:

- Autovías. Planifica el desarrollo de itinerarios completos de alta capacidad, con las características propias de las autopistas pero sin peaje y aprovechando al máximo la infraestructura existente.
- Acondicionamiento de la Red. Propone la modernización y mejora de los trazados en los principales itinerarios no incluidos en el programa de autovías, y la supresión de las travesías más conflictivas.

- Reposición y conservación. Su campo de actuación era el resto de las carreteras no incluidas en los apartados anteriores, en total, unos 8.320 km. Incidía en la pavimentación y la señalización para aumentar la seguridad vial.
- Actuaciones en medio urbano. Su finalidad era garantizar las condiciones de servicio de las carreteras a su paso por áreas urbanas, mejorando los accesos a estas así como a puertos y aeropuertos.



Figura 1.7: Autovías incluidas en el Plan de 1984 en España. Fuente: [Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Fomento, 2008]

A esta etapa corresponde igualmente la formulación de la nueva **ley de carreteras del Estado, de 29 de julio de 1988**, que se adapta a la nueva configuración autonómica de España y se ciñe a las carreteras de interés general del Estado [Ley 25/88 de España, 1988], vigente hasta la actualidad con algunas modificaciones.

De este modo, y en el ámbito concreto de Andalucía, la nueva Administración Autonómica debía hacer frente a su propia planificación y gestión de las carreteras incluidas en su red y para ello en primer lugar tuvo que atender a los principales déficits en

cuanto a sus características técnicas y niveles de servicio, además de la estructura radial con respecto al centro de la Península que se manifestaba insuficiente para el desarrollo de la cohesión territorial interna de Andalucía, así como de sus relaciones con las regiones vecinas. Así surgió el primer **Plan General de Carreteras de Andalucía 1987-1994** que definió diversos programas y prioridades de actuación sobre la red autonómica, coordinadas con las actuaciones previstas en el plan estatal, apoyándose en la nueva jerarquización de la red de carreteras de Andalucía, que distingue entre la Red Autonómica (que engloba a su vez a las redes básica, intercomarcal y complementaria) y la Red Provincial [COPT, 1987].

Paralelamente, a nivel estatal, una vez concluido el período de vigencia del Plan de 1984 y tras el importante impulso dado a las infraestructuras para los acontecimientos de 1992 en España, el Gobierno diseñó una nueva programación de la inversión en carreteras a través de denominado **Plan Director de Infraestructuras 1993-2007**, en el que las exigencias de contención del déficit público, como consecuencia de los acuerdos adoptados en el Tratado de Maastricht de 1993, obligaron a buscar nuevas fórmulas de financiación que permitieran continuar con el desarrollo viario en los grandes ejes de circulación [Iglesias Pérez, 1994]. Debido a ello, el Plan, deja las autovías en un segundo plano y son las autopistas de peaje las que toman protagonismo mediante la aplicación del denominado Sistema Alemán de financiación, el peaje en sombra o la ampliación de concesiones a las empresas privadas. Aparte de ello, actuaciones en materia de seguridad vial y conservación de la red también tienen su parte dentro del Plan.

A este Plan siguieron el Plan Estratégico de Infraestructuras del Transporte (PEIT 2005-2020), que incluía buena parte de los proyectos no concluidos de la anterior programación, y el actualmente vigente Plan de Infraestructuras, Transporte y Vivienda (PITVI 2012-2024), que de la misma manera se ha visto mermado en cuanto a la inversión debido a la crisis económica y la modificación de prioridades por parte de los gobiernos del Estado, por lo que el ritmo de construcción de nuevas carreteras y mejora de las existentes se ha ralentizado enormemente.

Por su parte, en Andalucía, a la finalización del primer plan, las modificaciones sustanciales que se produjeron en los aspectos sociales y económicos de la región, el nuevo

marco normativo de la ley 25/1988 y de ley 1/1994, de 11 de enero, de Ordenación del Territorio de la Comunidad Autónoma Andaluza, junto con las nuevas programaciones de inversiones de la Unión Europea, hicieron necesaria la revisión del planteamiento viario en Andalucía y como resultado fue formulado el nuevo Plan General de Carreteras de Andalucía 1997-2007 dentro del **Plan Director de Infraestructuras de Andalucía** [Romero Pérez, 1998]. Los objetivos y criterios de actuación que incorporaba este nuevo Plan eran, entre otros, completar la estructura de la Red de Carreteras de Andalucía y perfeccionar su organización y capacidad, así como mejorar la seguridad y la integración de las carreteras.

En este contexto se produce una importante aportación, como es la **Ley de Carreteras de Andalucía**, aprobada el 12 de julio de 2001 y que buscaba adaptar la normativa básica del Estado a las particularidades de la red de carreteras de Andalucía y resolver los problemas que su aplicación supletoria causaba [Ley 8/2001 de Andalucía, 2001]. Al amparo de esta ley, el Gobierno Andaluz puso en marcha el denominado Plan MÁS CERCA («Plan de Mejora de la Accesibilidad, Seguridad vial y Conservación En la Red de Carreteras de Andalucía») que recogía la planificación de carreteras autonómicas en el horizonte temporal 2004-2010 [COPT, 2004] y que posteriormente fue complementado en el Plan de Infraestructuras para la Sostenibilidad del Transporte en Andalucía (PISTA) 2007-2013, actualmente vigente en la Comunidad Autónoma al haber sido prorrogado hasta 2020 tras la caída de la inversión en los últimos años y la «reprogramación» *sine die* de buena parte de las infraestructuras comprometidas.

De hecho, la situación actual refleja que la Administración andaluza no está siguiendo dicha planificación y ha relegado totalmente el inicio de actuaciones de nuevo trazado, acondicionamiento de ejes existentes o mejoras locales de la red (como es el caso del Plan de Acción contra el Ruido formulado en 2008 y que más adelante se detallará) y mantiene solo inversiones en materia de conservación, incluso por debajo de los ratios deseables, todo ello en favor de nuevos planes surgidos, como el Plan Andaluz de la Bicicleta, centrado en la construcción de nuevos viales exclusivamente para el tráfico ciclista y peatonal.

No obstante lo anterior, fruto destacable de dichos planes de carreteras ha sido la construcción de una parte importante de las variantes de trazado en las carreteras andaluzas, que permiten salvar el paso de los vehículos por las travesías de los pueblos y ciudades, así como se han acondicionado tramos para dotarlos de mejor nivel de servicio y seguridad y se ha aumentado la capacidad de otros mediante los desdoblamientos y nuevas autovías.

Todo ello da lugar a la concepción actual de las carreteras en España y concretamente en Andalucía, así como el contexto en que se encuentran las infraestructuras viarias enmarcadas en el territorio, que condiciona sobremanera todos los estudios que se lleven a cabo sobre ellas, como el que ocupa a la presente investigación. A estos aspectos históricos deben sumarse los que se detallan a continuación para poder comprender satisfactoriamente la presente situación de las carreteras en nuestro entorno.

1.1.2. Aspectos técnicos.

Como ya se ha dicho, las más antiguas carreteras aún conservadas en España son las construidas por los romanos, compuestas comúnmente en un espesor de 90 a 120 cm por tres capas de piedras argamasadas cada vez más finas y una capa de bloques de piedras encajadas en la parte superior [Moreno Gallo, 2006]. Fueron unos excelentes pavimentos y unas magníficas estructuras para la época que perdurarían muchos años, aunque la desorganización y decadencia de la Edad Media, como ya se ha dicho, llevaron al abandono a la red viaria, por lo que el deterioro en esos siglos fue muy importante. De hecho, no sería hasta el siglo XI cuando la Iglesia comenzó a reparar algunas calzadas y puentes, destacando el Camino de Santiago en nuestro país, al que está ligado de forma eminente Santo Domingo de la Calzada [Uriol Salcedo, 2001].

Sin embargo, el medievo y la Edad Moderna fueron años sin avance en la técnica de obra caminera y se siguieron utilizando prácticas antiguas. Habría que esperar hasta el siglo XVIII para encontrar perfeccionamientos en los métodos de construcción de carreteras, llegados de la mano de los ingenieros británicos Thomas Telford y John Loudon

McAdam y del ingeniero de caminos francés Pierre-Marie-Jérôme Trésaguet [Martín Frechilla y Tesera Arnal, 2001].

El **sistema de Trésaguet y Telford** implicaba cavar una zanja e instalar cimientos de roca pesada. Los cimientos se levantaban en el centro para que la carretera se inclinara hacia los bordes permitiendo el desagüe. La parte superior de la carretera consistía en una capa de 15 cm de piedra quebrada compacta [Zorio Blanco, 1987]. El **sistema de McAdam** mantenía que la tierra bien drenada soportaría cualquier carga, así que modificó el método anterior y la capa final de piedra quebrada se colocaba directamente sobre un cimiento de tierra que se elevaba del terreno circundante para asegurarse de que desaguaba y la rociaba con agua para disolver arenas y sales, ayudando la adherencia y el aglutinamiento de la capa.

El sistema de McAdam, llamado *macadamización*, se adoptó en casi todas partes, sobre todo en Europa, y se hicieron vías hasta del 12% de pendiente. Sin embargo, los cimientos de tierra de las carreteras de macadán no pudieron soportar los camiones pesados que se utilizaron en la I Guerra Mundial. Como resultado, para construir carreteras de carga pesada se adoptó el sistema de Telford, ya que proporcionaba una mejor distribución de la carga de la carretera sobre el subsuelo subyacente [Bañón Blázquez y Beviá García, 2000].

Por entonces se produjo la publicación del que se considera como el primer tratado español en la materia, la «Memoria de la Construcción del Pavimento o Firme de los Caminos» del Comisario Barra (1826), que recogía los conocimientos técnicos de la época.

Pero los viajes por estos caminos se hacían largos y agotadores, y ello provocó el declive de las carreteras mientras el ferrocarril se imponía como el principal medio de transporte tanto de viajeros como de mercancías al ser más rápido, confortable, económico y seguro. Este hecho tuvo lugar en la última mitad del siglo XIX y coincide con la introducción del ladrillo y el asfalto como pavimento para las calles de las ciudades [Sánchez Lázaro, 1994]. En este ámbito, y dentro del primer Plan General de Carreteras de la época de Isabel II, la Real Orden de 6 de agosto de 1860 fijó las anchuras de las

carreteras en 8,00, 7,00 y 6,00 metros para las de primero, segundo y tercer orden, respectivamente [Lazcano Acedo *et al.*, 1999].

De esta manera entraron las carreteras en el siglo XX, diseñadas para el tránsito de carros y carretas, coches de caballos y diligencias. Es precisamente en el año 1900 cuando los españoles contemplaron por primera vez, atónitos, cómo por las calles de sus ciudades circulaban unos curiosos vehículos que no necesitaban de la ayuda animal para moverse: el **automóvil** [Uriol Salcedo, 2001]. Y ha sido sin duda este artefacto el que ha determinado la historia de la técnica de construcción de las carreteras en España y en el mundo entero. Por ello, muy pronto las calzadas quedaron obsoletas, ya que sus características no se adaptaban a las nuevas necesidades de los vehículos a motor: curvas cerradas, fuertes desniveles y un pavimento que desprendía tanto polvo al paso de los vehículos que transeúntes y conductores apenas podían soportarlo [Bañón Blázquez y Beviá García, 2000].

En esta nueva etapa tendrían un papel determinante, por un lado, el **alquitrán** para los pavimentos (que permitió, además, que las carreteras ganaran en resistencia: de los tres años que duraban los firmes ordinarios, se consigue llegar a siete u ocho) y, por otro, el **hormigón armado**, invento del ingeniero François Hennebique que revolucionaría el sistema de construcción de obras de fábrica y haría pasar a la historia los antiguos puentes de piedra o los hasta entonces nuevos de hierro [Rueda Hernanz, 2006]. Al mismo tiempo, comienza a sustituirse la mano de obra por maquinaria de construcción: apisonadoras, tanques para el agua, hormigoneras... Pero todo ello elevó el coste de construcción a 22 céntimos por metro cuadrado, de modo que en 1910 los costes de construcción de un kilómetro de carretera nueva oscilaban entre las 11.500 y las 46.500 pesetas, siendo la media para España de 23.800 pesetas [Uriol Salcedo, 2001].

Aunque el empleo del alquitrán en pavimentación se remonta a mediados del siglo XIX cuando se ejecutaron algunas carreteras y vías urbanas en el Reino Unido, no sería hasta 1870 cuando se empezaron a realizar en Estados Unidos mezclas fabricadas a partir de rocas asfálticas y de asfaltos naturales [Kraemer *et al.*, 2001]. Ya a finales de ese siglo, el norteamericano C. Richardson sentó las bases de la tecnología de mezclas bituminosas para pavimentación, aunque la industria de fabricación en central se desarrolló solo

después de la I Guerra Mundial y el principal desarrollo tecnológico de estos materiales vendría dado por las necesidades de construcción acelerada de aeródromos militares en la II Guerra Mundial.

De esta manera, en la década de los 20 del pasado siglo se inicia la sustitución de la tracción animal por la mecánica en el transporte público de viajeros por carretera. Las diligencias que aún no habían sucumbido al empuje del tren van desapareciendo ante la llegada de los primeros autobuses interurbanos. Por el contrario, el transporte de mercancías en carro aumenta [Menéndez Pidal, 1951]. La crisis ferroviaria y la escasez de camiones, junto con una coyuntura alcista de la economía española, favorecían este desarrollo. En trayectos cortos y medios, resultaban más cómodos que el tren, pues evitaban la rotura de la carga al pasarla de uno a otro y permitían llevar la mercancía hasta su destino final.

El problema era que el tránsito de estos carros dañaba enormemente el firme, pues sus ruedas metálicas se clavaban en el pavimento. En algunos tramos el tráfico de carros era tan intenso y el deterioro del firme tan rápido que tuvieron que construirse en las carreteras unos carriles metálicos en forma de U por los que discurrían las ruedas [Sanchís Tarazona, 1897]. Los elevados gastos de la administración en conservación y reparación confirman el esfuerzo por mantener los firmes en buen estado, pero también que las soluciones técnicas que se empleaban no eran las adecuadas, así que una de las medidas paliativas que se tomaron en el Reglamento de Conservación de Carreteras de octubre de 1920 fue la de exigir una anchura mínima en las llantas de estos vehículos [Lazcano Acedo *et al.*, 1999].

España se configura en el segundo cuarto del siglo XX como una potencia turística, avalada por una gran riqueza artística y cultural. Las autoridades son conscientes de que deben fomentar ese turismo y que, para ello, han de ofrecer a los viajeros unas carreteras sin baches ni polvo, unas carreteras cómodas y también seguras [Correyero Ruiz y Cal, 2008]. Con este espíritu nació el programa del **Circuito Nacional de Firmes Especiales**, proyecto que permitió cambiar radicalmente el estado de nuestras carreteras mediante la utilización de las mezclas bituminosas basadas en el alquitrán. Tanto es así que los expertos que visitaban nuestro país quedaban gratamente sorprendidos por las visibles

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

mejoras. Por un lado, se habían eliminado las curvas peligrosas, y por otro, se habían peraltado sus bordes exteriores para contrarrestar la fuerza centrífuga. Y esto sí era una novedad para nuestros vecinos europeos, pues esta técnica sólo se había aplicado hasta ahora en los circuitos de carreras [Díaz Fernández, 2007].

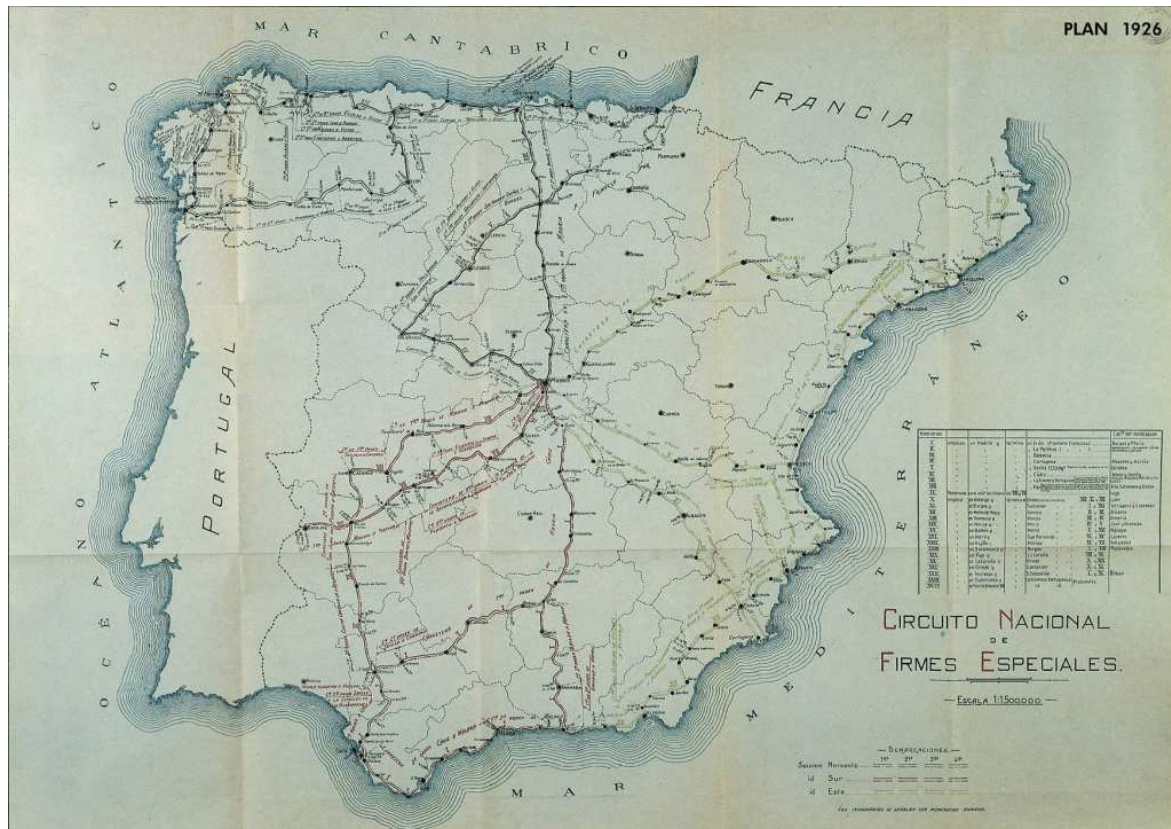


Figura 1.8: Carreteras españolas incluidas en el Plan del Circuito Nacional de Firms Especiales. Fuente: [Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Fomento, 2008]

También por estos años comienza a hablarse en Europa de **autopistas**. En Italia, en 1921, el ingeniero Piero Puricelli propone la construcción de una red de carreteras exclusiva para vehículos automóviles y con peaje para cubrir los costos de la construcción y mantenimiento. Esta red debía caracterizarse por tener separados los carriles de circulación de uno y otro sentido, así como por no tener cruces a nivel, disponer de curvas amplias, eludir el paso por núcleos habitados y estar vallada. La idea cala rápidamente en la administración y en las empresas, y España quiso seguir los pasos de Italia: en 1928 se autorizan los concursos para otorgar las concesiones de construcción y explotación de las autopistas Madrid-Valencia, Madrid-Irún y Oviedo-Gijón [Uriol Salcedo, 2001]. La primera tenía gran importancia porque servía de unión entre la capital y el puerto

mediterráneo más cercano. La última, por ser Asturias un importante centro turístico y por una cuestión estratégica: unía Oviedo, centro de todos los ferrocarriles asturianos, con el puerto de Gijón. En 1929 se concede autorización para iniciar el estudio de 14 autopistas más [Díaz Fernández, 2007].

Pero en 1932, con la llegada de la Segunda República, quedaron sin efecto todos los proyectos, y posteriormente la Guerra Civil dio al traste con todos los planes de desarrollo vial [García Ortega, 1984]. Las vías rápidas tendrían que esperar más de tres décadas, hasta que en la década de los 60 se adjudicaron los primeros tramos de autopistas, entre las que se encuentra la Sevilla – Cádiz, así como se iniciaron los desdoblamientos de algunas de las entradas a las grandes ciudades, como las nacionales en Madrid [Puncel Chornet, 1996].

Pero por su importancia general y para Andalucía en particular, del período franquista destaca el «Plan de Mejora de la Red de Itinerarios Asfálticos» de 1967, conocido como el **Plan REDIA**, y cuyo objetivo era actuar sobre los 12 itinerarios con mayor intensidad de tráfico [Rodríguez, 2009(a)]: en total, unos 5.000 kilómetros en los que se pretendía reforzar los firmes con capas de aglomerado asfáltico, generalizar el ancho de calzada en los 12 metros, arcenes incluidos; construir carriles de circulación lenta para vehículos pesados; y completar la señalización vertical y horizontal. La inversión prevista para este Plan era de 20.000 millones de pesetas repartidos entre los años 1967 y 1971 [Herce Vallejo y Magrinyà Torner, 2003].

A partir de ahora, aunque con algunas excepciones, las inversiones en carreteras irán aumentando cada año. Una partida importante se destinó a la ampliación y mejora de las vías de acceso o circunvalación de las ciudades. Se construyeron más de 370 kilómetros de autovías y autopistas urbanas o suburbanas [Díaz Fernández, 2007]. Y aunque los kilómetros de autopista construidos aumentaban, y el país se desarrollaba en todos los sentidos, todavía existían y circulaban por nuestras carreteras los carros de caballos, más de un millón en 1961. No desaparecieron del todo hasta los años 70.

Paralelo al Plan REDIA se puso en marcha el «**Plan de Transformación de los Firmes de Macadam**», que logra que en 1978 los 80.000 km de la red del Estado fueran

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

de asfalto y redujo enormemente los tramos de carreteras que tenían firme compuesto solo por un tratamiento superficial. A principios de los años 80 se ensayan las primeras mezclas drenantes, que como más adelante se verá son importantes en el ámbito del ruido que se trata [Rodríguez, 2009(a)].

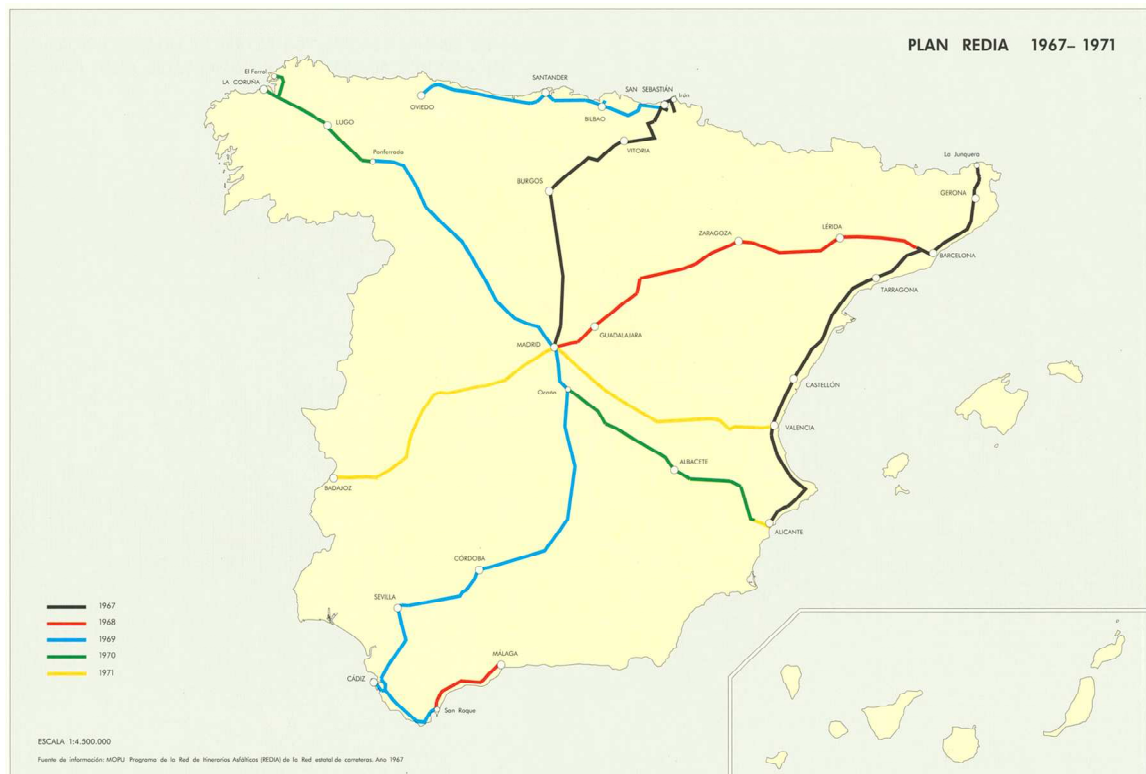


Figura 1.9: Carreteras españolas incluidas en el Plan REDIA. Fuente: [Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Fomento, 2008]

La bonanza económica, el aumento del parque automovilístico y la entrada de España en la Unión Europea obligaron a aumentar la cantidad y calidad de actuaciones, pero también permitió acceder al país a la financiación europea para muchos de sus proyectos de infraestructuras viarias, y gracias a ello el Plan General de Carreteras 1984-1993 permitió la construcción de buena parte de las autovías en la red nacional [Puncel Chornet, 1996]. También en esta década de los 80, el Gobierno impulsó las llamadas «carreteras inteligentes», con la instalación de los primeros postes SOS en las carreteras (hoy ya obsoletos debido a los avances en telefonía móvil), cámaras y sensores bajo el asfalto para el control de la velocidad y medición del tráfico [Rodríguez, 2009(a)]. A ellos se van sumando en la actualidad otras iniciativas, como los paneles de señalización

variable, teléfonos y plataformas de Internet de información sobre tráfico y condiciones de circulación, así como los nuevos sistemas de «señalización inteligente», cuyos mensajes se pretende que cambien y se muestren de forma automática en función de la medición de determinados parámetros o variables.

A partir del año 2002, por primera vez en muchas décadas, las inversiones en ferrocarril superaron a las de las carreteras, tendencia que se mantiene hasta la actualidad [Requeijo González *et al.*, 2007], sumado a los recortes debido a la crisis. Ello ha llevado a que los criterios de sostenibilidad y ahorro estén más presentes que nunca en el diseño de las nuevas carreteras y las acciones de conservación de las existentes, de ahí que ya sean cada vez más comunes los proyectos que incluyen materiales reciclados bien a partir de las propias carreteras o bien de desechos de otras actividades, como el polvo de neumático o las escorias, entre otros.

Esta actual diversificación y modernización de los materiales y técnicas influye igualmente en las soluciones contra el ruido producido por el tráfico de las carreteras, como más adelante se detallará.

1.1.3. Aspectos socioeconómicos.

Prácticamente desde sus inicios, el **tráfico** tanto de viajeros como de mercancías por el interior de España a través de carretera ha crecido de forma continua y en mayor medida por carretera respecto de los demás modos de transporte, tanto en términos absolutos (viajeros o toneladas) como relativos (viajeros·km y tn·km) [Kraemer *et al.*, 2001]. Esto hace que sea el modo de transporte predominante, aunque en los últimos años, debido en parte a la crisis económica, estos datos se han visto reducidos, hasta en un 15% en tres años. Sin embargo, en relación con los demás modos de transporte la carretera sigue representando cerca del 90% del total del transporte de viajeros y del 75% del total de mercancías en el interior de España [Ministerio de Fomento, 2012]. Datos similares pueden observarse en ámbitos urbanos, mientras que para el transporte internacional sí ganan importancia otros modos de transporte, destacando el marítimo para las mercancías y el

aéreo para los viajeros, aunque en este último caso sigue siendo preponderante el transporte por carretera [Kraemer *et al.*, 2001].

En la actualidad, la **longitud de las carreteras españolas** en su conjunto (sin contar las vías urbanas) asciende aproximadamente a unos 165.000 km, en los cuales se engloban las redes dependientes de los diferentes organismos existentes en el país. Así, la denominada «Red de Interés General del Estado» (RIGE), dependiente del Ministerio de Fomento, asciende a los 26.000 km, mientras que la red dependiente de las Comunidades Autónomas supera los 71.000 km. Finalmente, la red a cargo de Diputaciones Provinciales y Cabildos Insulares sobrepasa los 68.000 km.

Por su parte, la longitud de las vías urbanas, es decir, las que son gestionadas por los Ayuntamientos y que tampoco tienen la consideración de carreteras es de 128.180 km. Pero a estas habría que sumar otros viales, considerados interurbanos, pero que también son dependientes de los Ayuntamientos o entidades locales, que representan un total de 361.517 km en toda España (la mayor parte de los cuales no son pavimentados, mientras que la práctica totalidad del viario urbano está pavimentado). Todo ello hace que la red gestionada por las administraciones de ámbito municipal ascienda a un total de 489.697 km [Ministerio de Fomento, 2012].

La cifra total sube en 11.355 km cuando se contabiliza la longitud de otro tipo de vías, que están a cargo de otros organismos (como el Ministerio de Defensa, las Confederaciones Hidrográficas, etc.) y que sirven de acceso a terrenos o diferentes instalaciones, explotaciones agrícolas, industriales o forestales.

De este modo, la longitud total de carreteras y caminos de España alcanza la cifra de 666.647 km.

Como ya se ha dicho anteriormente, antes de la existencia de las autonomías, la red de carreteras en España sólo se dividía entre la RIGE y las carreteras dependientes de los entes provinciales o cabildos insulares, en una proporción del 54,3% para el Estado y el 45,7% para las provincias [Ministerio de Fomento, 2012]. Sin embargo, cuando entró la nueva Administración Autonómica, la nueva distribución cambió al 16% para el Estado,

43% para las Comunidades Autónomas y el 41% para las Diputaciones y Cabildos Insulares. Cuando se atiende solo a las vías de gran capacidad, el 71% es estatal, el 23% es autonómica y el resto provincial. Atendiendo a las convencionales, la distribución Estado-Autonomías-Provincias cambia al 10-45-45% (tabla 1.1).

Tabla 1.1: Red de carreteras por competencia y tipo de vía antes y después de las transferencias a las Comunidades Autónomas. Unidades: km (% respecto de total nacional). Fuente: elaboración propia a partir de [Ministerio de Fomento, 2012].

| | 1980 | 1980(%) | 1995 | 1995(%) | 2012 | 2012(%) |
|---|---------|---------|---------|----------|---------|----------|
| RED A CARGO DEL ESTADO | 81.167 | 54,26% | 22.926 | 14,10% | 26.038 | 15,72% |
| Vías de gran capacidad | 1.933 | 100,00% | 6.274 | 77,14% | 11.535 | 70,62% |
| Resto de la red | 79.234 | 53,67% | 16.652 | 10,78% | 14.503 | 9,72% |
| RED A CARGO DE LAS COMUNIDADES AUTÓNOMAS | 0 | 0,00% | 75.553 | 46,46% | 71.381 | 43,11% |
| Vías de gran capacidad | 0 | 0,00% | 1.572 | 19,33% | 3.740 | 22,90% |
| Resto de la red | 0 | 0,00% | 70.981 | 45,95% | 67.642 | 45,32% |
| RED A CARGO DE LAS DIPUTACIONES Y CABILDOS | 68.409 | 45,74% | 67.138 | 41,29% | 68.176 | 41,37% |
| Vías de gran capacidad | 0 | 0,00% | 287 | 3,53% | 1.060 | 6,49% |
| Resto de la red | 68.409 | 46,33% | 66.851 | 43,27% | 67.115 | 44,97% |
| TOTAL | 149.576 | | 162.617 | (+8,72%) | 165.595 | (+1,83%) |
| Vías de gran capacidad | 1.933 | 1,29% | 8.133 | 5,00% | 16.335 | 9,86% |
| Red convencional | 147.643 | 98,71% | 154.484 | 95,00% | 149.260 | 90,14% |

Cuando se analizan los datos históricos de la red, gracias a las series del Instituto Nacional de Estadística (INE) y del Ministerio de Fomento, se observa que la longitud total de carreteras en España ha aumentado en casi 10.000 km en los últimos 25 años, aunque la mayor parte de este crecimiento se ha desarrollado en la última década del siglo, mientras que desde el año 2000 esta tasa de construcción de nuevas carreteras se ha relajado. Sin embargo, diferenciando entre el tipo de red se observa que la Red Estatal sí ha mantenido un crecimiento constante, alcanzando un 25% más en este período, pero esta variación contrasta con la mínima variación de las Redes Autonómicas, cuya cifra total oscila en todos estos últimos 25 años en torno a los 71.000 km. Por su parte, la red provincial también mantuvo un ligero aumento hasta 2005, pero a partir de ese año incluso se ha

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

reducido levemente su longitud total. En la tabla 1.2 se representan valores significativos del período analizado.

Tabla 1.2: Red de carreteras por competencia, tipo de vía y período 1990-2010. Unidades: km. Fuente: elaboración propia a partir de [Ministerio de Fomento, 2012].

| | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| RED A CARGO DEL ESTADO | 20.701 | 22.926 | 24.105 | 25.415 | 25.733 |
| Vías de gran capacidad | 4.100 | 6.274 | 7.656 | 9.465 | 11.249 |
| Resto de la red | 16.601 | 16.652 | 16.449 | 15.950 | 14.484 |
| RED A CARGO DE LAS COMUNIDADES AUTÓNOMAS | 71.063 | 72.553 | 70.837 | 70.755 | 71.464 |
| Vías de gran capacidad | 1.331 | 1.572 | 2.088 | 2.746 | 3.642 |
| Resto de la red | 69.732 | 70.981 | 68.749 | 68.009 | 67.822 |
| RED A CARGO DE LAS DIPUTACIONES Y CABILDOS | 64.479 | 67.138 | 68.615 | 69.476 | 68.590 |
| Vías de gran capacidad | 193 | 287 | 699 | 945 | 1.074 |
| Resto de la red | 64.286 | 66.851 | 67.916 | 68.531 | 67.516 |
| TOTAL | 156.243 | 162.617 | 163.557 | 165.646 | 165.787 |
| <i>Variación respecto dato anterior</i> | | +4,13% | +0,58% | +1,28% | +0,09% |
| Red convencional | 150.619 | 154.484 | 153.114 | 152.490 | 149.822 |
| Vías de gran capacidad | 5.624 | 8.133 | 10.443 | 13.156 | 15.965 |
| % vías de gran capacidad | 3,60% | 5,00% | 6,38% | 7,94% | 9,63% |

Estos datos varían cuando se discriminan en función del **tipo de vía**, es decir, diferenciando la red de alta capacidad (formada por autovías, autopistas de peaje y carreteras de doble calzada) de la red convencional, puesto que la longitud de vías de gran capacidad se ha quintuplicado en España en los últimos 25 años, de modo que han pasado de sumar 3.654 km en 1988 (sólo el 2,35% de la longitud total de carreteras) a los 16.335 km de 2012 (9,86% del total) [Ministerio de Fomento, 2012].

Sin embargo, al comparar las carreteras españolas con la de otros países de la Unión Europea, se observa la menor densidad de nuestra red, debido al menor grado de desarrollo económico de España, pero sobre todo a la menor densidad de población y a su distribución por la península, con predominio de zonas periféricas [Kraemer *et al.*, 2001].

En el caso de Andalucía, es la comunidad autónoma que mayor longitud de carreteras de alta capacidad posee de toda España, un total de 2.587 km, mientras que en longitud total es la segunda, sólo por detrás de Castilla y León [Ministerio de Fomento, 2012]. Por su parte, la evolución en los últimos 25 años es casi mínima en datos globales de red, aunque en términos relativos mantiene la misma pauta de comportamiento que a nivel nacional, diferente entre la última década del siglo XX y los primeros años del siglo actual, así como en función de la competencia de la red (tabla 1.3). Por tanto, el crecimiento en estos últimos 25 años de la Red Estatal en Andalucía alcanza igualmente el 25%, pero en el caso de la Red Autonómica, el aumento que ha tenido lugar es sensiblemente superior a la media de las redes a cargo de las Comunidades Autónomas en general, puesto que en el caso andaluz su red propia se ha incrementado en más de 5% frente al escaso 0,7% del dato global. En relación con las carreteras dependientes de las Diputaciones Provinciales, estas han visto reducida su longitud de red en cerca de un 10%.

Tabla 1.3: Red de carreteras de Andalucía por competencia y período 1990-2010. Unidades: km. Fuente: elaboración propia a partir de [Ministerio de Fomento, 2012].

| | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | Variación 1990-2010 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------|
| RED NACIONAL | 2.639 | 3.055 | 3.230 | 3.359 | 3.299 | +25,01% |
| RED AUTONÓMICA | 9.871 | 10.572 | 10.799 | 10.617 | 10.382 | +5,18% |
| RED PROVINCIAL | 10.876 | 10.967 | 10.534 | 10.624 | 9.804 | -9,86% |
| TOTAL | 23.386 | 24.594 | 24.563 | 24.600 | 23.485 | +0,42% |

De nuevo, cuando se observan las variaciones en las longitudes de red en Andalucía atendiendo a las vías de gran capacidad, los aumentos vuelven a ser muy importantes, e incluso mayor cuando se compara con las medias nacionales (tabla 1.4). Así, en relación con las autovías, su longitud se ha quintuplicado en el período 1990-2010, pasando de los 400 km a los alrededor de 2.200 km actuales.

Tabla 1.4: Red de carreteras de alta capacidad de Andalucía por tipo de vía y período 1990-2010. Unidades: km. Fuente: elaboración propia a partir de [Ministerio de Fomento, 2012].

| | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 |
|---------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| AUTOPISTAS DE PEAJE | 176 | 93 | 170 | 192 | 197 |
| AUTOVÍAS | 400 | 1.173 | 1.467 | 1.842 | 2.194 |
| CARRETERAS DOBLE CALZADA | 150 | 250 | 274 | 306 | 251 |
| TOTAL | 726 | 1516 | 1.911 | 2.340 | 2.642 |

También es muy interesante el cambio experimentado en la red nacional en relación al **tipo de pavimento** existente en nuestras carreteras, ya que se ha impuesto por abrumadora mayoría la tipología de aglomerado asfáltico y hormigón, de tal forma que en la última década prácticamente han desaparecido los firmes de macadán o los constituidos simplemente por un tratamiento superficial [Ministerio de Fomento, 2012]. Este dato es muy significativo para el problema del ruido que se analiza en esta tesis, puesto que, como más adelante se verá, la capa de rodadura de la carretera tiene capital importancia en él.

En relación con el tráfico, es de destacar su aumento reciente en el conjunto del país, debido en gran parte al incremento del **parque de vehículos** que casi se ha duplicado en los últimos 20 años. Así, en la actualidad se superan los 30 millones de vehículos, de los cuales más de 22 millones son turismos (tabla 1.5). Pero si se observa la evolución del parque de vehículos a nivel nacional respecto de la población [Ministerio del Interior, 2009], se revela un incremento similar (tabla 1.6), y ello pese a que el número de conductores también ha aumentado, hasta alcanzar en la actualidad un censo total en España de más 26.000.000 de conductores, de los que más de 4.600.000 son andaluces [Ministerio de Fomento, 2012].

Tabla 1.5: Parque nacional de vehículos por tipo y período (1995-2010). Fuente: elaboración propia a partir de [Ministerio de Fomento, 2012].

| | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Turismos | 14.212.259 | 17.449.235 | 20.250.377 | 22.147.455 |
| Camiones y furgonetas | 2.936.765 | 3.780.221 | 4.655.413 | 5.103.980 |
| Tractores industriales | 87.481 | 142.955 | 194.206 | 199.486 |
| Otros | 1.610.740 | 1.911.804 | 2.557.280 | 3.635.114 |
| Total | 18.847.245 | 23.284.215 | 27.657.276 | 31.086.035 |

Los datos de la tabla 1.6 muestran asimismo la evolución del índice de motorización de nuestro país (parque de vehículos cada 1000 habitantes), tasa que permite comparar con otros países de nuestro entorno y revela que siempre ha estado situada por debajo de la media de la Unión Europea [Ministerio de Fomento de España y Ministério das Obras Públicas, Transportes e comunicações de Portugal, 2006], debido fundamentalmente al menor grado de desarrollo económico y, sobre todo al inferior nivel de renta española. La media andaluza, aunque cercana a la nacional, siempre se ha situado por debajo, alcanzando los 636 vehículos / 1000 habitantes en 2012.

Todos los datos anteriores de aumento de parque móvil y conductores, así como la transformación que sufrió la red de carreteras gracias al Plan General de Carreteras 1984-1991 tuvo una importante repercusión en la economía nacional, pudiéndose señalar como un índice representativo el aumento del tráfico, que pasó de 43.865 millones de veh·km en 1985 a 80.564 veh·km en 1993 [Ministerio de Fomento y Asociación Española de la Carretera, 2010].

Tabla 1.6: Relación el parque de vehículos y la población de España (1982-2009). Fuente: [Ministerio del Interior, 2009].

| Año | Parque por 1.000 hab. | Hab. por turismo | Año | Parque por 1.000 hab. | Hab. por turismo |
|-------------|------------------------------|-------------------------|-------------|------------------------------|-------------------------|
| 1982 | 296 | 4 | 1996 | 495 | 2,68 |
| 1983 | 308 | 4 | 1997 | 513 | 2,59 |
| 1984 | 292 | 4 | 1998 | 536 | 2,48 |
| 1985 | 303 | 4 | 1999 | 561 | 2,37 |
| 1986 | 316 | 4 | 2000 | 577 | 2,31 |
| 1987 | 337 | 4 | 2001 | 592 | 2,26 |
| 1988 | 355 | 4 | 2002 | 602 | 2,22 |
| 1989 | 380 | 3 | 2003 | 594 | 2,27 |
| 1990 | 404 | 3,24 | 2004 | 616 | 2,20 |
| 1991 | 424 | 3,11 | 2005 | 636 | 2,15 |
| 1992 | 444 | 2,99 | 2006 | 661 | 2,09 |
| 1993 | 454 | 2,92 | 2007 | 685 | 2,03 |
| 1994 | 464 | 2,86 | 2008 | 684 | 2,04 |
| 1995 | 479 | 2,77 | 2009 | 673 | 2,08 |

De los datos de tráfico globales, es de destacar que tres cuartas partes del mismo se deben a turismos (coches), mientras que una quinta parte es de vehículos pesados, dedicados fundamentalmente al transporte de mercancías. La variación en el período de los últimos 20 años es también de duplicación del número, pero si se atiende a los datos de vehículos·km, el aumento es mucho mayor, ya que en los últimos 20 años se ha triplicado, sobre todo por el incremento en los coches [Ministerio de Fomento, 2012]. De hecho, si se comparan estos datos con los de la Unión Europea y otras naciones desarrolladas, es destacable que el número de vehículos de transporte público de viajeros y mercancías sí es del mismo orden que el de otros países e incluso el parque de camiones español es relativamente mayor que el de otros países europeos [Kraemer *et al.*, 2001]. Este último dato va en consonancia con otra diferencia fundamental entre España y nuestros socios europeos más desarrollados, como es el de la participación superior del transporte de

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

mercancías por carretera en España, que es debido fundamentalmente a que nuestro desarrollo industrial se ha producido mucho más tarde que en otros países de Europa Occidental y que además cuando lo hizo se apoyó principalmente sobre la carretera en lugar de la red ferroviaria como en el resto de la Unión Europea. Además, la industria que se creó en España fue predominantemente de transformación, que tiene unas necesidades de transporte que se atienden mejor por carretera, al contrario de la industria pesada que usa preferentemente el ferrocarril.

Sin embargo, en 2007 se produjo un punto de inflexión en estos datos y desde entonces el tráfico global se está viendo mermado, seguramente por la crisis, y se situó en 2012 en unos 95.000 millones de vehículos·km para el caso de la red autonómica y en unos 115.000 millones de vehículos·km para la red estatal [Ministerio de Fomento, 2012]. Estos datos sitúan el descenso relativo en los últimos 5 años en torno al 12,60% de media para toda la red nacional, habiendo caído por debajo de los valores alcanzados en 2002.

En el caso de Andalucía, estos datos son de 19.335 millones de vehículos·km para la red del Estado, 12.130 millones de vehículos·km para la red autonómica y 2.426 millones de vehículos·km para la red provincial. El porcentaje de pesados se situó en 2012, de media, en el 9,2 % para la red estatal, 9,6% para la autonómica y del 8,7 % para la red provincial [Ministerio de Fomento, 2012].

En datos de **intensidad media diaria de vehículos (IMD)**, en la tabla 1.7 puede observarse su evolución en los últimos años, para el caso de la red estatal:

Tabla 1.7: Datos de tráfico según IMD en la RIGE por tipo de vía y período, con porcentaje de pesados (2004-2012). Fuente: [Ministerio de Fomento, 2012].

| AÑOS | TOTAL | %vp | Autopistas Peaje | %vp | Autovías | %vp | Doble calzada | %vp | Convencionales | %vp |
|------|---------|------|------------------|------|----------|------|---------------|------|----------------|------|
| 2004 | 4.009,8 | 13,2 | 23.383,5 | 14,5 | 29.967,8 | 15,0 | 24.522,7 | 10,7 | 2.068,9 | 11,9 |
| 2005 | 4.053,4 | 13,2 | 24.099,3 | 14,2 | 29.639,8 | 15,5 | 25.844,3 | 9,3 | 1.985,1 | 11,6 |
| 2006 | 4.082,7 | 13,0 | 25.360,3 | 14,4 | 27.817,8 | 16,1 | 24.265,2 | 9,5 | 2.014,7 | 10,6 |
| 2007 | 4.235,7 | 13,4 | 24.406,0 | 14,2 | 28.696,5 | 15,7 | 23.293,4 | 9,5 | 2.013,2 | 9,5 |
| 2008 | 4.179,9 | 12,5 | 22.263,0 | 13,5 | 26.733,4 | 14,6 | 33.745,0 | 10,1 | 1.930,7 | 10,3 |
| 2009 | 4.129,0 | 11,4 | 21.020,0 | 12,1 | 24.905,0 | 13,5 | 29.698,0 | 10,8 | 1.958,0 | 9,6 |
| 2010 | 4.497,5 | 11,0 | 20.347,0 | 12,0 | 25.034,8 | 13,5 | 24.263,0 | 8,1 | 1.918,3 | 8,9 |
| 2011 | 3.878,3 | 11,0 | 19.805,0 | 12,0 | 24.383,0 | 12,5 | 23.375,0 | 11,7 | 1.762,0 | 9,4 |
| 2012 | 3.710,8 | 10,7 | 17.753,0 | 12,0 | 22.618,8 | 12,4 | 21.211,7 | 8,2 | 1.746,2 | 9,1 |

Todos estos datos tienen como consecuencia una mayor influencia de los vehículos de transporte de mercancías, especialmente de los grandes camiones, lo que se refleja en muchos de los aspectos de la ingeniería de carreteras en nuestro país, así como en sus efectos sobre el medio ambiente, entre ellos, el ruido [Kraemer *et al.*, 2001].

Y, como se verá, otro aspecto capital en el comportamiento de la contaminación sonora debida al tráfico es la **velocidad de los vehículos** que circulan por las carreteras. De nuevo, es destacable el notorio incremento observado en la evolución de los datos de velocidad media en la red de carreteras del Estado en los últimos años (tablas 1.8 y 1.9):

Tabla 1.8: Distribución relativa de vehículos según su velocidad media en las autovías de la Red de Carreteras del Estado por periodo (2004-2012). Fuente: [Ministerio de Fomento, 2012].

| AUTOVÍAS | | | | | | |
|----------|-----------|--------------|---------------|----------------|----------------|------------|
| AÑOS | < 50 km/h | 51 a 80 km/h | 81 a 100 km/h | 101 a 120 km/h | 121 a 140 km/h | > 140 km/h |
| 2004 | (*) | 26,13 | 18,97 | 27,79 | 19,10 | 6,06 |
| 2005 | (*) | 19,89 | 21,66 | 31,27 | 20,08 | 6,09 |
| 2006 | 15,91 | 9,89 | 24,52 | 29,97 | 15,81 | 3,87 |
| 2007 | 10,27 | 9,97 | 25,89 | 33,25 | 16,99 | 3,61 |
| 2008 | 2,65 | 11,85 | 31,72 | 34,86 | 16,02 | 2,90 |
| 2009 | 2,66 | 12,84 | 33,59 | 35,20 | 13,55 | 2,16 |
| 2010 | 1,98 | 10,50 | 33,56 | 36,88 | 14,71 | 2,37 |
| 2011 | 1,65 | 10,34 | 36,90 | 37,80 | 11,67 | 1,69 |
| 2012 | 1,81 | 9,05 | 35,46 | 38,28 | 13,52 | 1,88 |

(*) estos datos están acumulados en el intervalo siguiente (< 80 km/h).

Tabla 1.9: Distribución relativa de vehículos según su velocidad media en las carreteras convencionales de la Red de Carreteras del Estado por periodo (2004-2012). Fuente: [Ministerio de Fomento, 2012].

| RED CONVENCIONAL | | | | | | |
|------------------|-----------|--------------|---------------|----------------|----------------|------------|
| AÑOS | < 50 km/h | 51 a 80 km/h | 81 a 100 km/h | 101 a 120 km/h | 121 a 140 km/h | > 140 km/h |
| 2004 | (*) | 55,92 | 28,82 | 11,24 | 3,21 | 0,80 |
| 2005 | (*) | 53,05 | 30,21 | 11,83 | 3,62 | 1,28 |
| 2006 | 20,11 | 40,80 | 27,09 | 9,32 | 2,09 | 0,59 |
| 2007 | 13,57 | 43,64 | 30,33 | 9,94 | 2,06 | 0,45 |
| 2008 | 11,80 | 52,40 | 26,26 | 7,35 | 1,78 | 0,41 |
| 2009 | 7,40 | 48,49 | 31,88 | 9,92 | 1,98 | 0,33 |
| 2010 | 7,96 | 49,13 | 30,61 | 9,38 | 2,48 | 0,44 |
| 2011 | 8,48 | 47,67 | 31,54 | 9,56 | 2,18 | 0,57 |
| 2012 | 7,29 | 45,38 | 32,09 | 11,53 | 3,26 | 0,45 |

(*) estos datos están acumulados en el intervalo siguiente (< 80 km/h).

Finalmente, en el ámbito socioeconómico, las carreteras tienen por sí solas un alto grado de influencia sobre el crecimiento económico de un país y sus consecuencias lógicas, por lo que también es interesante observar cómo la **inversión en carreteras** por parte de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, se ha multiplicado por 10 en los últimos 30 años, aunque destaca la enorme inversión realizada en el período 1985-1990, que hizo que se multiplicara por 5 en sólo 5 años, mientras que desde entonces a la actualidad se haya duplicado, y ahora, con la crisis, incluso se ha disminuido [Ministerio de Fomento, 2012].

De hecho, antes de la crisis, en 2008, las inversiones reales del Estado en carreteras superaban los 5.000 millones de euros, de los que el 70% se destinaron a construcción de nuevas vías y el 30% restante a conservación y mantenimiento. Ese año el Ministerio de Fomento licitó obras en carreteras por importe de 12.254 millones de euros (un 43% de la inversión real total del Ministerio en obra civil) [Ministerio de Fomento, 2008].

En cuanto a inversión media en el período 2008-2012 por parte del Ministerio de Fomento, los índices globales para el país se sitúan en 62.570 € / 1000 habitantes y 113.590 € / km. Cuando se atiende a los datos de Andalucía, estos índices suben para el caso estatal a 65.190 € / 1000 habitantes y 164.930 € / km, mientras que la inversión de la Junta de Andalucía en carreteras en el mismo período arroja los siguiente índices: 56.790 € / 1000 habitantes y 46.820 € / km [Ministerio de Fomento, 2012].

Todos estos datos ponen en evidencia el drástico cambio que han experimentado las carreteras en nuestro país, y en concreto en Andalucía, en muy poco tiempo relativamente, tanto en indicadores de longitud, capacidad, calidad y tráfico, lo que influye de manera capital en los impactos medioambientales que producen, así como sobre la población. Muchos de esos impactos son, por supuesto, beneficiosos y redundan en el progreso de la sociedad; sin embargo, hay otros que, siendo perjudiciales, bien tuvieron un efecto inmediato con la construcción de la infraestructura, o bien tienen un efecto diferido sobre el entorno y que evoluciona con el tiempo. En general, el ruido del tráfico rodado es un impacto que ha ido creciendo con el tiempo, vinculado precisamente a la evolución de las infraestructuras que sustentan ese tráfico y su fuente, los vehículos que circulan por las carreteras, como se desarrolla en el capítulo siguiente.

1.2. CONTAMINACIÓN SONORA.

1.2.1. El ruido.

El ruido, hoy en día, es un factor decisivo en la calidad de vida urbana y es considerado como una de las principales causas del deterioro ambiental que padecemos en nuestras ciudades [Ministerio de Fomento, 2004]. Es de señalar que la OMS establece como perjudiciales niveles sonoros que superen los 65 decibelios en período diurno y los 55 decibelios durante la noche [COPT, 2008(b)].

De hecho, España es el segundo país más ruidoso del mundo, después de Japón. Según datos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), 9 millones de españoles están sometidos a un nivel superior a los 65 dB(A) del nivel equivalente sonoro, así como más del 50% de los edificios de las principales ciudades en medidas realizadas durante 24 horas [COITT, 2008].

En el caso concreto de Andalucía, los datos recogidos por la Consejería de Medio Ambiente ponen de relieve que, en 2006, en las ciudades andaluzas de más de 50.000 habitantes, se superaban dichos niveles perjudiciales. Los resultados de las mediciones realizadas en 44 poblaciones de entre 20.000 y 50.000 habitantes arrojaron datos similares a las grandes ciudades. En todas ellas, la media de ruido durante el día alcanzaba los 67 decibelios y durante la noche los 60 decibelios [COPT, 2008(b)].

Además, incluso a bajos niveles de ruido, 40 dB(A), por ejemplo, la población puede ser afectada por la exposición al ruido, especialmente aquellos grupos más susceptibles (niños, mayores...) [Nijland *et al.*, 2003].

El ruido se puede definir como un conjunto de sonidos no armónicos o descompasados que no nos es grato, es decir, se trata de sonidos inadecuados en el lugar inadecuado en el momento inadecuado [Contreras López y Molero Meneses, 2009].

No hay que olvidar que el sonido no es sino un fenómeno físico que consiste en la alteración mecánica de las partículas de un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso), producida por un elemento en vibración, que es capaz de provocar una sensación auditiva

[Segués Echazarreta, 2007]. Y sus fuentes pueden ser múltiples, de modo que se suelen agrupar según si el foco emisor es puntual (un televisor, por ejemplo), un foco espacial (un bar) o un foco lineal (una sucesión de vehículos en movimiento por una carretera) [Moreno Jiménez, 1995]. En el aire, que es el medio al que habitualmente se refiere el ruido, el fenómeno se propaga por la puesta en vibración de las moléculas de aire situadas en la proximidad del elemento vibrante, que a su vez transmiten el movimiento a las moléculas vecinas, y así sucesivamente. La vibración de las moléculas de aire provoca una variación de la presión atmosférica que se propaga como una onda de presión y generando así las llamadas ondas sonoras, que se introducen por el pabellón del oído haciendo vibrar la membrana del tímpano, de ahí pasa al oído medio, oído interno y excita las terminales del nervio acústico que transporta al cerebro los impulsos neuronales que finalmente generan la sensación sonora [Segués Echazarreta, 2007].

Desde el punto de vista legal, «**ruido ambiental**» se define como el sonido exterior no deseado o nocivo generado por las actividades humanas, incluido el ruido emitido por los medios de transporte, por el tráfico rodado, ferroviario y aéreo y por emplazamientos de actividades industriales [Directiva 2002/49/CE, 2002].

Ese grado de «*indeseabilidad*» que se ha comentado, se convierte, con frecuencia, en una cuestión psicológica puesto que dependiendo de las características de la persona, la valoración de *indeseabilidad* puede ser muy diferente. Pero ello lleva a contemplar el ruido como «**contaminación acústica**», que se define como la presencia en el ambiente de ruido o vibraciones, cualquiera que sea el emisor acústico que los origine, que implique molestia, riesgo o daño para las personas, para el desarrollo de sus actividades o para los bienes de cualquier naturaleza, incluso cuando su efecto sea perturbar el disfrute de los sonidos de origen natural, o que causen efectos significativos sobre el medio ambiente [Ley 37/2003 de España, 2003; Ley 7/2007 de la Junta de Andalucía, 2007].

Los **efectos nocivos del ruido ambiental** sobre la población pueden ser [Ouis, 2001; Öhrström *et al.*, 2006; Ausejo *et al.*, 2011; World Health Organisation, 2011]:

- Directos y acumulativos sobre la salud: molestias, problemas de comunicación y concentración, estrés, perturbación del sueño y del descanso nocturno. A ellos

se suman los efectos estrictamente auditivos, como la pérdida de capacidad auditiva, dolor, fatiga auditiva y *tinnitus* (escuchar ruidos en los oídos cuando no existe fuente sonora externa). Mención especial merecen las afecciones sobre los fetos o recién nacidos, debido a su especial sensibilidad auditiva en etapas tan tempranas del desarrollo orgánico.

- Indirectos sobre los individuos: efectos psico-fisiológicos que derivan en depresión, fatiga, disminución del rendimiento e incluso enfermedades cardiovasculares relacionadas con la hipertensión, vasoconstricción y arritmia cardíaca, o respuestas hormonales (hormonas del estrés) y sus posibles consecuencias sobre el metabolismo humano y el sistema inmune.
- Adversos sobre las generaciones futuras: ambientes residenciales, sociales y educativos deteriorados.
- Negativos sobre la cultura, la estética y la economía: como el aislamiento social, barrios marginales y descenso de los valores de la propiedad.

Pero antes de profundizar en las características e implicaciones del ruido ambiental, sobre todo debido al tráfico de las carreteras, se van a recordar brevemente algunas definiciones de conceptos y magnitudes relacionados con el ruido y que durante la presente tesis doctoral serán utilizados de forma recurrente.

1.2.2. Parámetros acústicos.

Como ya se ha dicho, el ruido no es más que un sonido indeseado, molesto y desagradable y su clasificación no es tanto una cuestión acústica como psicológica. Por tanto, los parámetros que deben conocerse del ruido, para proceder a su reducción o eliminación, son los mismos que los del sonido, y responden a los elementos básicos que lo conforman: la fuente del sonido, el camino o medio de transmisión y el receptor [Ouis, 2001].

Así, el ruido, como todo sonido, tiene carácter ondulatorio y presenta una serie de características o **magnitudes que definen la onda** que le da origen, las cuales son [Burbano de Ercilla *et al.*, 2003]:

- Velocidad del sonido (c): en el aire al nivel del mar a 20 °C es aproximadamente de 340 m/s.
- Frecuencia (f): es el número de variaciones de presión por unidad de tiempo, midiéndose en ciclos por segundo o Hercios (Hz).
- Longitud de onda (λ): hace referencia a la distancia entre crestas o senos sucesivos en la onda sinusoidal. Se relaciona con la frecuencia mediante la expresión $\lambda = c/f$.
- Período (T): es el tiempo transcurrido entre dos picos o senos sucesivos. Se relaciona con la frecuencia mediante la expresión $T = 1/f$.
- Nivel o amplitud (A): mide las variaciones de presión, es decir, la amplitud de la onda.
- Intensidad (I): como el paso de las ondas sonoras se acompaña de un flujo de energía acústica, se define la intensidad del sonido en una dirección específica en un punto del campo sonoro como la potencia media de sonido por unidad de área nominal a la dirección de propagación de la onda. Se relaciona con la presión sonora P según la expresión $I = P^2/(d \cdot c)$, siendo d la densidad del medio.

Por tanto, el ruido, desde el punto de vista físico, no es más que ondas de presión que se propagan por el aire. Sin embargo, las variaciones de presión audibles se encuentran en una gama muy amplia, variando entre $20 \mu\text{Nw/m}^2$ y $108 \mu\text{Nw/m}^2$, por lo que se adoptó para su medición una unidad logarítmica llamada **decibelio (dB)** y que ya ha aparecido antes en este texto, en la que interviene una magnitud de referencia, que es precisamente la mínima presión audible o presión de umbral [Parrondo Gayo *et al.*, 2006]. Su expresión es la siguiente (ecuación 1.1):

$$\text{dB} = 20 \log (P / P_0) = 10 \log (W / W_0), \quad (\text{ec. 1.1})$$

siendo P = presión sonora.

$$P_0 = \text{presión umbral} = 20 \mu\text{Nw/m}^2 = 20 \mu\text{Pa}$$

W = potencia sonora.

W_0 = potencia umbral = 10^{-12} W

Atendiendo a esto se define el **Nivel de potencia sonora (L_w)**, como la potencia sonora de una fuente expresada en vatios, transformada a una escala logarítmica, expresándose en decibelios [Bartí Domingo, 2010], según la ecuación 1.2:

$$L_w \text{ (dB)} = 10 \log (W/W_0) \quad (\text{ec. 1.2})$$

De la misma manera se define **Nivel de presión sonora (L_p)**, en este caso en referencia a presión, que de igual forma al expresarla sobre una escala logarítmica viene dada en decibelios (ecuación 1.3):

$$L_p \text{ (dB)} = 20 \log (P/P_0) \quad (\text{ec. 1.3})$$

Se puede comprobar que a una distancia suficiente de la fuente de ruido, la intensidad es proporcional al cuadrado de la presión sonora, de forma que puede definirse también un **Nivel de intensidad sonora (L_I)**, en decibelios, como 10 veces la razón entre la intensidad de un sonido I y la intensidad sonora de referencia I_0 de 10^{-12} W/m². Es decir (ecuación 1.4),

$$L_I \text{ (dB)} = 10 \log (I/I_0) \quad (\text{ec. 1.4})$$

En cuanto a las **frecuencias**, los ruidos generalmente están compuestos por variaciones de presión de diferentes valores, pero se pueden descomponer en una superposición de sonidos puros de frecuencias diferentes. La repartición de la energía sonora en función de cada una de estas frecuencias define el espectro de frecuencias de ruido, cuyo conocimiento permite establecer si el ruido contiene frecuencias bajas (graves), medias o altas (agudas). Este es un fenómeno importante de la investigación, ya que la propagación del ruido en el aire y a través de los obstáculos depende asimismo del espectro de frecuencias del ruido [Segués Echazarreta, 2007]. De hecho, el sistema auditivo humano solo está capacitado para oír sonidos de frecuencias comprendidas entre los 20 Hz y los 20.000 Hz y, además, no todas las frecuencias son percibidas con la misma intensidad, siendo el oído humano más sensible en la banda comprendida entre los 500 y 6.000 Hz [González Cabrera, 2004].

Debido a esta última circunstancia, resulta lógico que se realice una ponderación del sonido o ruido para hacerlo comparable a los efectos que se pretenden estudiar. Se utilizan, por tanto, diferentes **curvas de ponderación** que siguen aproximadamente la misma ley que el oído en cuanto a sensibilidad en función de la frecuencia [Möser and Barros, 2009] y se obtienen así los niveles sonoros ponderados:

- Curva A, se aproxima a la curva de audición de baja sensibilidad.
- Curva B, se aproxima a la curva de audición de media sensibilidad.
- Curva C, se aproxima a la curva de audición de alta sensibilidad.
- Curva D, utilizada sólo para medición del ruido aeronáutico y que penaliza mucho las frecuencias altas.

El nivel sonoro más utilizado es con ponderación A, ya que es la que más protege al hombre contra la agresión del ruido, por lo que cuando el nivel sonoro esté ponderado conforme a esta curva se suele representar el valor acompañado con **dB(A)** [Makarewicz, 1993].

Otro concepto importante es el de la **suma de niveles sonoros**, puesto que en la mayoría de los casos el ruido no es producido por una única fuente, sino que se percibe como la yuxtaposición de ruidos con orígenes diversos. Así, cuando dos fuentes sonoras radian sonido, ambas contribuyen en el nivel de presión sonora existente en un punto alejado de dichas fuentes. Si las dos radian la misma cantidad de energía, en un punto equidistante de ambas fuentes la intensidad sonora será dos veces mayor que si solamente se tuviera una fuente radiando. Ya que la intensidad es proporcional al cuadrado de la presión, entonces al doblar la intensidad produce un incremento de 3 dB en la presión sonora existente [Segués Echazarreta, 2007].

Por tanto, cuando se suma la contribución de dos o más fuentes, esta no es igual a la suma numérica de los valores individuales en dB. El método numérico para sumar niveles sonoros es el que se muestra en la ecuación 1.5:

$$L_{Total} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1 \cdot L_i} \right) \quad (ec. 1.5)$$

donde n es el número de fuentes sonoras.

L_i son los niveles debidos a cada una de las fuentes expresados en dB.

Partiendo de los conceptos detallados hasta ahora, se definen una serie de parámetros acústicos que suelen utilizarse de forma estándar para cuantificar el ruido, buscando ser un criterio aplicable a cualquier fuente de ruido y válido a la hora de establecer con ellos una correspondencia con la percepción del mismo, además de ser fácil de medir y predecir [Bartí Domingo, 2010]. El más común es el **Nivel de Presión Sonora Continuo Equivalente Ponderado A** ($L_{Aeq,T}$), que se define como el nivel continuo en dB(A) que produciría la misma energía sonora en el mismo tiempo que el suceso dado. Por tanto, su expresión es la siguiente (ecuación 1.6):

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1 \cdot L_{A,i}} \right) \quad (ec. 1.6)$$

donde n es el período de observación, que normalmente se entiende que es de 24 horas a menos que se indique lo contrario y, por consiguiente, $n=24$.

$L_{A,i}$ es el Nivel Sonoro Equivalente 1 hora.

En el caso concreto del ruido producido por el tráfico de carretera, la bibliografía concluye en su inmensa mayoría en apoyar la bondad de los índices equivalentes ponderados según la curva A, puesto que son los que mejor se adaptan a la predicción de los niveles de molestia producidos por el ruido del tráfico mixto de vehículos ligeros y pesados en cualquier proporción, al correlacionarse bien con las valoraciones subjetivas de los sujetos expuestos al mismo [Gjestland, 1987; Versfeld and Vos, 2002]. Además, el $L_{Aeq,T}$ (y los que se derivan de él, como se verá seguidamente) ofrece las siguientes ventajas que lo potencian como indicador universal de ruido [Segués Echazarreta, 2007]:

- Es relativamente sencillo de comprender, en comparación con otros índices.
- Mide un concepto acústico muy claro: la energía media durante un determinado periodo de tiempo.
- Permite establecer comparaciones y agregar niveles procedentes de diversas fuentes.

- Permite considerar diferentes períodos de tiempo para la evaluación del impacto.
- Permite comparar los niveles originados por una determinada fuente con los niveles de fondo ambientales existentes en una determinada zona.
- Se puede obtener directamente de los instrumentos de medida.

Como se ha anunciado, a partir de este parámetro se definen otros índices según se apliquen a unos períodos u otros, y que sirven para asociar su valor a la percepción de la molestia producida por el ruido en dichos momentos. Surgen así los llamados «**indicadores de ruido**», es decir, aquellas magnitudes físicas utilizadas para describir el ruido ambiental, que tienen una relación con un efecto nocivo o negativo sobre la salud humana o sobre el medio ambiente [Directiva 2002/49/CE, 2002]. Por tanto, estos indicadores deben introducir en su cálculo un factor de «molestia», que, dentro de su carácter obviamente subjetivo, dependen de numerosos factores, como son [Damián Hernández, 2002]:

- La energía sonora: las molestias que produce un sonido están directamente relacionadas con la energía del mismo. A más energía (sonido más fuerte, mayor presión sonora), más molestia.
- Tiempo de exposición: para un mismo nivel de ruido, la molestia depende del tiempo al que un determinado sujeto está expuesto a ese ruido. En general, un mayor tiempo de exposición supone un mayor grado de molestia.
- Características del sonido: para un mismo nivel de ruido y un mismo tiempo de exposición, la molestia depende de las características del sonido: espectro de frecuencias, ritmo, etc.
- El receptor: no todas las personas consideran el mismo grado de molestia para el mismo ruido. Dependiendo de factores físicos, distintas sensibilidades auditivas y, en mayor medida, de factores culturales, lo que para uno son ruidos muy molestos, para otros pueden no serlo. Dentro de un mismo sector de población, el factor edad parece ser también significativo.

- La actividad del receptor: para un mismo sonido, dependiendo de la actividad del receptor, este puede ser considerado como un ruido o no. El caso más evidente es el de los períodos de descanso o aquellas actividades o estados que requieren ambientes sonoros más silenciosos (lectura, enfermedades, conversaciones, etc.). Un sonido que puede ser considerado como agradable (un concierto de música) o pasar desapercibido durante la actividad laboral se convierte en un ruido molesto si el receptor pretende dormir o concentrarse.
- Las expectativas y la calidad de vida: dentro de este epígrafe se engloban aquellos aspectos subjetivos, difíciles de evaluar, que están relacionados con la calidad de vida de las personas. Para ciertos grupos de personas, las exigencias de calidad ambiental para el tiempo y los espacios dedicados al ocio son muy superiores a las de otras situaciones. El caso más frecuente es el de las viviendas de segunda residencia, en las que los ruidos se perciben en general como mucho más molestos que en la vivienda principal, debido a las expectativas de descanso depositadas en aquellas. También sucede habitualmente que en entornos de una gran calidad ambiental se aceptan peor los ruidos que en entornos medioambientalmente degradados.

Como se ve, muchos de los factores tienen una componente puramente subjetiva que es difícil de evaluar, pero sí es muy útil la discriminación horaria, que permite englobar buena parte de estos factores y así penalizar o no según el momento. De este modo, los **indicadores más usados a nivel internacional** son [Ley 37/2003 de España, 2003; Pronello and Camusso, 2012]:

- $L_{\text{día}}$ (indicador de ruido diurno): asociado a la molestia durante el período diurno, que por defecto se toma entre las 7:00 y las 19:00 horas.
- L_{tarde} (indicador de ruido en período vespertino): asociado a la molestia durante el período vespertino, que por defecto se toma entre las 19:00 y las 23:00 horas.
- L_{noche} (indicador de ruido en período nocturno): correspondiente a la alteración del sueño, calculado para un período por defecto entre las 23:00 y las 7:00 horas.

- L_{den} (indicador de ruido día-tarde-noche): asociado a la molestia global y que se calcula en función de los anteriores según la ecuación 1.7:

$$L_{den} = 10 \log \left(\frac{\frac{L_{dia}}{12 \cdot 10^{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_{tarde} + 5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_{noche} + 10}{10}}}{24} \right) \quad (ec. 1.7)$$

Como se ha dicho, al día le corresponden 12 horas, a la tarde 4 horas y a la noche 8 horas y los valores horarios de comienzo y fin por defecto son los mencionados, pero la definición de los indicadores deja abierta la posibilidad de que, a la hora de proceder a la evaluación o predicción del ruido, sea la administración competente según la normativa de referencia la que pueda reducir el período tarde en una o dos horas y alargar los períodos día y/o noche en consecuencia [Directiva 2002/49/CE, 2002].

De esta manera, el ruido ambiental producido por el tráfico se suele expresar como la media de todos los eventos de ruido en el período determinado, a lo largo de un año y ponderados en la curva A, y se ha comprobado que existe una buena correspondencia entre el grado de molestia de distintas zonas con el mismo nivel de exposición sonora [Sato *et al.*, 1999]. Por esta y muchas otras razones, los investigadores han propuesto el uso de este indicador para el estudio del ruido ambiental y sus efectos [Ouis, 2001; Martín *et al.*, 2006; Pronello and Camusso, 2012], llegando incluso a relacionar directamente el valor de L_{den} con el **grado de molestia debido al ruido del tráfico**, según las ecuaciones 1.8 y 1.9 [Naish, 2010; Milford *et al.*, 2012]:

$$\%A = 1,795 \cdot 10^{-4} (L_{den} - 37)^3 + 2,11 \cdot 10^{-2} (L_{den} - 37)^2 + 0,5353 (L_{den} - 37) \quad (ec. 1.8)$$

$$\%HA = 9,87 \cdot 10^{-4} (L_{den} - 42)^3 - 1,44 \cdot 10^{-2} (L_{den} - 42)^2 + 0,51 (L_{den} - 42) \quad (ec. 1.9)$$

siendo %A = porcentaje de personas que encuentran el ruido del tráfico molesto.

%HA = porcentaje de personas que encuentran el ruido del tráfico muy molesto.

Por otro lado, sobre estos índices de ruido, utilizados por las normativas sectoriales en la materia para determinar la calidad acústica de una determinada zona, se establecen los llamados «**valores límite**», es decir el valor de un determinado índice que, de

superarse, obliga a las autoridades competentes a prever o a aplicar medidas con el fin de reducir los niveles de contaminación acústica. Los valores límite pueden variar en función de la fuente emisora de ruido (ruido del tráfico rodado, ferroviario o aéreo, ruido industrial, etc.), del entorno o de la distinta vulnerabilidad al ruido de los grupos de población, y pueden ser distintos de una situación existente a una nueva situación (cuando cambia la fuente de ruido o el uso dado al entorno).

Aparte de estos indicadores continuos, también es común utilizar el denominado **nivel de exposición sonora** (SEL), que se define como el nivel de presión sonora de un ruido continuo que tiene la misma energía en un segundo que la del ruido real durante el intervalo de tiempo T. Se recurre a él para clasificar y comparar sucesos de ruido de diferente duración y de diferentes fuentes. Su expresión se recoge en la ecuación 1.10:

$$SEL = 10 \log (1/T_0) \cdot 10^{L_i/10} \cdot t_i \quad (ec. 1.10)$$

donde $T_0 = 1$ segundo

t_i = tiempo durante el cual el nivel sonoro es L_i (tiempo real de exposición).

Para un suceso acústico único, el nivel sonoro continuo equivalente, L_{Aeq} , para un intervalo de tiempo T, se relaciona con el nivel de exposición sonora SEL producido por la fuente de sonido mediante la ecuación 1.11, donde los tiempos se expresarán en segundos [Segués Echazarreta, 2007]:

$$SEL = L_{Aeq} (T) + 10 \log (T/T_0) \quad (ec. 1.11)$$

donde $T_0 = 1$ seg.

Y otros conceptos importantes para el estudio de la **atenuación del ruido** son los que definen la transmisión del mismo, ya que el ruido, como sonido que es, al propagarse de forma ondulatoria por el aire va sufriendo una disminución de su nivel al aumentar la distancia entre la fuente y el receptor, que es la suma, fundamentalmente, de los siguientes mecanismos [Makarewicz, 1993; Segués Echazarreta, 2007]:

- La debida a la distancia en sí, llamada divergencia geométrica, y que supone la reducción de su amplitud conforme aumenta la distancia desde el foco emisor. En campo libre, se produce una reducción del nivel sonoro de 3 dB cuando se

dobla la distancia para una fuente lineal y de 20 dB cada vez que la distancia se multiplica por 10.

- La producida por la atmósfera. Conforme el sonido se propaga por el aire, la energía se va disipando en forma de calor, ya que el aire no es un gas de densidad homogénea, ni está en absoluto reposo. Su magnitud depende de la frecuencia del ruido, la turbulencia de la atmósfera y de la humedad relativa y la temperatura del aire, pero en general la reducción del sonido para distancias cortas es insignificante para frecuencias bajas, siendo más importantes para frecuencias altas. Para casos de distancias largas la atenuación es importante para todas las frecuencias.

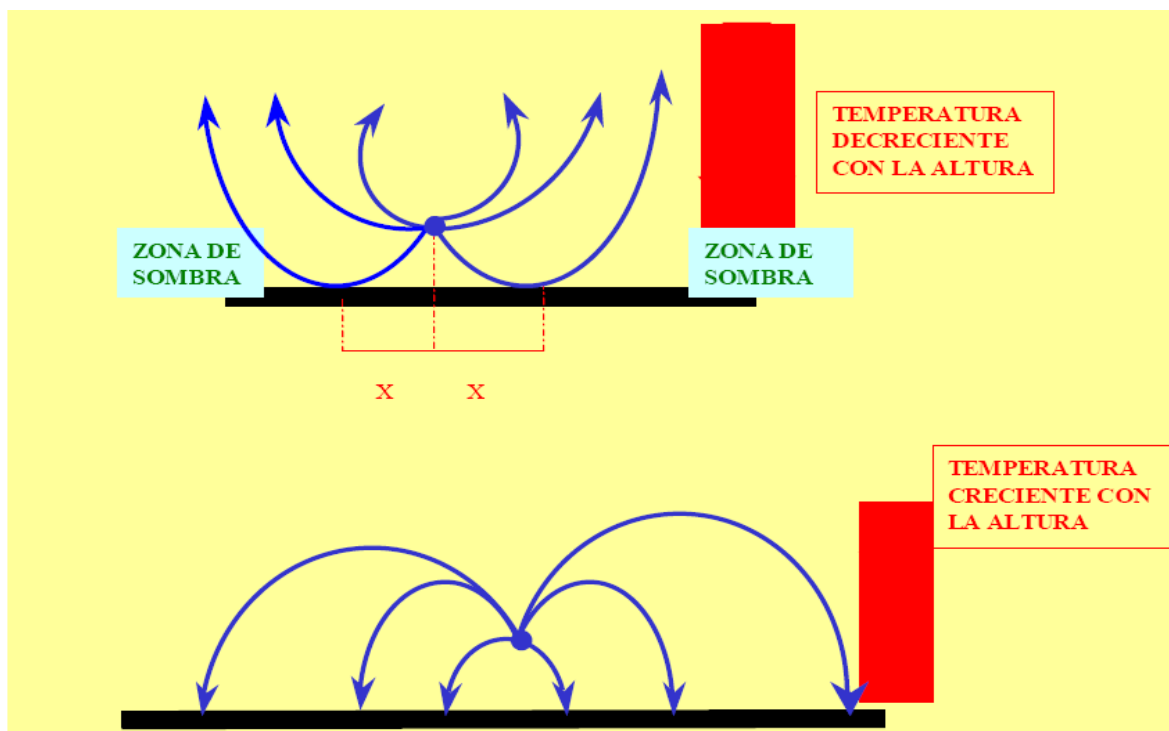


Figura 1.10: Influencia de la temperatura en la propagación del ruido. Fuente: [Segués Echazarreta, 2007].

- La debida a la influencia de la variación de la temperatura (figura 1.10). Los cambios de temperatura tienen una neta influencia sobre la densidad del aire, y por lo tanto, sobre la velocidad de propagación de las ondas sonoras. Si la temperatura decrece con la altura (caso más usual), los rayos sonoros se curvan con pendiente creciente, provocando una zona de sombra alrededor de la fuente. Sin embargo, en el caso de que la temperatura del aire crezca con la altitud (inversión térmica), los rayos se curvan hacia el suelo, eliminando la zona de

sombra. Esta situación de inversión térmica puede provocar un aumento de 5 a 6 dB(A) con relación a la situación normal.

- La provocada por el viento (figura 1.11). Por su parte, la presencia de viento hace que el sonido, en lugar de propagarse en línea recta, se propague según líneas curvas, de modo que en el sentido del viento el sonido se propaga mejor y los rayos sonoros se curvan hacia el suelo, mientras que contra el viento el sonido se propaga peor que en ausencia del mismo y los rayos sonoros se curvan hacia lo alto, formándose, a partir de una cierta distancia de la fuente (normalmente superior a los 200 metros), una zona de sombra. La influencia del viento, aunque muy difícil de modelizar y medir, puede motivar, así mismo, variaciones del orden de 5 dB(A) entre las distintas situaciones.

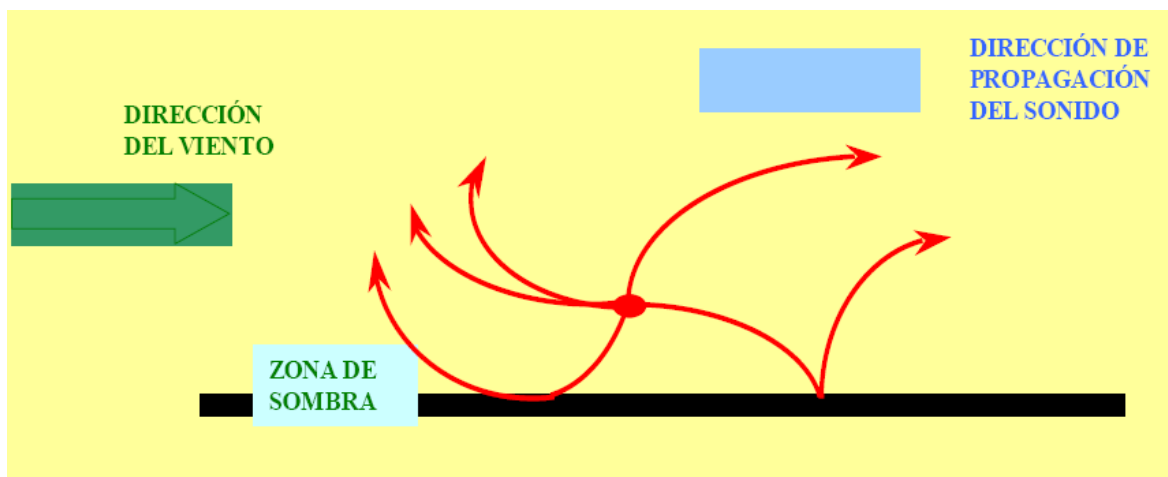


Figura 1.11: Influencia del viento en la propagación del ruido. Fuente: [Segués Echazarreta, 2007].

- La producida por los obstáculos que el ruido encuentra en su camino (figura 1.12), ya sean los edificios, la vegetación, el propio suelo, etc., u otros mecanismos adicionales que surgen de los casos concretos, como las pantallas antirruído, que más adelante se verán. Así, los obstáculos se comportan como superficies absorbentes y reflectantes, de modo que parte del ruido se absorbe, parte se refleja, parte se transmite y parte «bordea» el obstáculo, en cantidades que dependen de las características acústicas del objeto, de su tamaño, de la longitud de onda del sonido y de la diferencia de longitud de los recorridos entre la distancia del sonido reflejado y la distancia real, todo lo cual supone un conjunto de factores importantes en el estudio de la atenuación y perturbación del ruido.

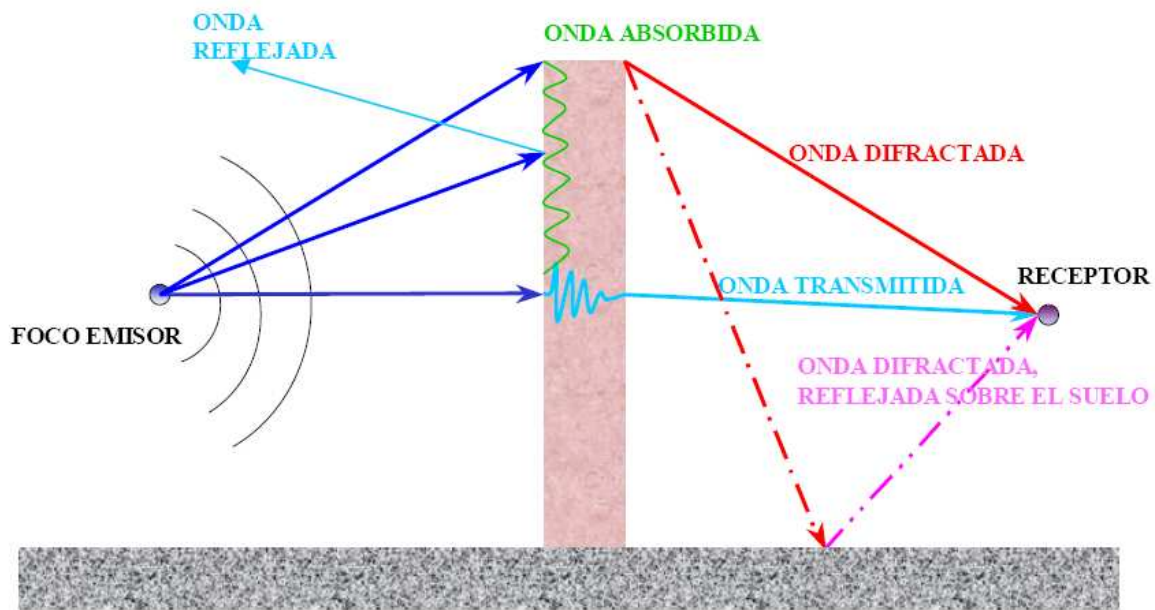


Figura 1.12: Influencia de los obstáculos en la propagación del ruido. Fuente: [Segués Echazarreta, 2007].

Por su interés en el comportamiento de las barreras acústicas y otros mecanismos de protección contra el ruido, se profundiza en estos últimos fenómenos que se dan cuando el ruido se encuentra en su **propagación con obstáculos** [Segués Echazarreta, 2007]:

- Reflexión del ruido: cuando una onda sonora alcanza un obstáculo, parte de su energía, en forma de presión sonora, se refleja siguiendo un proceso físico similar al de la onda luminosa reflejada, de forma que dependiendo de las características de la superficie del obstáculo donde se produce la reflexión puede reflejarse en una sola dirección o en varias. Si la energía reflejada es alta, se trata de una superficie reflejante o acústicamente dura.
- Absorción del ruido: cuando una onda sonora incide sobre una superficie, una pequeña parte de la energía se disipa absorbida por la misma. La absorción de la superficie es una función que depende de bastantes parámetros tales como rugosidad, porosidad, flexibilidad, y, en algunos casos, sus propiedades resonantes, así como del espectro de frecuencias del sonido.
- Transmisión del ruido: parte de la onda sonora que penetra en el interior del obstáculo se transforma en vibraciones mecánicas que pueden eventualmente radiar nuevas ondas acústicas. Sin embargo, dicha transmisión no es total, puesto que el obstáculo se «opone» al paso de la energía sonora a su través,

fenómeno denominado aislamiento, que depende fundamentalmente del espesor y la masa superficial del objeto.

- Difracción del ruido: este fenómeno provoca que, cuando una onda sonora encuentra un obstáculo que es pequeño en relación con la longitud de onda, el frente de onda en los bordes del mismo cambie de dirección, dando como consecuencia principal que la denominada zona de sombra acústica (zona protegida situada detrás de un obstáculo) sea considerablemente menor que la zona de sombra visual.
- El efecto «suelo». Finalmente, es destacable resaltar la afección que provoca el suelo sobre la transmisión del sonido, puesto que se va a comportar como un obstáculo sólido, es decir una superficie absorbente y reflectante, de manera que el sonido que recibe un receptor va a llegar por dos vías: el directo y el reflejado por el suelo, este último dependiendo del tipo de superficie, ángulo de rozamiento, frecuencia del sonido y de la diferencia de longitud de los recorridos entre la distancia del sonido reflejado y la distancia real. Pero también, por otra parte, existen en las proximidades del suelo (sus efectos pueden sentirse hasta una altura de 10 metros) gradientes de temperatura y humedad, variables a lo largo del tiempo, movimientos de tierra, vegetación, y diversos obstáculos naturales que ralentizan la propagación del sonido, y provocan una absorción difícilmente evaluable y que suele ser pequeña en relación con la producida directamente por las características absorbentes o reflectantes del suelo.

1.2.3. Las carreteras y el ruido.

Entre las fuentes más habituales de ruido ambiental se encuentran el tráfico rodado, las actividades de ocio, culturales o deportivas, obras y construcción, la voz humana, industrias, aviones y ferrocarriles, animales, etc. [Parrondo Gayo *et al.*, 2006]. Sin embargo, la totalidad de los estudios internacionales realizados en esta materia concluyen que la principal causa del ruido urbano es el producido precisamente por el tráfico,

estimándose su incidencia en el conjunto de las fuentes en torno al 80% (figura 1.13) [García Sanz y Garrido, 2003], siendo el tráfico de turismos y motos el generador de más de la mitad del ruido urbano total [COPT, 2008(b)], resultados corroborados por el Instituto de Acústica, organismo dependiente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, para el caso de España [Ministerio de Fomento, 2004].

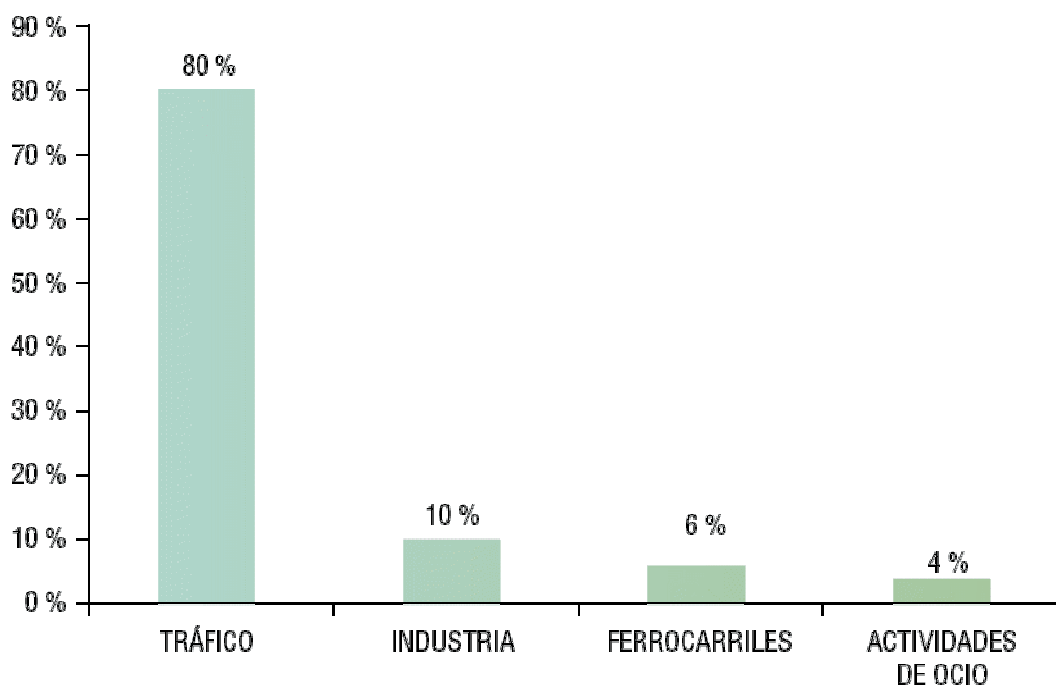


Figura 1.13: Principales fuentes de ruido urbano. Fuente: [Díaz, 2012].

Pese a que los límites de ruido homologados se han vuelto más estrictos año tras año y se han puesto en marcha bastantes iniciativas para luchar contra el ruido, no se ha introducido ninguna mejora en lo relativo a la exposición global al ruido generado por los vehículos de carretera. Ello no es sino resultado del desarrollo del parque móvil y de las vías de comunicación en España, con el consiguiente crecimiento y expansión del tráfico en el espacio y en el tiempo, que han colocado al sistema de transporte como un elemento insustituible en la actualidad para el desarrollo de las relaciones humanas y económicas, como se ha visto en el apartado anterior. Todo ello, unido al desarrollo de las actividades de ocio y turismo, ha anulado parcialmente los efectos de los avances tecnológicos de modo que los niveles sonoros han aumentado no solo en el ámbito urbano sino también en el entorno de las carreteras y viales de circulación [Comisión de las Comunidades

Europeas, 1996]. Pero es un hecho indudable que constituye uno de los elementos que ocasiona mayores alteraciones en el medio ambiente.

A la hora de analizar estos **efectos del transporte sobre el medio ambiente**, se pueden clasificar en varias categorías [Pérez Arriaga *et al.*, 2003]:

- Efectos locales: son aquellos que se derivan directamente de un determinado elemento del sistema de transporte, ya sea por su construcción o por su explotación, y en el cual es fácilmente identificable la relación causa-efecto. Son el objeto principal de las evaluaciones de impacto ambiental y las medidas correctoras de los proyectos de ingeniería civil.
- Efectos generalizados: se refieren a efectos en los cuales no es fácil seguir la relación causa-efecto entre un elemento concreto del sistema de transporte y la consecuencia detectada. En este apartado se incluyen la contaminación atmosférica, los accidentes, la lluvia ácida...
- Efectos globales: son aquellos que tienen un efecto global sobre el planeta, normalmente definido y acumulativo a otras acciones. Aquí se encuentran el efecto invernadero, la disminución de la capa de ozono, el consumo de energías no renovables...

Obviamente, el ruido puede enmarcarse dentro del primer tipo de efectos.

Así, se ha documentado que un ruido excesivo debido en un edificio al tráfico incluso ha producido depresión en sus ocupantes, e incluso en mayor medida sobre aquellos cuyas ventanas están orientadas hacia la carretera en comparación sobre los que las tenían en contra del tráfico [Ouis, 2001]. Y estudios recientes han demostrado que el ruido del tráfico de carretera excediendo los 65 dB(A) durante el día incrementa el riesgo de ataques al corazón en hombres en un 20% [Ausejo *et al.*, 2011]. Por todo ello, y aunque los **efectos del ruido** se han conocido desde hace mucho tiempo es ahora cuando debido a la importancia que ha tomado en el conjunto del Medio Ambiente se ha convertido en un factor a tener en cuenta en la planificación del transporte y sus infraestructuras [Ouis, 2001].

Según estadísticas del año 2000, se estima que más del 44% de los ciudadanos de la Unión Europea, en torno a 210 millones de personas, estuvieron expuestos a ruido del tráfico de carretera con un nivel equivalente sonoro mayor de los 55 dB(A) [Ausejo *et al.*, 2011; Murphy and King, 2011] y que hasta 250 millones de europeos viven en áreas donde los niveles de ruido pueden causar molestias serias durante el día [Nijland *et al.*, 2003], más de la mitad de los habitantes de las aglomeraciones urbanas europeas. Igualmente, el 10% de la población total está duramente expuesta al ruido del tráfico debido a flujos lentos y restringidos en carreteras y calles [Milford *et al.*, 2012].

En el caso concreto de Andalucía, los estudios estadísticos sobre la población de los últimos años arrojan resultados recurrentes en relación con la percepción de los ciudadanos sobre los principales problemas en el ámbito local, situando siempre el ruido entre los más importantes [CMAOT, 2013] (figura 1.14). Y entre sus fuentes, sobresale de entre todas el ruido procedente de turismos y automóviles como la principal causa del ruido del tráfico.

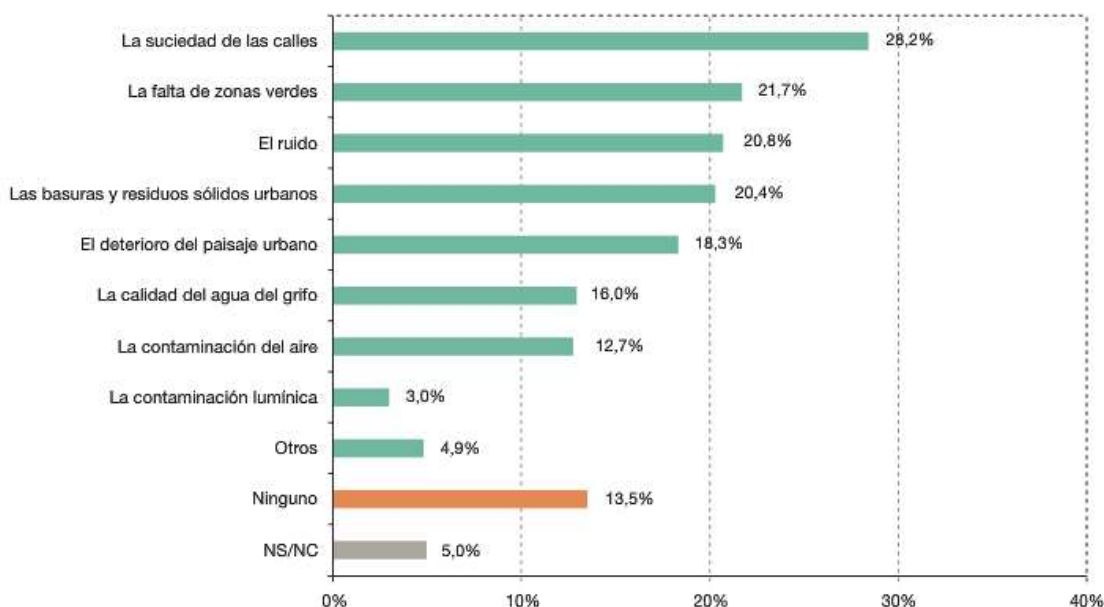


Figura 1.14: Resultados de opinión de los andaluces sobre los más importantes problemas medioambientales. Fuente: [CMAOT, 2013].

En los últimos años, se observa que los efectos del ruido crecen en forma proporcional a la capacidad de los transportes para inundar los espacios de tal manera que afectan cada vez a espacios más amplios y durante períodos de tiempo más prolongados,

razón por la que el ruido del tráfico se ha convertido en uno de los contaminantes medioambientales más importantes que afectan a la salud y el bienestar de la sociedad contemporánea, como ya se ha recogido anteriormente [Sato *et al.*, 1999]. De hecho, desde 1992, la contaminación sonora es, por encima de otros impactos sobre el medio ambiente, el único sobre el que se han incrementado las quejas presentadas por los ciudadanos europeos [Öhrström *et al.*, 2006].

Además, el ruido procedente del tráfico de carretera es más molesto que el de otros medios de transporte, como el ferrocarril, puesto que se ha documentado que mientras que las molestias causadas por el tráfico ferroviario es mayor en los espacios próximos al ferrocarril que en áreas distantes, no hay diferencia en la relación de las molestias y el ruido procedente de las carreteras entre ambas zonas [Moriyama *et al.*, 2004]. Igualmente, está publicado que, para un mismo nivel sonoro, es más difícil vivir con ruido del tráfico que con ruido de avión [Ouis, 2001].

Por todo ello, se hace necesario el empleo de la ingeniería para reducir el ruido del tráfico, para lo que es preciso conocer los mecanismos por los que este ruido se produce y cómo se ve afectado por las diferentes características de la carretera y el tráfico.

Así, en primer lugar, pueden distinguirse las siguientes **fuentes principales en el ruido producido por el tráfico** [Meiarashi *et al.*, 1996]:

- El ruido propio del vehículo (motor, transmisión, accionamiento, escape de gases, sistema de refrigeración), que es el predominante a velocidades bajas, depende fundamentalmente de la carga del motor y su radio de giro, así como de la edad del vehículo.
- Los ruidos aerodinámicos del vehículo, motivados por las turbulencias que se generan al paso del mismo, cobran especial importancia a las velocidades más elevadas (por encima de 100 km/h).
- Y el ruido de rodadura, que suele ser el predominante a velocidades altas (por encima de 50 km/h para vehículos ligeros y 70 km/h para los pesados). Este ruido responde al producido por el impacto del neumático con la superficie del firme al rodar sobre él y tiene su origen en vibraciones radiales del neumático y

en vibraciones del aire confinado entre el pavimento y el neumático y de los propios áridos del pavimento [Watts *et al.*, 1999; Kraemer *et al.*, 2001] debido a tres mecanismos simultáneos: i) el aire es expulsado; ii) un poco de aire queda atrapado y comprimido; iii) aire es aspirado hacia adentro. Esta sucesión de compresión y expansión del aire ocurre cientos o miles de veces por segundo, lo que da lugar a las vibraciones que originan el ruido [Praticò and Anfosso-Lédée, 2012].

En segundo lugar, y teniendo lo anterior en cuenta, el ruido producido por el tráfico depende fundamentalmente de los siguientes **factores** [Burt, 1971]:

- La intensidad del tráfico, de modo que, en general, a mayor flujo de vehículos, mayor ruido, aunque influye de manera muy importante la composición del flujo del tráfico, distinguiendo entre vehículos ligeros y pesados [Filho *et al.*, 2004].
- La velocidad de los vehículos, de tal modo que el nivel sonoro debido al tráfico es proporcional al logaritmo de la velocidad [Ouis, 2001].
- El grado de inclinación de la calzada, que hace aumentar el ruido del tráfico al provocar que el ruido procedente de los neumáticos se haga aún más predominante, además de afectar sobre todo a los picos de nivel sonoro, es decir, a los eventos sonoros más ruidosos, mientras que no afecta al ruido de fondo, sobre el que afecta de forma más importante el ruido de los motores [Tang and Tong, 2004]. Así, se estima que una carretera con un 5% de pendiente provoca unos 3 dB(A) más de nivel sonoro que una a nivel [Williams, 1971].
- Las características del pavimento, como su textura, rugosidad, porosidad, espesor y edad, entre otras [Mak *et al.*, 2011].
- Las aceleraciones/deceleraciones de los vehículos, ya que influyen los arranques y detenciones debidas a la señalización viaria, intersecciones, pasos de peatones y otras interrupciones, y con todo ello las molestias aumentan igualmente [Freitas *et al.*, 2012].

Obviamente, estos factores están interrelacionados entre sí, de modo que si la velocidad de los vehículos requerida para una carretera se incrementa, es necesario que la rugosidad del firme sea mayor para poder ofrecer una adecuada adherencia y resistencia a la rodadura, pero desgraciadamente esta característica provoca la emisión de ruido, a la vez que la textura de la capa de rodadura influye de manera decisiva en la apreciación subjetiva del ruido del tráfico rodado. De hecho, en el caso de los firmes de hormigón, a la capa de rodadura normalmente se la provee de una rugosidad adicional mediante el cepillado de la capa aún sin curar en sentido transversal a la calzada, de modo que se consigue una textura profunda para proporcionar una alta resistencia al deslizamiento y gran durabilidad, pero ello produce excesivo ruido [Watts, 1996(b)].

Dependiendo del nivel total de ruido, el ruido procedente del tráfico rodado puede ser percibido de diferentes maneras. Así, a niveles altos de ruido y elevado tráfico, el patrón temporal del ruido será continuo con picos mayores ocasionales, pero a niveles bajos de ruido, el procedente del tráfico puede ser oído como una serie de «eventos sonoros» claramente definidos, correspondiendo a cada vehículo pesado por encima del ruido de fondo producido por los vehículos ligeros. De hecho, suele tomarse el ruido producido por un vehículo pesado como, al menos, unos 10 dB(A) superior al generado por un vehículo ligero [Gjestland, 1987] e igualmente se sabe que el ruido generado por los vehículos pesados suele tener un mayor contenido de componentes sonoros a bajas frecuencias, tanto para tráfico fluido como congestionado [Ouis, 2001].

En la tabla 1.10 pueden observarse valores de niveles máximos de ruido originados por distintas formas de transporte, lo que puede hacer una idea inicial del problema producido por ellos [Ministerio de Fomento, 2004].

Todos estos datos ponen en evidencia la importancia que en los últimos años, con motivo del gran desarrollo del transporte por carretera, ha tomado el problema del ruido del tráfico. Se hace necesario, por tanto, proceder a su estudio detallado y a la búsqueda de posibles soluciones para evitarlo o, al menos, corregirlo, que exigen la toma de decisiones de importante repercusión, pero de complejo tratamiento y análisis.

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Tabla 1.10: Niveles máximos de ruido originados por diversas fuentes de transporte. Fuente: [Ministerio de Fomento, 2004].

| Fuente de transporte | Nivel de presión sonora (dB(A)) |
|---|---------------------------------|
| Automóvil al ralentí desde 7,5 metros | Entre 40 y 60 |
| Automóvil a 50 km/h desde 7,5 metros | Entre 60 y 80 |
| Camión a 50 km/h desde 7,5 metros | Entre 75 y 90 |
| Motocicletas a 50 km/h desde 7,5 metros | Entre 50 y 100 |
| Tren eléctrico a 200 km/h | Entre 90 y 110 |
| Avión comercial despegue a 100 metros | 110 |
| Avión militar a bajo nivel | 105 a 120 |
| Umbral de daño de la capacidad auditiva | Entre 120 y 140 |

1.3. NORMATIVA DE APLICACIÓN.

1.3.1. Normativa europea.

Uno de los principales elementos sobre los que se apoya la investigación objeto de esta tesis doctoral es la legislación y normativa técnica en relación con el ruido debido a las carreteras, puesto que van a determinar los objetivos que deben ser alcanzados por la metodología que se pretende desarrollar. De ahí la importancia de comenzar sentando las bases normativas en el ámbito de estudio, en los diferentes niveles administrativos que confluyen en nuestro territorio, partiendo por el contexto europeo, del que nacen ciertamente los demás estamentos legales.

La publicación por la Comisión Europea, en noviembre de 1996, del denominado Libro Verde de la Unión Europea sobre «Política futura de lucha contra el ruido» puede ser considerado como el primer paso en el desarrollo de una nueva política comunitaria global de lucha contra el ruido ambiental [Sanz, 2007; Murphy and King, 2011].

De acuerdo con las directrices marcadas en los años anteriores y basándose en las normativas técnicas sobre equipos acústicos, medición de ruido y emisiones sonoras de

diferentes fuentes de ruido, así como otros documentos elaborados por Comités Técnicos y Grupos de Trabajo Europeos y la Organización Mundial de la Salud, la Unión Europea adopta la **Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre «Evaluación y Gestión del Ruido Ambiental»** (llamada comúnmente «Directiva Europea de Ruido Ambiental»), con el objetivo de establecer una política comunitaria común en la lucha contra el ruido [Directiva 2002/49/CE, 2002]. Hasta entonces, la reglamentación se había centrado sobre la mejora de la fabricación de las fuentes del ruido y las disposiciones tendentes a reducir el ruido en origen habían dado sus frutos, pero el resultado beneficioso de estas medidas sobre el ruido ambiental se vio minorado por la combinación de otros factores que no habían sido tenidos en cuenta.

De este modo, la citada Directiva nació con la finalidad de establecer un enfoque común destinado a proporcionar una base para desarrollar y completar el conjunto de medidas en relación con la exposición al ruido ambiental, entendido este último, como el ruido en exteriores procedente del tráfico de carreteras, de los ferrocarriles, del tráfico aéreo y de la actividad industrial [Murphy and King, 2011]. De este modo, la Directiva examina cuatro áreas clave relacionadas con la evaluación y gestión del ruido ambiental en los Estados miembros [Murphy and King, 2010; Murphy and King, 2011]:

- La elaboración de mapas estratégicos de ruido de las principales infraestructuras y de las grandes aglomeraciones por parte de las autoridades competentes. Se profundiza más adelante sobre los mapas, dada su importancia capital para el estudio del problema que se afronta en la investigación.
- La estimación de población expuesta a niveles de ruido superiores a los establecidos.
- La planificación de acción contra el ruido donde los niveles sean elevados y mantener la calidad ambiental sonora donde esta sea adecuada. De ella emanan los denominados Planes de Acción contra el Ruido, objeto principal de esta tesis, puesto que la metodología propuesta se centra en la elaboración rigurosa de los mismos. Por esta razón, merece también un detalle especial, que se desarrolla posteriormente.

- Y, finalmente, la difusión de los resultados y sus efectos a la información pública.

Se trata, por tanto, de la normativa básica de referencia para este estudio, ya que establece los criterios, parámetros, plazos y formas de actuación en relación con el ruido ambiental en general y acerca del ruido procedente de las carreteras en particular. Así, los **plazos fijados** son los siguientes [Directiva 2002/49/CE, 2002]:

- 30-06-2007: ejes viarios con más de 6.000.000 veh/año; ejes ferroviarios con más de 60.000 trenes/año; grandes aeropuertos; y aglomeraciones con más de 250.000 habitantes.
- 30-06-2012: todos los grandes ejes viarios; todos los grandes ejes ferroviarios; y todas las aglomeraciones urbanas.

A los efectos de esta Directiva (y, por tanto, del resto de normativa que emanaría de ella) «gran eje viario» se define como cualquier carretera regional, nacional o internacional, con un tráfico superior a tres millones de vehículos por año.

Es decir, la Directiva marcó un horizonte inicial en el año 2007 para la elaboración de los mapas de ruido y los planes de acción de las carreteras de tráfico superior a los 6.000.000 veh/año, y para cinco años después, en 2012, ampliaba la obligatoriedad de estos estudios para las carreteras por encima de la mitad de dicho tráfico. Además, todos estos estudios deberán ser revisados desde entonces cada cinco años, como mínimo. Por supuesto, los datos de tráfico que deben ser utilizados para la elaboración de los mapas serán los correspondientes al año civil anterior [Directiva 2002/49/CE, 2002].

Por su parte, se considera aglomeración urbana a aquellos municipios con una población superior a 100.000 habitantes y con una densidad de población tal que el Estado miembro la estima zona urbanizada.

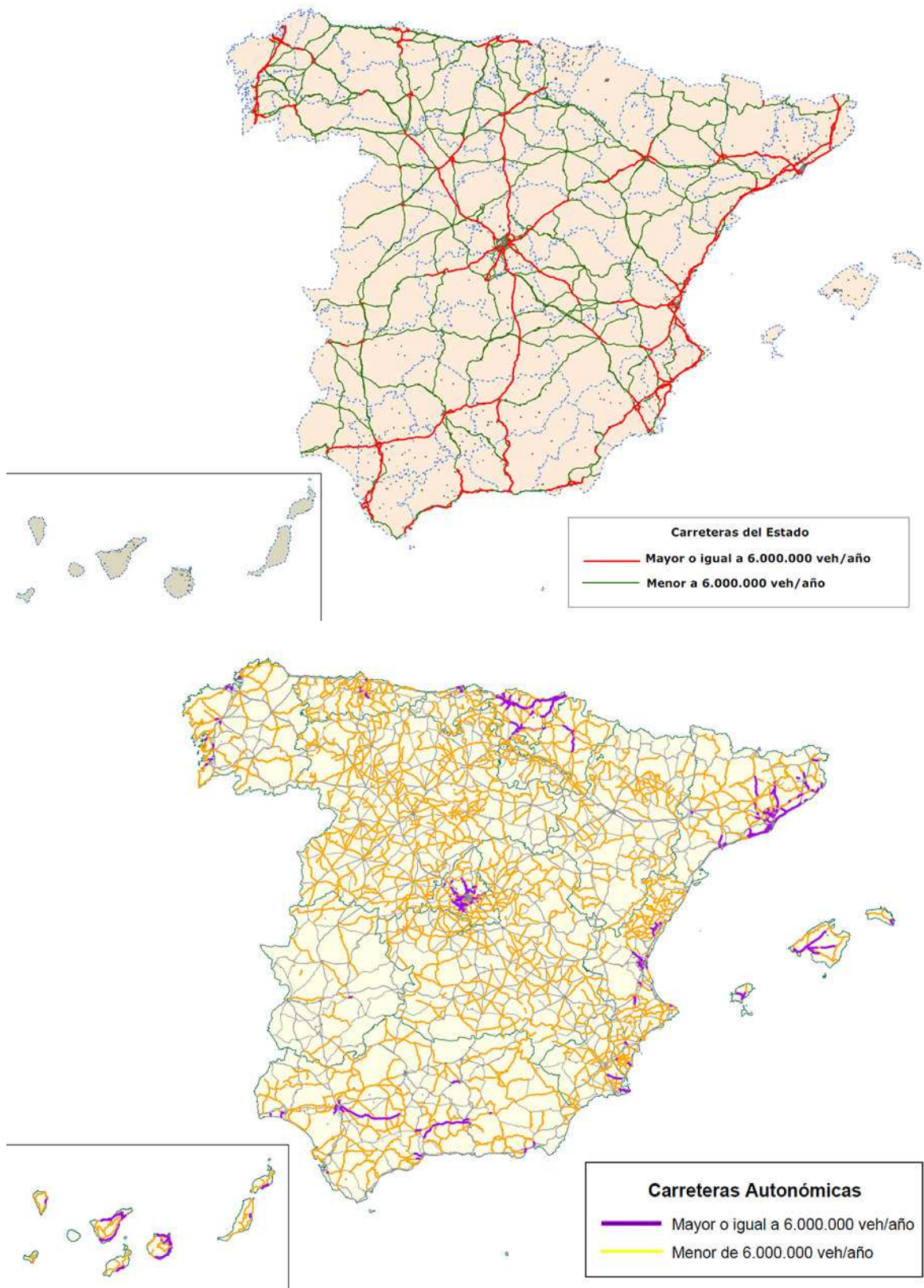


Figura 1.15: Carreteras de la Red de Carreteras del Estado y de las Comunidades Autónomas incluidas en la primera fase de aplicación de la Directiva 2002/49/CE en España. Fuente: sicaweb.cedex.es.

1.3.2. Normativa nacional.

El Artículo 14 de la Directiva Europea de Ruido Ambiental establece la obligatoriedad hacia los Estados miembros de la Unión Europea de incorporarla a la legislación nacional mediante las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas necesarias para dar cumplimiento a lo establecido en la misma antes del 18 de julio de 2004 [Directiva 2002/49/CE, 2002].

Así, como fruto de este mandato, surge la **Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido**, que constituye la norma básica de carácter y ámbito estatal reguladora del ruido. El ruido carecía hasta esta ley de una norma general reguladora de ámbito estatal, y su tratamiento normativo hasta entonces, en el ámbito de su evaluación y gestión, se limitaba a las ordenanzas municipales que conciernen al bienestar ciudadano o al planeamiento urbanístico y a normas emanadas de los gobiernos de las Comunidades Autónomas.

Esta Ley incorpora en su articulado las previsiones básicas de la Directiva 2002/49/CE y establece las bases para el desarrollo de una estructura básica armonizada a nivel nacional que permita reconducir la normativa dispersa sobre contaminación acústica que se había estado generando con anterioridad a nivel autonómico y municipal.

Para dotar de eficacia a la Ley se hace necesario el desarrollo reglamentario de su articulado. En este sentido, el **Real Decreto 1513/2005**, aprobado en el Consejo de Ministros de 16 de Diciembre de 2005, tiene como finalidad realizar este desarrollo en la parte referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental, completando aquellos aspectos de la Directiva 2002/49/CE que no fueron recogidos en la propia Ley, por ser objeto de un desarrollo reglamentario posterior, de acuerdo con sus previsiones.

El Real Decreto 1513/2005 establece un marco básico destinado a evitar, prevenir o reducir con carácter prioritario los efectos nocivos, incluyendo las molestias, de la exposición al ruido ambiental al que están expuestos los seres humanos, en particular, en zonas urbanizadas, en parques públicos u otras zonas tranquilas en campo abierto, en las proximidades de centros escolares, en los alrededores de hospitales y en otros edificios y lugares vulnerables al ruido. Para ello se desarrollan los conceptos de ruido ambiental y sus

efectos y molestias sobre la población, junto a una serie de medidas que permiten la consecución del objeto previsto, como son los mapas estratégicos de ruido, los planes de acción y la información a la población. Fija así el ámbito territorial de los mapas estratégicos de ruido, que deberá extenderse, como mínimo, hasta los puntos del territorio en el entorno de los grandes ejes viarios, grandes ejes ferroviarios y grandes aeropuertos, donde se alcancen, debido a la emisión de niveles de ruido propios, valores L_{den} de 55 dB(A) y valores L_{noche} de 50 dB(A).

Posteriormente, fue promulgado el **Real Decreto 1367/2007**, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. Este nuevo desarrollo reglamentario tiene como principal finalidad completar el anterior decreto en los siguientes aspectos:

- Se definen índices de ruido y de vibraciones, sus aplicaciones, efectos y molestias sobre la población y su repercusión en el medio ambiente.
- Se delimitan los distintos tipos de áreas y servidumbres acústicas definidas en el artículo 10 de la Ley 37/2003, atendiendo al uso predominante del suelo, en los tipos que determinen las comunidades autónomas.
- Se establecen los objetivos de calidad acústica para cada área, incluyéndose el espacio interior de determinadas edificaciones.
- Se regulan los emisores acústicos fijándose valores límite de emisión o de inmisión.
- Se determinan los procedimientos y los métodos de evaluación de ruidos y vibraciones, haciendo especial hincapié en los mapas de contaminación acústica.

En lo que respecta a las carreteras, el artículo 4 de la ley 37/2003 determina las diferentes atribuciones competenciales de los ámbitos de actuación en la materia, de modo que en relación con los ejes viarios será la Administración General del Estado la que estudie las carreteras de la Red de Interés General del Estado, mientras que corresponderá

a la comunidad autónoma su estudio si el ámbito territorial del mapa de ruido de que se trate excede de un término municipal, y al ayuntamiento correspondiente en caso contrario.

Los plazos fijados tanto para la elaboración de los mapas de ruido como para la aprobación de los correspondientes planes de acción son transcritos directamente de los ya establecidos por la Directiva Europea de Ruido Ambiental, y que se detallarán en los capítulos siguientes.

Posteriormente, y como consecuencia de una Sentencia del Tribunal Supremo al estimar parcialmente un recurso contra el Real Decreto 1367/2007, fue preciso modificar este, lo cual tuvo lugar mediante el **Real Decreto 1038/2012**, de 6 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de Noviembre, del ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. La citada sentencia, de 20 de julio de 2010, anulaba la expresión «Sin determinar» que figuraba en relación con el «Tipo de Área Acústica f)» dedicada a los «Sectores del territorio afectados a sistemas generales de infraestructuras de transporte, u otros equipamientos públicos que los reclamen», dentro de la tabla A, que establece «Los objetivos de calidad acústica para ruido aplicables a las áreas urbanizadas existentes», del anexo II del mencionado real decreto, dedicado a los denominados «Objetivos de calidad acústica», para que se solventara la situación de indeterminación a la que conducía. La necesaria modificación se hizo en el sentido de establecer que en los sectores del territorio afectados a sistemas generales de infraestructuras de transporte, u otros equipamientos públicos que lo reclamen, no podrán superarse, en sus límites, los objetivos de calidad acústica para ruido aplicables al resto de áreas acústicas que colinden con ellos.

Para terminar, tan sólo mencionar la existencia de abundante normativa técnica en relación con los procedimientos de control y de aseguramiento de la calidad de los dispositivos de reducción de ruido en carreteras, publicada por los organismos internacionales ISO y CEN y en su mayor parte editada también por AENOR en España, así como las prescripciones al respecto del ruido que se modificaron en el Código Técnico de la Edificación (que en relación a estos aspectos hasta entonces remitía a la Norma Básica de la Edificación «NBE CA-88 Condiciones acústicas en los edificios»), mediante

el Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el documento básico «DB-HR Protección frente al ruido» [Sanz, 2007].

1.3.3. Normativa autonómica.

Como se ha dicho, los órganos legislativos y normativos autonómicos de España generaron disposiciones en relación con el ruido ambiental, incluso con anterioridad al Estado o la propia Unión Europea, lo cual dio a gran dispersión de criterios y procedimientos dependiendo del contexto territorial dentro de España donde nos encontráramos. No es objeto de esta tesis doctoral hacer una revisión de todos estos textos legales para cada región, sino que se detendrá tan solo en citar las particularidades de la normativa andaluza, pues va a ser el ámbito en el que se desarrollen posteriormente los casos de estudio en aplicación de la metodología, la cual va ser establecida de acuerdo con los parámetros marcados por la Unión Europea (y, por tanto, la legislación nacional que transpuso la Directiva de Ruido Ambiental).

De este modo, cabe citar en primer lugar que, en el caso de Andalucía, la Comunidad Autónoma fue una de las que reguló esta materia con anterioridad a la legislación marco europea y estatal en la **Ley 7/1994, de 18 de mayo, de Protección Ambiental**, con el objeto de establecer una normativa que viniera a establecer y regular medidas tendentes a paliar el problema de la contaminación acústica. Al respecto del ruido, esta ley lo trataba en relación con la calidad del aire, al introducir el mismo como una de las causas posibles de contaminación atmosférica que pudieran implicar molestia grave, riesgo o daño inmediato o diferido, para las personas.

Esta Ley se fue completando con distintos textos normativos que desarrollaron reglamentariamente los límites de emisión e inmisión de ruidos. De este modo, en primer lugar fueron promulgados el Reglamento de la Calidad del Aire, aprobado por Decreto 74/1996, de 20 de febrero, que dedica el Título III a los ruidos, así como la Orden de 23 de febrero de 1996, que desarrolla el Decreto anterior, en materia de medición, evaluación y valoración de ruidos y vibraciones, y la Orden de 3 de septiembre de 1998, por la que se

aprueba el modelo tipo de ordenanza municipal de protección del medio ambiente contra ruidos y vibraciones.

Todo lo anterior provocó que la regulación de esta materia fuera un tanto confusa, con la consecuente dificultad para la aplicación de la misma, de modo que con la entrada en vigor de la Directiva 2002/49/CE y la Ley estatal 37/2003, la Junta de Andalucía, con objeto de adecuar el reglamento a la nueva normativa, procedió a sustituirlo a través del Decreto 326/2003, de 25 de Noviembre, que aprobó el Reglamento de protección contra la contaminación acústica. Con él se vino a recoger el ordenamiento jurídico existente en Andalucía sobre esta materia hasta entonces y se estableció una clasificación de las áreas de sensibilidad acústica, a la vez que se marcan los niveles límite de ruido ambiental en dichas áreas, como más adelante van a ser definidos.

Este decreto, además, desarrolló como instrumentos de evaluación y actuación frente a la contaminación acústica los mapas de ruidos, los planes de acción y las zonas acústicamente saturadas, así como la necesidad de poner a disposición de la población la información sobre el ruido ambiental y sus efectos. De este modo, establece la obligatoriedad de elaborar los mapas de ruidos y los consecuentes los planes de acción, a la Administración Autonómica o Local, competente por razón de la actividad, para los ejes viarios cuyo tráfico supere los seis millones de vehículos al año, antes del 30 de junio de 2007 y antes del 30 de junio de 2012 para los de más de tres millones, así como su aprobación y remisión al Ministerio competente en materia de Medio Ambiente, conforme a las exigencias de la Directiva Europea de Ruido Ambiental y de la Ley del Ruido estatal.

Posteriormente, la Junta de Andalucía promulgó la **ley 7/2007, de 9 de julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental**, en sustitución de la ley 7/94 y que en materia de contaminación acústica mantiene las prescripciones dictadas por la Directiva 2002/49/CE y establece una regulación ya de acuerdo con lo dispuesto en la Ley 37/2003 estatal. Asimismo, incluye también una nueva zonificación del territorio en áreas acústicas, establece el marco legal para la realización de mapas de ruido y planes de acción, incorpora la posibilidad de designar servidumbres acústicas y, por último, establece el régimen aplicable en aquellas zonas en las que no se cumplan los objetivos de calidad acústica exigidos.

Como nuevo desarrollo de esta ley y para sustituir al anterior, ya obsoleto en relación con esta nueva legislación marco, fue promulgado el Decreto 6/2012, de 17 de enero, por el que se aprueba el **Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía**, y se modifica el Decreto 357/2010, de 3 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento para la Protección de la Calidad del Cielo Nocturno frente a la contaminación lumínica y el establecimiento de medidas de ahorro y eficiencia energética.

1.3.4. Normativa municipal.

Como ya se ha dicho, el primer ámbito en que se reglamentó en materia de contaminación acústica fue el municipal, a base de ordenanzas que tenían como criterios principales el bienestar ciudadano o el planeamiento urbanístico.

De hecho, para proceder al total cumplimiento de la normativa anteriormente citada, dado que gran parte de la responsabilidad y competencia en materia de seguimiento, control y posterior adopción de medidas corresponde a los Ayuntamientos, son importantes las **ordenanzas municipales**, las cuales, tanto las existentes previamente como las de nueva creación, tuvieron que adaptarse a los niveles acústicos desarrollados en la normativa autonómica. Para ello, la Junta de Andalucía aprobó una nueva Orden que sustituyó al anterior Modelo Tipo de Ordenanza Municipal de protección de Medio Ambiente contra los ruidos y vibraciones, aprobado por Orden de la Consejería de Medio Ambiente de 3 de septiembre de 1998, dando lugar a un nuevo Modelo Tipo, publicado en el BOJA el 16 de Agosto de 2005 y que permaneció vigente hasta que el decreto 6/2012 lo derogó.

Por tanto, en la actualidad no existe modelo que unifique las ordenanzas municipales en materia de ruido ambiental, por lo que se encuentra en proceso de elaboración de uno nuevo, aunque la normativa autonómica sí determina los contenidos que deben formar parte de estas ordenanzas.

De hecho, son numerosas las Corporaciones Locales que están generando y publicando estas ordenanzas. No obstante, en los casos, la mayoría, en que las Administraciones Locales no posean normativa propia, deben aplicar de manera supletoria los niveles de la autonómica.

Sin embargo, desde el punto de vista de la normativa municipal, sí es importante la zonificación acústica que determinen los Ayuntamientos, con vistas a la aplicación de los correspondientes objetivos de calidad acústica determinados en la normativa de ámbito superior.

1.4. MAPAS ESTRATÉGICOS DE RUIDO.

1.4.1. Introducción.

La evaluación cuantitativa de los niveles de ruido producido por el tráfico es la base sobre la que se apoyan las técnicas de control de ruido y puede llevarse a cabo a través de dos formas distintas: medición y previsión [Damián Hernández, 2002]. Los **métodos de medición** consisten en la toma de medidas directas del ruido mediante instrumentos acústicos, como son los sonómetros, y pueden aplicarse a situaciones existentes. Los métodos de previsión se basan en el conocimiento de las teorías de emisión y propagación del sonido y permiten calcular los niveles de ruido a través de la simulación de situaciones reales o planificadas mediante modelos matemáticos o físicos.

Los métodos de previsión suelen ser los más utilizados gracias a sus menores costes y su adecuada fiabilidad, además de que sobre ellos pueden también aplicarse diferentes cálculos que modelicen las medidas de control sobre el ruido. Sin embargo, los métodos de medición sí serán indicados para comprobar una situación concreta y con unas características específicas, como puede ser para poder comparar los datos previos a la construcción de una carretera con los que el modelo de previsión arroje durante la fase de planificación o proyecto de la infraestructura, o bien para constatar empíricamente la

efectividad de alguna de las técnicas de control del ruido una vez implantadas en un punto definido.

Por tanto, es frecuente que ambos tipos de métodos se combinen para proporcionar una evaluación más precisa o más operativa.

En el caso concreto de su aplicación a las carreteras, existen diferentes **métodos de previsión** del ruido desarrollados y algunos de ellos vienen indicados por la normativa de referencia en un territorio concreto, pero todos ellos persiguen predecir el ruido producido por el tráfico cualesquiera que sean las condiciones de emisión y propagación del mismo.

De este modo, el cálculo de los niveles de emisión del ruido derivado de la intensidad de tráfico se basa generalmente en los niveles de ruido producido por diferentes categorías de vehículos, a una distancia prefijada, en condiciones de propagación a campo abierto. Luego hay que definir una serie de variables que influyen en el modo en que se propagarán estos niveles de ruido introducidos para el caso concreto de estudio, de acuerdo con lo tratado anteriormente. Por tanto, para ello se precisan los siguientes datos:

- Geométricos y topográficos.
- Superficie de rodadura.
- Tráfico (intensidad, composición, velocidad y distribución horaria).
- Usos del suelo, prestando especial atención a las actividades acústicamente sensibles.
- Tipos de edificación.
- Población según viviendas y zonas.
- Meteorológicos (temperatura, humedad y precipitación medias anuales).
- Definición de zonas acústicas.

Con todo ello se realiza la simulación acústica sobre el modelo topográfico en tres dimensiones, de forma que se obtienen los niveles sonoros estimados para un determinado tramo de carretera, y, al ser representados sobre la cartografía que lo define, dan lugar a un

mapa de ruido. Por tanto, en términos generales, los mapas de ruido no son más que un modo de representar niveles de ruido calculados y/o medidos en una área geográfica en particular [Murphy and King, 2011].

1.4.2. Definición.

En el apartado anterior se ha introducido el concepto de mapa de ruido, que es la herramienta más utilizada por la legislación sectorial y por la técnica de estudio acústico de infraestructuras. Desde el punto de normativo, se puede definir un **mapa de ruido** como: «la presentación de datos sobre una situación acústica existente o pronosticada en función de un indicador de ruido, en la que se indicará el rebasamiento de cualquier valor límite pertinente vigente, el número de personas afectadas en una zona específica o el número de viviendas expuestas a determinados valores de un indicador de ruido en una zona específica» [Directiva 2002/49/CE, 2002].

Pero el término exacto que utiliza la Directiva Europea de Ruido Ambiental y, por tanto, el resto de la normativa, es el de **mapa estratégico de ruido** (MER) (ya citado en el capítulo anterior), que es definido como «un mapa diseñado para poder evaluar globalmente la exposición al ruido en una zona determinada, debido a la existencia de distintas fuentes de ruido, o para poder realizar predicciones globales para dicha zona» [Directiva 2002/49/CE, 2002]. Del mismo modo, la Directiva fija una serie de requisitos mínimos sobre el contenido de estos mapas:

- Situación acústica existente.
- Rebasamiento de un valor límite.
- Número estimado de viviendas, colegios y hospitales expuestos.
- Número estimado de personas expuestas.

El objetivo de la elaboración de mapas de ruido correspondientes a infraestructuras es el de contar con una herramienta de diagnóstico y pronóstico que pueda valorar la evolución de los niveles de ruido emitido por las actividades relacionadas con la misma,

así como del grado de afección correspondiente, en función de sus características propias (material, dimensiones, antigüedad, climatología de la zona, etc.) y de las características y el número de vehículos que circulan por las mismas.

Actualmente, la gran experiencia que se ha recabado de la aplicación de la Directiva Europea de Ruido Ambiental desde su promulgación ha permitido generar una serie de documentos clave sobre los MER, tales como [WG-AEN, 2007; WG-AEN, 2008]:

- Documentos relativos al proyecto IMAGINE que tratan sobre la experiencia recogida en Europa sobre la realización de mapas de ruido.
- Documentos relativos al proyecto HARMONOISE que tratan sobre la armonización de métodos predictivos de cálculo de ruido.
- Documentos relativos al proyecto GIpSynoise que tratan sobre la cartografía y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) relacionados con mapas de ruido.
- Documentos de la Agencia Ambiental Europea (EEA).
- Documentos del Grupo de Trabajo de Evaluación de la Exposición al Ruido (WG-AEN). Dicho Grupo ha desarrollado uno de los documentos más influyentes, llamado *Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure* (GPG), además del informe relativo a la presentación de los mapas de ruido y la información al público.

1.4.3. Tipos.

Siguiendo con lo expresado hasta ahora, cabe hacer una clasificación de los MER, según los datos que presenten para alcanzar los objetivos exigidos por la normativa. Así, los resultados generados por los MER se componen de dos tipos de mapas: de niveles sonoros y de exposición al ruido; y se pueden dividir según la fase del estudio en que se elaboran entre mapas básicos y mapas detallados.

Mapas de niveles sonoros.

De acuerdo con lo anterior, los mapas de niveles sonoros se definen como mapas de líneas isófonas o líneas que unen puntos cuyos niveles de presión sonora son iguales, elaborados a partir de los niveles de ruido calculados en puntos receptores a lo largo de toda la zona de estudio, que delimitan determinadas bandas entre diferentes rangos de valores de niveles sonoros, tanto para el período diario, vespertino, nocturno y día-tarde-noche, como ya han sido definidos. Ello permite calcular las áreas afectadas por cada intervalo de niveles sonoros, representadas en el mapa con diferentes colores, y sirven de base para los mapas de exposición al ruido, que seguidamente se desarrollan.

Mapas de exposición al ruido.

Estos mapas tienen por objeto presentar los datos de niveles de ruido en fachada de edificios de viviendas, evaluando el número de viviendas y personas que habitan en ellas y están expuestas a esos niveles en cada zona.

Tal como está actualmente planteada la Directiva Europea de Ruido Ambiental, no existe un método estándar para medir la exposición de la población al ruido, sino que la norma tan sólo hace hincapié en la importancia de que los mapas de ruido proporcionen información sobre el número de personas que viven en viviendas que están expuestas a determinados intervalos de nivel de ruido en la fachada más expuesta. La Guía de Buenas Prácticas para los mapas estratégicos de ruido y la predicción de los datos asociados a la exposición al ruido del Grupo de Trabajo sobre Evaluación de la exposición a ruido de la Comisión Europea hace una serie de recomendaciones relativas a la evaluación de la exposición de la población en función del tipo de datos disponibles en cada Estado miembro. Sin embargo, las orientaciones sugeridas están muy lejos de un enfoque metodológico estandarizado [Murphy and King, 2010].

Visto lo anterior, la población expuesta se suele estimar determinando el número de unidades residenciales para cada edificio en el área de estudio, a las que luego se les asigna una media de tamaño familiar de acuerdo con el censo de la zona donde el edificio se sitúa, con lo que puede obtenerse la población residencial estimada para cada edificio. Esta

estimación tiene la debilidad de incluir como población permanente aquella que sólo habita en el edificio por períodos estacionales, así como incluir a toda la población del edificio como expuesta a la fachada más ruidosa, con lo que se produce un exceso [Murphy and King, 2011]. De igual modo, se suelen establecer otras simplificaciones en algunas zonas en cuanto a la definición de las fachadas de los edificios, como al asignar niveles de ruido al perímetro completo del edificio o a una parte del mismo, si el edificio resultara estar situado en dos o más rangos diferentes de niveles de ruido.

Por otro lado, para el cálculo de los niveles de ruido en fachada de estos mapas, se debe tener en cuenta el sonido incidente sobre la fachada del edificio que se analiza en cada caso, así como las posibles reflexiones en el resto de los edificios y obstáculos.

Así, como resultado de los cálculos, se suelen obtener mapas que determinan los números totales de personas que habitan en viviendas expuestas a diferentes rangos de valores de $L_{\text{día}}$, L_{tarde} , L_{noche} y L_{den} , aunque es de destacar también que la Directiva no establece valores límite de referencia para la exposición de la población a L_{den} y L_{noche} [Murphy and King, 2010].

Mapas básicos y detallados.

La diferencia fundamental entre estos dos tipos de mapas, que pueden a su vez ser de niveles sonoros y de exposición, estriba, como su propio nombre indica, en el grado de detalle con que están elaborados, dependiendo de la fase en que se encuentre el estudio.

De esta manera, los mapas básicos se generan para la totalidad del área de estudio para la que están concebidos, presentando los datos de niveles de ruido y de exposición en toda la franja a ambos lados de la carretera, habitualmente a una escala superior a la que se utiliza para los mapas detallados.

Por su parte, los mapas detallados se suelen centrar en aquellas zonas urbanas de carácter residencial o con gran presencia de viviendas, y alta densidad de edificación, así como zonas docentes y hospitalarias que presentan problemas de niveles sonoros excesivos. Cuando estos mapas se elaboran a partir de los datos de ruido debido al tráfico,

se obtienen así aquellos puntos conflictivos debido al ruido de las carreteras, con lo que se delimitan los tramos o zonas donde es preciso aplicar medidas de acción contra el ruido, que es uno de los objetivos principales de estas previsiones.

1.4.4. Metodologías para la realización de los mapas estratégicos de ruido.

Antes incluso de la estandarización que ha generado la normativa legal, en el caso de España sobre todo a partir de la Directiva Europea de Ruido Ambiental, los primeros mapas de ruido realizados en los años 80 y 90, se elaboraron mediante medidas experimentales [Recuero *et al.*, 1996; Recuero *et al.*, 1997]. Así, para una correcta elaboración de dichos mapas, se debía llevar a cabo un plan de muestreo espacial [Sommerhoff *et al.*, 2004], para lo que se debía seguir una metodología concreta. Las metodologías de muestreo espacial mediante **medidas experimentales más empleadas** para realizar mapas de ruido son las siguientes [Romeu *et al.*, 2006; Pavón and Recuero, 2006]:

- Metodología de retícula o rejilla. Consiste en dividir la zona bajo estudio mediante una rejilla de una distancia fija y realizar las medidas en los nodos de la rejilla. Las distancias habitualmente utilizadas mediante este método pueden oscilar entre los 50 y los 300 m, en función de la dimensión del área bajo estudio.
- Metodología de viales o tráfico. Esta técnica consiste en realizar una categorización de las vías, y muestrear diferentes puntos de las vías asumiendo que las de la misma categoría presentarán niveles de ruido similares.
- Muestreo en zonas específicas. Esta metodología se suele emplear cuando un muestreo mediante rejilla o mediante viales es insuficiente porque deja sin cubrir una zona concreta en la que se concentra un ruido específico, como el ruido de ocio nocturno.

- Muestreo de función de los usos de suelo. Este muestreo se realiza teniendo en cuenta las características del suelo, en función de las categorías de planificación territorial de la aglomeración: uso comercial, uso residencial, etc. Los puntos serán representativos de cada uso de suelo.
- Metodología de zonas aleatorias. Es habitual emplear esta metodología cuando no se puede trazar una retícula, no procede la utilización del método de viales o porque no hay una zona específica en la que se concentre el ruido.

A pesar de las metodologías descritas, es común la realización de campañas de medida de ruido combinando varios métodos [Romeu *et al.*, 2006; Sommerhoff *et al.*, 2004], adaptándose a las características de la aglomeración bajo estudio y optimizando tiempo y coste de la campaña.

Desde los años 50, hay una evolución en el desarrollo de los modelos de tráfico rodado, lo que implica un aumento del interés por la modelización del ruido que provoca dicha fuente [De Coensel *et al.*, 2005)]. Así, se desarrollan **modelos de predicción de ruido mediante ecuaciones matemáticas** [Steele, 2001]. Consecuentemente, se continúan realizando modelos de los fenómenos físicos de propagación [ISO, 1993(a); ISO, 1993(b)], los efectos de la climatología y otras fuentes de ruido, como los ferrocarriles, aviones e industrias [European Commission, 2003].

De esta manera, se establece otra metodología para determinar el ruido en ambientes exteriores, mediante ecuaciones de predicción. Estas ecuaciones pueden ser simplificadas [Ausejo and Recuero, 2006] o pueden implicar el desarrollo de un modelo de aplicación de ámbito nacional, como sucedió en muchos países europeos [Steele, 2001]. Algunos de estos modelos de predicción de ruido por tráfico rodado más comunes en Europa son:

- Modelo francés NMPB.
- Modelo inglés CoRTN.
- Modelo alemán RLS90.
- Modelo escandinavo SP96.

Partiendo de la proliferación de estos modelos matemáticos de predicción de ruido, a partir de los años 90 se dispara la utilización de programas de simulación de ruido en ambientes exteriores. Aunque la Directiva Europea de Ruido Ambiental establece que los mapas de ruido se realizarán mediante métodos de medición o métodos de cálculo, es muy común basar la realización de un mapa en técnicas de simulación, validando los resultados mediante medidas experimentales [Manvell, 2005]. De esta manera, la Directiva establece en su anexo II los siguientes **métodos de cálculo** para las diferentes fuentes de ruido [Directiva 2002/49/CE, 2002]:

- Ruido Industrial: ISO 9613-2 [ISO, 1993(b)]. De forma complementaria, recomienda la obtención de datos mediante otras recomendaciones internacionales.
- Ruido de aviones: ECAC.CEAC 1997.
- Ruido de tráfico rodado: método francés NMPB-Routes-96 (SETRA-CERTU-LCPC-CSTB), mencionado en el «*Arrête 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». Por lo que se refiere a los datos de entrada sobre la emisión, estos documentos se remiten al «*Guide du bruit des transports terrestres, fascicule prévision des niveaux sonores, CETUR 1980*» [NMPB, 1996].
- Ruido de trenes: método holandés RMR 1996, que posteriormente fue actualizado (TRER 2002).

Con el aumento del uso de programas de simulación para predecir niveles de ruido [DIN, 2006], aumentan las comparaciones entre fabricantes de software [Pompoli *et al.*, 1995; Suárez y Recuero, 2000] y comienzan a emplearse entornos SIG en la elaboración de los mapas [Manvell, 2003(a); Manvell, 2003(b); Manvell and Aflalo, 2003; Stapelfeldt and Shilton, 2006]. La necesidad de crear mapas de ruido de grandes extensiones, requiriendo una gran cantidad de datos de entrada, impulsa a numerosos grupos de investigación a desarrollar sus propios programas de simulación [Farina *et al.*, 2006; King and Rice, 2009].

Por tanto, en un intento por armonizar la elaboración de los mapas de ruido, se crea un Grupo de Trabajo Europeo que crea la GPG [WG-AEN, 2007]. En dicha guía se establecen una serie de recomendaciones a seguir para la correcta elaboración de los mapas. Entre otras cosas, se establecen valores por defecto y soluciones alternativas para la obtención de los datos necesarios para la realización de los mapas. Dichos datos, se pueden dividir en tres grandes grupos:

- Datos relacionados con la fuente de ruido. En este apartado, se tienen en cuenta los datos relacionados con tráfico rodado, ferroviario e industrial; tratando los datos relacionados con los aviones aparte.
 - Flujo de tráfico para cada tramo horario.
 - Velocidad media del tráfico para cada tramo horario.
 - Composición del tráfico y de la velocidad para cada tramo horario.
 - Tipo de superficie de la carretera.
 - Fluctuaciones de velocidad en los cruces.
 - Pendiente de la carretera.
 - Potencia acústica de trenes, tranvías o trenes ligeros.
 - Velocidad de los trenes o tranvías.
 - Potencia acústica de las fuentes de ruido industriales.
- Datos relacionados con la propagación del sonido. Estos datos están relacionados con los obstáculos acústicos y las condiciones que influyen en la propagación del sonido.
 - Elevación del terreno en las cercanías de la fuente.
 - Zanjas, terraplenes y desniveles.
 - Tipo de superficie del terreno.
 - Altura de barreras en las cercanías de las carreteras.
 - Altura de los edificios.
 - Coeficiente de absorción sonora de edificios y barreras.
 - Frecuencia de condiciones de propagación sonora favorables.
 - Humedad y temperatura.
- Datos relacionados con el receptor de ruido. La finalidad de estos datos es cuantificar el número de población expuesta a determinados niveles de ruido.

- Asignación de la población en edificios residenciales.
- Determinación del número de viviendas por cada edificio residencial y del número de habitantes por cada vivienda.
- Asignación de los niveles de ruido a los residentes de edificios con varias localizaciones de viviendas.

1.5. PLANES DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO.

1.5.1. Definición.

Como se acaba de ver, los mapas de ruido permiten realizar una evaluación objetiva de la realidad acústica existente en una zona determinada, y para ello estudian un entorno concreto mediante determinados indicadores de ruido, la superación de los niveles límite en dicha zona, la cantidad de viviendas, colegios u hospitales sometidos a determinados niveles de ruido o el número aproximado de personas sometidos a dichos niveles [WG-AEN, 2007].

Los mapas de ruido constituyen, por tanto, una herramienta útil para cuantificar y planificar la reducción de ruido [Silence Project, 2009], de modo que las acciones resultantes se engloban en los denominados Planes de Acción. En este contexto se encuentra el concepto de planificación acústica, entendida por la Directiva Europea de Ruido Ambiental como «el 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, 2002].

De hecho, también según la Directiva, los **Planes de Acción contra el Ruido** (PAR) son definidos como aquellos «encaminados a afrontar las cuestiones relativas al ruido y a sus efectos, incluida la reducción del ruido si fuere necesario» [Directiva 2002/49/CE, 2002]. Por tanto, los PAR tienen como objetivo reducir a escala local el número de personas expuestas a niveles de ruido que superen los límites permitidos y

disminuir, en la medida de lo posible, el nivel de ruido general de la zona o aglomeración bajo planificación [Ausejo *et al.*, 2011].

Los pasos generales para realizar un plan de acción se podrían resumir de la siguiente manera [Silence Project, 2009]:

- Revisión de los valores límite, marco legal y situación relativa al ruido.
- Detección y análisis de los puntos conflictivos.
- Identificación de las medidas reductoras de ruido.
- Estrategias de reducción de ruido a largo plazo.
- Análisis de coste – efectividad.
- Análisis de coste – beneficio.
- Redacción del plan.
- Aprobación, supervisión e información.
- Revisión y modificación.

De acuerdo con la Directiva y las leyes españolas que han traspuesto sus indicaciones, la aprobación de los planes de acción en materia de contaminación acústica debida al tráfico de las carreteras debían cumplir los siguientes **plazos** [Directiva 2002/49/CE, 2002; Ley 37/2003 de España, 2003]:

- Antes del día 18 de julio de 2008, los correspondientes a los ámbitos territoriales de los mapas de ruido elaborados en 2007, es decir, en el caso concreto de las carreteras, para los ejes viarios de más de 6.000.000 veh/año.
- Antes del día 18 de julio de 2013, los correspondientes a los ámbitos territoriales de los mapas de ruido elaborados en 2012, es decir, en el caso concreto de las carreteras, para los ejes viarios de más de 3.000.000 veh/año.

Además, los PAR se revisarán, y en caso necesario se modificarán, cuando se produzca un cambio importante de la situación existente del ruido, y al menos cada cinco

años a partir de la fecha de su aprobación, que es su período de vigencia [Murphy and King, 2010].

Una estrategia de gestión contra el ruido ambiental debido al tráfico debe perseguir dos objetivos principales [Bergendahl, 1976; Naish, 2010]:

- Identificar puntos o zonas que requieran un estudio detallado para la valoración del ruido del tráfico.
- Establecer una planificación de medidas a la luz de los resultados obtenidos para cada zona o tramo de carretera dentro del área de estudio, que intente coordinar las medidas impulsadas por cada administración implicada, así como de los promotores privados, con unos principios de eficiencia económica para poder conseguir una adecuada distribución del bienestar sonoro dentro de límites de ruido aceptables.

Es decir, para que cualquiera de las medidas incluidas en un PAR se lleve a cabo de forma eficaz, deben ser integradas en un proceso de planificación urbanística completo. Para ello, es imprescindible la colaboración entre departamentos, autoridades competentes y gobiernos locales, autonómicos y nacionales. De la misma manera, es absolutamente necesario, realizar una planificación de los recursos económicos [Silence Project, 2009].

Los requisitos que la normativa exige a los PAR vienen descritos en el Real Decreto 1513/2005, que en su anexo V especifica deben contener, como mínimo:

- Descripción de los ejes viarios.
- Autoridad responsable.
- Contexto jurídico.
- Valores límite establecidos según el área acústica.
- Resumen de los resultados de la labor de cartografiado del ruido.
- Evaluación del número estimado de personas expuestas al ruido, determinación de los problemas y las situaciones que deben mejorar.

- Relación de las alegaciones u observaciones recibidas en el trámite de información pública de acuerdo con el artículo 22 de la Ley del Ruido.
- Medidas que ya se aplican para reducir el ruido y proyectos en preparación.
- Actuaciones previstas por las autoridades competentes para los próximos cinco años, incluidas medidas para proteger las zonas tranquilas.
- Estrategia a largo plazo.
- Información económica (si está disponible): presupuestos, evaluaciones coste-eficacia o costes-beneficios.
- Disposiciones previstas para evaluar la aplicación y los resultados del plan.
- Estimaciones sobre reducción del número de personas afectadas (que sufren molestias o alteraciones del sueño).

Además, no hay que olvidar que los planes deben aplicarse sobre tramos de carreteras en los que las variables que los caracterizan se mantengan constantes, para que el proceso de elección de alternativas sea coherente.

Sin embargo, las prescripciones que marca la normativa de aplicación se quedan en este punto. Es decir, los MER permiten detectar aquellos tramos donde debe centrarse el PAR que determina la normativa, pero no determina de forma precisa cuáles pueden o deben ser estas medidas de atenuación del ruido. Y los diferentes textos legales, más allá de establecer la obligatoriedad de generar estos mapas y establecer planes tampoco delimitan las prioridades con que deben implantarse estas medidas, de ahí que esta debilidad del proceso quiera ser solventada mediante la metodología que plantea la presente tesis doctoral.

1.5.2. Situación actual en España y Andalucía.

Como se ha visto, la elaboración de los MER y los PAR correspondientes a las aglomeraciones urbanas y las infraestructuras del transporte, y más concretamente, en

relación con las carreteras, se establecía primeramente en **dos fases**, según el tráfico anual de los ejes viarios, de forma que la segunda fase ampliaba el ámbito de estudio, pero incluyendo la revisión de aquellos que fueron objeto de análisis en la primera fase. A partir de entonces, las siguientes fases consistirán en la revisión de los mapas y los planes cada cinco años.

Así, a más tardar, el 30 de junio de 2007, fueron elaborados y, en su caso, aprobados por las autoridades competentes, MER sobre la situación del año civil anterior, correspondientes a todas las aglomeraciones con más de 250.000 habitantes y a todos los grandes ejes viarios cuyo tráfico superara los seis millones de vehículos al año, grandes ejes ferroviarios cuyo tráfico superara los 60.000 trenes al año y grandes aeropuertos existentes en el territorio [Directiva 2002/49/CE, 2002]. Los planes de acción correspondientes a estos mapas debían estar listos al año siguiente, 2008.

Y, en el año 2012 debieron rehacerse los MER que ya fueron elaborados en 2007 y, además, completarse para las todas las aglomeraciones urbanas (definidas como la porción de un territorio, delimitado por cada Estado Miembro, con más de 100.000 habitantes y con una densidad de población tal que se considera como una zona urbanizada, pudiendo abarcar un municipio, una parte de un municipio o varios municipios) y a todos los grandes ejes viarios (de más de 3.000.000 de vehículos al año) y grandes ejes ferroviarios (cualquier vía férrea con un tráfico superior a 30.000 trenes por año) existentes. Por tanto, en 2013 debieron revisarse los planes que ya se formularon para los primeros ejes en 2008 y, en el caso concreto de las carreteras, además, completarse para los ejes de IMD mitad de los anteriores. La siguiente fase tendrá lugar en 2017.

La primera fase, aún en una época de relativa «normalidad económica» en las Administraciones, se completó con bastante éxito, de modo que se elaboraron MER en 19 aglomeraciones, 393 tramos o conjuntos de tramos de carreteras que abarcan un total de 8610 km (divididos entre 5953 km de carreteras estatales y 2657 km de carreteras autonómicas), 20 tramos de líneas de ferrocarril que suman un total de 813 km (689 km de líneas ferroviarias estatales, a las que se sumaron 124 km de ejes ferroviarios autonómicos) y 10 aeropuertos. Esos primeros resultados indicaron que 8.130.800 personas que habitan en las grandes aglomeraciones urbanas estaban afectadas por el ruido procedente del

tráfico rodado, el ferrocarril, los aeropuertos y las instalaciones industriales; y que fuera de estas aglomeraciones, las personas afectadas por los grandes ejes viarios ascienden a 2.116.100; las afectadas por grandes ejes ferroviarios suman 81.800 y por grandes aeropuertos, 143.700. En el caso concreto de carreteras, intervinieron, según su ámbito de competencia, en la generación de los mapas las siguientes Administraciones: Diputaciones de Álava, de Alicante, de Guipúzcoa y de Valencia, Generalidades de Cataluña y Comunidad Valenciana, Gobiernos de Canarias, Cantabria, Región de Murcia, Navarra, Principado de Asturias y Vasco, las Juntas de Andalucía y de Galicia y el Ministerio de Fomento (*sicaweb.cedex.es*).

Sin embargo, la segunda fase, que abarcaba un ámbito significativamente mayor para los mapas, ha gozado de menor seguimiento, debido fundamentalmente a los recortes económicos que han sufrido los organismos responsables. Así, los que hasta la fecha han elaborado los mapas correspondientes y los han remitido al Ministerio competente son solo los siguientes: Generalidad Valenciana, Gobiernos de Extremadura, de La Rioja, de las Islas Baleares, del Principado de Asturias y Vasco, Junta de Castilla y León y Ministerio de Fomento. Nótese la ausencia de algunos organismos que ya cumplieron los plazos de la normativa en 2007 pero que en esta segunda fase aún no han elaborado los mapas correspondientes. Entre ellas, se destaca por el contexto de esta tesis doctoral, a la Junta de Andalucía, sobre cuyas carreteras no se encuentran disponibles aún los mapas estratégicos de ruido de la segunda fase.

Además, por la ampliación del campo de estudio para las carreteras según el tráfico, que es muy significativo al pasar de los 6.000.000 de vehículos al año a los 3.000.000, cabe pensar que sería una gran mayoría de instituciones públicas las que deberían formar parte de esta segunda fase, abarcando un considerable mayor número de kilómetros de red. De hecho, se prevé que la longitud total de carreteras analizadas supere los 16.000 km, es decir, del orden del doble de las que fueron incluidas en la primera fase. En cuanto a los Planes de Acción correspondientes al 2013, por supuesto aquellas Administraciones que no cuentan con los mapas estratégicos correspondientes al 2012 no han elaborado ningún Plan de Acción y de entre los que sí generaron los mapas de la segunda fase, tan solo el Principado de Asturias cuenta con el correspondiente Plan de Acción (aunque solo para aquellos tramos que no fueron contemplados previamente en la fase 1), lo que hace ver el

exiguo cumplimiento de los plazos legales al respecto. En este dato destaca que el Ministerio de Fomento aún no haya publicado su PAR, pues aún se encuentra en elaboración.

Es decir, se observa que en la mayor parte de las Administraciones no se ha cumplido en fecha con la prescripción marcada por la ley (hecho constatado a nivel español y también a nivel europeo, dado lo novedoso de los mismos así como la situación económica general) y, concretamente en la actualidad algunos de estos planes de acción nuevos o revisados, así como sus correspondientes MER que los sustentan, están aún en elaboración, de ahí que sea muy interesante aplicar criterios y métodos que permitan elegir las mejores opciones de actuación y, adicionalmente, sustentarlas bien, puesto que deben ser sometidas a información pública y contar con un plan de financiación. Sin embargo, hasta la fecha, la consulta pública ha sido muy limitada en muchos estados [Murphy and King, 2010].

Por otro lado, si se consulta el contenido de los PAR dictados por las instituciones competentes, se observa que la inmensa **mayoría de las actuaciones planificadas corresponden a pantallas acústicas** y que para esta decisión en algunos casos no existe justificación alguna y en aquellas en que sí se realiza alguna sustentación sobre las razones de su elección, tiene lugar solo parcialmente y de forma cualitativa. De hecho, como luego se verá, existen bastantes más posibilidades de actuar contra el ruido, aunque la solución mediante de las pantallas acústicas es una de los más usadas y más eficaces. Pero es posible que alguno de los casos alguna otra medida fuera igualmente efectiva y que incluso, de acuerdo con otros criterios que pudieran tenerse en cuenta, resultara más ventajosa.

En cuanto al establecimiento de prioridades entre los tramos contemplados dentro de los planes, como consecuencia del estudio de los resultados de los MER, muchos de ellos directamente no introducen **ninguna preferencia de actuación**, y los que sí la incluyen o bien no la justifican o bien utilizan razones que distan bastante de ser razonadas. En el caso de aquellos PAR correspondientes a la primera fase pero que fueron elaborados con posterioridad a julio de 2010 (fuera de plazo, por tanto) y el único existente de la segunda fase, adoptaron un criterio general denominado «Grado de afección», como

resultado de la aplicación de una recomendación publicada por el Ministerio de Fomento en dicha fecha denominada «Criterios y condiciones técnicas para la elaboración de los mapas estratégicos de ruido de las carreteras de la Red del Estado 2ª fase 2012». En ella se establecía que para la identificación y el análisis de las zonas más expuestas se incluiría, entre otras informaciones, la de la evaluación del grado de afección de cada zona, distinguiendo entre alta, media y baja. Para ello define un criterio común para la evaluación del **Grado de Afección**, como resultado de la combinación de dos criterios: población expuesta y edificios sensibles expuestos [Ministerio de Fomento, 2010]:

- Población expuesta: se construye un indicador de población afectada como suma de tres cantidades: el número de población expuesta a niveles de L_{noche} entre 55 dB(A) y 65 dB(A) multiplicado por 0,6, el número de población expuesta a niveles de L_{noche} entre 65 dB(A) y 75 dB(A) multiplicado por 0,85 y el número de población expuesta a niveles de L_{noche} superior a 75 dB(A) multiplicado por 1.
- Existencia de edificios sensibles expuestos a niveles de ruido superiores al límite correspondiente (centros de enseñanza, 60 dB durante el día; centros sanitarios, 50 dB durante la noche).

Para combinar estos criterios y asignar el Grado de Afección, se procede como muestra la tabla 1.11.

Tabla 1.11: Definición del grado de afección. Fuente: [Ministerio de Fomento, 2010].

| GRADO DE AFECCIÓN | | Edificios sensibles afectados | |
|------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------|
| | | SÍ | NO |
| Indicador población afectada | Mayor de 500 | ALTA | ALTA |
| | Entre 200 y 500 | ALTA | MEDIA |
| | Entre 100 y 200 | MEDIA | BAJA |
| | Menor de 100 | BAJA | BAJA |

Se comprueba, por tanto, que se presta atención a dos datos muy importantes deducidos de los MER y que las recomendaciones del Ministerio de Fomento intentan combinarlos atendiendo a unos intervalos del indicador de población y a la existencia o no de centros sensibles al ruido. Con ellos pondera la afección acústica del tramo de carretera estudiado a la hora de establecer prioridades respecto de los demás incluidos en el PAR.

También se puede destacar otro aspecto de dicha publicación de criterios técnicos del Ministerio de Fomento para la elaboración de los MER en su 2ª fase que hace referencia a la **evaluación de la viabilidad** de las posibles medidas correctoras a implantar. Al respecto, dice, textualmente, que fundamentalmente se tendrán en cuenta las siguientes actuaciones [Ministerio de Fomento, 2010]:

- Cuando se proponga la instalación de pantallas acústicas, estas deberán ser técnicamente viables. Si en alguna zona la solución tipo pantalla fuera inviable, deberá ser justificado y esta zona pasará a estudiarse una solución compleja. Se efectuará una propuesta de dimensiones aproximadas de la pantalla (longitud y altura) sin evaluar la eficacia de la misma.
- Cuando se propongan actuaciones sobre el tipo de pavimento de la vía, se deberá detallar la longitud aproximada de tramo sobre el que actuar y el tipo de pavimento que se propone.
- Cuando se propongan actuaciones complejas, se debe indicar cuáles son los motivos que justifica proponer este tipo de medida y comentar las características y/o implicaciones de la misma.

Por tanto, se da una gran prioridad a la implantación de pantallas acústicas, que como se ha dicho constituyen la solución mayoritariamente propuesta en los PAR, dejando la posibilidad tan solo de emplear algún pavimento de características acústicamente favorables, mientras que cualquier otra opción es calificada de compleja y exige un estudio detallado y justificado.

Para ilustrar la realidad de **los PAR en España** y que así sirva de base para el problema que se estudia en esta tesis, en la tabla 1.12 se resumen las características de especial interés para los objetivos de esta investigación que han podido extraerse de los Planes disponibles a la fecha actual.

Otro aspecto destacable de los PAR publicados en España es la **falta de planteamiento global del problema**, incluso dentro de la misma Administración. Esto es, la gran mayoría de ellos directamente descartan actuaciones en el ámbito de ordenación del territorio o urbanístico, así como las posibles intervenciones directamente sobre el

receptor, aduciendo siempre que caen fuera de las competencias directas de los organismos responsables de las carreteras, pues sus posibles acciones se restringen exclusivamente al dominio público viario y servidumbres emanadas de la legislación de carreteras. Se interpreta esta postura como una visión corta y, con total seguridad, poco eficiente, puesto que algunas alternativas factibles directamente no son contempladas. Tan solo algunos Planes elaborados por entes administrativos cuyo ámbito sectorial de actuación (aun dentro de una Administración en concreto) es mayor (por ejemplo, Consejerías o Departamentos con competencias conjuntas en carreteras, medio ambiente y ordenación del territorio) contemplan otras opciones de acción. Son los casos, por ejemplo, de Canarias y Navarra, aunque finalmente casi todas las medidas propuestas vuelven a quedarse en las habituales pantallas.

Tabla 1.12: Resumen de datos de los PAR publicados en España. Fuente: elaboración propia a partir de datos extraídos de sicaweb.cedex.es.

| PAR | Criterios de elección de tramos | Criterios de priorización de tramos | Alternativas contra el ruido citadas | Alternativas contra el ruido planteadas |
|-------------------------|--|---|--|--|
| Ministerio de Fomento | - $L_{noche} > 55$ dB(A) -Población expuesta > 300 hab./km caso que no existan centros sensibles. -Viabilidad técnica colocación pantallas (espacio y cota). | -Gravedad de impacto. -Efectividad de actuaciones. | Solo en dominio público viario. -Firmes silenciosos (aún en estudio). -Pantallas. | -Pantallas. |
| Diputación de Vizcaya | - | -Población -Edificios sensibles -Superficie expuesta | -Firmes drenantes. -Reducción velocidad vía. -Variantes. -Soterrado. -Pantallas (madera, muro jardinera, metal, hormigón, metacrilato, transparentes). -Caballones tierra. -Tratamiento de fachadas (dobles ventanas). | -Reducción velocidad. -Variantes. -Soterrado. -Pantallas. -Caballones tierra. -Tratamiento de fachadas. |
| Diputación de Guipúzcoa | - | -Niveles exposición. -Población afectada. -Viabilidad pantallas. -Eficacia pantallas (espacio y cota). | Solo en dominio público viario. -Pantallas. -Túneles. -Variantes. | -Pantallas -Variantes |

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

| PAR | Criterios de elección de tramos | Criterios de priorización de tramos | Alternativas contra el ruido citadas | Alternativas contra el ruido planteadas |
|---------------------------------|--|--|---|--|
| Diputación de Alicante | - | - | -Variantes. -Barreras. -Pavimentos porosos. -Tratamiento de fachadas. | -Variantes. |
| Junta de Galicia | -L _{noche} >55 dB(A) -Población expuesta>300 hab./km caso que no existan centros sensibles. -Viabilidad técnica colocación pantallas (espacio y cota). | Dos grupos (A y B), no justificados, según: -Gravedad de impacto. -Efectividad de actuaciones. | Solo en dominio público viario y no otros organismos. -Pantallas. -Pavimentos. -Variantes. -Semaforización, adecuación enlaces, rotondas... para disminuir velocidad. -Refuerzos firme, aunque solo para reducir baches. | -Pantallas |
| Región de Murcia | - | - | -Gestión del tráfico. -Firmes. -Trazado. -Pantallas. -Ordenación del territorio y nuevas carreteras. | -Polvo de neumático. -Pantallas. |
| Junta de Andalucía | -L _{den} >65 dB(A). -L _{noche} >55 dB(A). -Existencia de centros sensibles. | 2 fases sin justificar, aunque dice seguir: -Población. -Viabilidad técnica pantallas. | Solo dominio público viario (por eso no fachadas). -Pavimentos. -Pantallas. -Variantes. | -Pantallas. |
| Gobierno de Canarias | -L _{noche} >55 dB(A) | Indicador GRC (gestión del ruido en carreteras) = población afectada × nivel de ruido. | -Pantallas. -Variantes. -Reducción de velocidad. -Túneles. -Refuerzos firme. | -Concretar metodología, entre otras. -Variantes |
| Principado de Asturias (fase 1) | -L _{día} >65 dB(A). -L _{tarde} >65 dB(A). -L _{noche} >55 dB(A). -Población expuesta>300 hab./km caso que no existan centros sensibles. -Viabilidad técnica colocación pantallas (espacio y cota). | -Instalación pantalla imposible técnicamente o eficacia baja. -Viviendas muy cerca de carretera y esta sirve de acceso a ellas. -Necesidad de plan zonal específico. | -Pavimentos. -Pantallas. | Pantallas. Prioridad según criterios: -Eficiencia (altura casas respecto carretera). -Facilidad implantación en relación a casas y carretera. -Gravedad impacto acústico (bloques pisos o viviendas unifamiliares). |

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

| PAR | Criterios de elección de tramos | Criterios de priorización de tramos | Alternativas contra el ruido citadas | Alternativas contra el ruido planteadas |
|----------------------------------|---|--|--|---|
| Gobierno Foral de Navarra | - | -Afección (población expuesta y existencia de centros sensibles). -Viabilidad/eficacia (según complejidad y reducción de la pantalla). | -Variantes. -Regulación tráfico urbano (único sentido, semáforos, velocidad...). -Transporte público. -Concienciación y medidas para los ciudadanos de reducción del coche. -Pantallas. -Caballones tierra. -Reducción velocidad. -Caballones + pantalla. -Asfaltos porosos. -Thin layer. | -Pantallas. -Reducción de velocidad. |
| Diputación de Álava | -L _{noche} | -Existencia de quejas. -Existencia de centros sensibles. -Población expuesta. -Atenuación necesaria. -IMD. | -Pantallas. -Variantes. -Pavimentos drenantes. -Caballones de tierra. | -Ninguna |
| Generalidad Valenciana | -Superación de objetivos de calidad acústica. -L _{den} >55 dB(A) y Población expuesta>300 hab/km. -L _{día} =L _{tarde} >55 dB(A), L _{noche} >45 dB(A) y existencia de centros sensibles. -Existencia de quejas. | -Grado de afección (población y alumnos/camas hospitales expuestos ponderados según >55, >65 o >75 dB(A)). | -Pantallas. -Caballones tierra. -Pavimentos. -Reducción de velocidad. | -Pantallas. -Caballones tierra. -Pavimentos. -Reducción de velocidad. Prioridades según: -Efectividad (cota casas y distancia a carretera). -Grado de afección. |
| Principado de Asturias (2ª fase) | -L _{día} >65 dB(A). -L _{tarde} >65 dB(A). -L _{noche} >55 dB(A). -Población expuesta>300 hab./km caso que no existan centros sensibles. -Viabilidad técnica colocación pantallas (espacio y cota). | -Población expuesta ponderada -Existencia de centros sensibles -Grado afección (según recomendaciones del Ministerio de Fomento) + eficacia + facilidad. | -Pavimentos. -Pantallas. | Pantallas (si no existe conexión directa entre la carretera y las viviendas + viabilidad técnica por cota y espacio). |

Finalmente, sobre el caso de Andalucía se profundizará en el capítulo 6 de esta tesis, puesto que en él serán aplicados los resultados de la misma a un caso de estudio

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

sobre carreteras de Almería, por lo que será interesante analizar el PAR publicado por la Junta de Andalucía en su momento para el ámbito de la red de carreteras de su competencia de acuerdo con la normativa, y más concretamente para estas vías en la provincia de Almería.

Todos estos datos, junto con los expuestos en los apartados anteriores, llevan a la conclusión de la **necesidad de establecer una metodología** justificada y razonada que permita establecer prioridades en los tramos de carreteras objeto de actuación de los PAR, así como en el análisis de las alternativas propuestas para resolver cada problema de ruido concreto hasta llegar al planteamiento general del Plan.

CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS Y MARCO DE TRABAJO.

2.1. SISTEMAS DIFUSOS.

2.1.1. Lógica difusa.

El origen de los sistemas difusos se remonta a 1965 con la publicación del artículo “*Fuzzy Sets*” del profesor Lotfi A. Zadeh, de la Universidad de California, en Berkeley [Zadeh, 1965]. Actualmente, toda la teoría que fundamenta estos sistemas, así como la particular lógica que se deriva de ellos, la **Lógica Fuzzy** (difusa o nebulosa), se encuadran como paradigmas de la Inteligencia Computacional junto a las Redes Neuronales Artificiales y los Algoritmos Genéticos (evolutivos), principalmente [Castillo *et al.*, 2007].

La **Inteligencia Computacional** es una rama de la Inteligencia Artificial centrada en el estudio de mecanismos adaptativos para permitir el comportamiento inteligente de sistemas complejos y cambiantes a través de su representación numérica. Como parte de la inteligencia artificial, es una área multidisciplinaria que se apoya en la informática, la lógica y la filosofía, y estudia la creación y diseño de entidades capaces de razonar por sí mismas utilizando como paradigma la inteligencia humana. Es decir, pretende crear máquinas capaces de emular el pensamiento humano con el objetivo de alcanzar la automatización de actividades como la toma de decisiones, resolución de problemas o aprendizaje mediante modificaciones interactivas de sus componentes.

Por tanto, la Inteligencia Computacional combina elementos de aprendizaje, adaptación, evolución y lógica difusa para crear programas que son, en cierta manera, inteligentes. Dentro de ella se agrupan diferentes técnicas procedentes de diversas áreas con cierta interrelación por presentar algunas de las características asociadas a la inteligencia, utilizando representaciones y abordajes no-simbólicos. La investigación en Inteligencia Computacional no rechaza los métodos estadísticos, pero muy a menudo aporta una vista complementaria [Zadeh, 2001].

De este modo, la computación programada pretende dar la solución a un problema determinada por un algoritmo concebido por un programador que resuelve una tarea

específica. Es decir, de un determinado dominio se obtienen unos datos, los cuales, al ser introducidos en un programa concebido para esa tarea, da lugar a unos resultados.

Por otro lado, cuando la solución está determinada por la inferencia basada en reglas sobre una base de conocimiento, aplicada a una clase de tareas, la solución es más flexible y puede incluir variabilidad en el dominio. Esta base de conocimiento es aportada por un experto o grupo de ellos y, junto al programa desarrollado, ofrece la salida de resultados a partir de los datos extraídos del dominio [Terano *et al.*, 1992].

Cuando el sistema se basa en inferencia difusa, es decir, sobre datos naturalmente concebidos como inciertos o imprecisos, entran en juego los sistemas *fuzzy* o difusos, base para la lógica difusa que se desarrollará a continuación y que será utilizada dentro de la metodología objeto de esta tesis. En este sistema el conocimiento está representado por conceptos lingüísticos más flexibles, similares a los del lenguaje natural, por lo que es más fácil incorporar las variaciones del dominio al sistema. La base de reglas utilizada es llamada igualmente «base de reglas difusas» [Klir and Yuan, 1995; Castillo *et al.*, 2007].

Desde un punto de vista más concreto, para la cuestión que afronta la presente tesis de problemas de toma de decisiones, habitualmente asociados a problemas de optimización, todo lo relativo a ellos se enmarcan dentro del cuerpo doctrinal denominado Programación Matemática, que incluye una enorme variedad de situaciones, según que se consideren casos lineales, no lineales, aleatoriedad, un solo decisor o varios decisores, etc.

Entre todos los modelos que se incluyen en la **Programación Matemática**, cuando en los problemas se consideran elementos de naturaleza difusa, surgen los métodos de optimización difusos, quizá una de las áreas más fructíferas en el ámbito *fuzzy*, tanto desde el punto de vista teórico como aplicado, y es en ellos donde se encuentra un sustrato teórico más que adecuado para abordar de un modo elegante y eficiente situaciones tan complejas como las que se plantean en este caso [Zadeh, 2001].

Antes de continuar con el desarrollo de los conceptos de esta teoría, existe cierta necesidad por diferenciar entre aleatoriedad y *difusidad*. Así, por *difusidad* se entiende un tipo de imprecisión que está asociada con conjuntos difusos, es decir, conjuntos en los

cuales puede haber una transición suave desde la pertenencia hasta la no pertenencia de sus elementos. En agudo contraste a la noción tradicional de conjunto en matemáticas, la mayoría de conjuntos en el mundo real no tienen fronteras nítidas que separen aquellos objetos que pertenecen a un conjunto de aquellos que no pertenecen [Bellman and Zadeh, 1970]. En este sentido, es importante notar que, en el lenguaje hablado humano, afirmaciones difusas tales como «el área metropolitana de Granada es *más* densa *que* la de Almería» o «el mercado de valores ha sufrido una *fuerte* caída», transmiten cierta información a pesar de la imprecisión en el uso de las palabras puestas en cursiva.

Esencialmente la aleatoriedad tiene que ver con la incertidumbre sobre la pertenencia o no pertenencia de un objeto en un conjunto no difuso. La *difusidad* tiene que ver con conjuntos en los cuales puede haber grados de pertenencia intermedios entre la pertenencia total y la no pertenencia total.

Dada esta distinción, las técnicas matemáticas para tratar con la *difusidad* son bastante diferentes de aquellas usadas para tratar con la teoría de la probabilidad. Ellas son más simples en muchos casos ya que la noción de medida de probabilidad en la teoría de la probabilidad corresponde a la noción de función de pertenencia en la teoría de la *difusidad*, que es en cierta manera más sencilla [Bellman and Zadeh, 1970; Castillo *et al.*, 2007].

Visto de esta manera, la incertidumbre es una generalización de la probabilidad. De hecho, según [Zadeh, 2005] existe cierta necesidad demostrable para utilizar incertidumbre en un modelo, ya que los enfoques vigentes para la representación de la información incierta son inadecuados al tratar con problemas en los cuales este tipo de información es basada en la percepción y expresada en un lenguaje natural. Más específicamente, los enfoques existentes no manejan el problema de la semántica del lenguaje natural ni las herramientas formales de cálculo de las restricciones generalizadas que tratan con esto [Novák *et al.*, 1999]. Una de las limitaciones de la teoría de la probabilidad está en el hecho de que su estructura conceptual no se ajusta a la información basada en percepciones, la cual es imprecisa por naturaleza. Para tratar efectivamente con problemas de este tipo son necesarias las herramientas formales que brinda la lógica difusa, y que a continuación se muestran.

De hecho, algunas de las **propiedades de la lógica difusa** son las siguientes [Terano *et al.*, 1992; Turban and Aronson, 1998; MathWorks, 2002]:

- Proporciona una lógica flexible y mejor adaptada al pensamiento humano que la clásica y generalmente la información con la que se cuenta respecto a los objetivos y preferencias del decisor suele estar expresada en términos imprecisos.
- Dentro de las virtudes de la lógica difusa se destacan su facilidad para adaptarse a casos particulares con pocas variaciones de parámetros, su habilidad para combinar en forma unificada expresiones lingüísticas con datos numéricos y el no requerir de algoritmos muy sofisticados para su implementación.
- La lógica difusa permite manejar el control de problemas de decisión que no son fáciles de definir por modelos matemáticos duros (rigurosos matemáticamente).
- La lógica difusa es conceptualmente fácil de entender, es flexible, soporta datos imprecisos, se basa en el lenguaje humano, puede modelar funciones no lineales de alguna complejidad, puede combinarse con técnicas tradicionales, entre otros atributos.

Por tanto, la facilidad de resolver problemas reales de dimensión cada vez mayor, gracias a la mayor potencia y el menor costo de los computadores, la imposibilidad de conocer en todos los casos las soluciones exactas que les corresponde a esos problemas, y la necesidad de dar respuestas a las situaciones prácticas contempladas en multitud de ocasiones, han motivado que los algoritmos difusos sean empleados cada vez más como valiosas herramientas capaces de proporcionar soluciones donde los algoritmos exactos no son capaces de encontrarlas [Zadeh, 2001]. Ejemplos de algunas **aplicaciones importantes de la lógica difusa** son [Sur and Omron, 1993; Zimmermann, 1993]:

- Control de sistemas: control de tráfico, control de vehículos (helicópteros...), control de compuertas en plantas hidroeléctricas, centrales térmicas, control en máquinas lavadoras, control de metros (mejora de su conducción, precisión en las paradas y ahorro de energía), ascensores...
- Predicción y optimización: predicción de terremotos, optimizar horarios...

- Reconocimiento de patrones y visión por ordenador: seguimiento de objetos con cámara, reconocimiento de escritura manuscrita, reconocimiento de objetos, compensación de vibraciones en la cámara, sistemas de enfoque automático...
- Sistemas de información o conocimiento: bases de datos, sistemas expertos...

Así, en los últimos años, y como consecuencia de sus propias características, el empleo de los sistemas difusos se ha extendido por gran diversidad de áreas, tanto por sus implicaciones matemáticas o teóricas como por sus aplicaciones prácticas, partiendo de su tradicional aplicación en el área de control hasta la identificación de patrones o aprendizaje de funciones no-lineales para el procesamiento de imágenes, visión robótica, reconocimiento de voz, categorización de textos o tratamiento de datos. Prueba de esta importancia es el gran número de revistas internacionales (*Fuzzy Sets and Systems*, *IEEE Transactionson Fuzzy Systems...*), congresos (*FUZZ-IEEE*, *IPMU*, *EUSFLAT*, *ESTYLF...*) y libros [Kruse *et al.*, 1994; McNeill and Thro, 1994; Mohammd *et al.*, 1993; Pedrycz and Gomide, 1998; Castillo *et al.*, 2007] dedicados al tema.

2.1.2. Definición de conjunto difuso.

Como ya se ha dicho, la lógica difusa nace a partir de las aportaciones de Zadeh, que introdujo el concepto de conjunto difuso (“*fuzzy set*”) permitiendo la pertenencia de un elemento a un conjunto de forma gradual, y no de manera absoluta como establece la teoría *conjuntista* clásica. A partir de entonces, Zadeh propuso la idea de los algoritmos difusos, que formaron la base del raciocinio difuso, extendiéndose rápidamente al concepto de variables lingüísticas, con lo que la popularidad y el uso de la lógica difusa ha sido extraordinario [Zadeh, 1994]. De hecho, en la presente tesis doctoral se usarán números difusos triangulares para la modelización de estas variables lingüísticas, los cuales son utilizados en la toma de decisiones multicriterio.

Pero antes de nada se hará una pequeña revisión de los conceptos básicos de la Teoría de Conjuntos Difusos, que permitirán ubicar en la lógica que sustenta esta metodología. Hay que destacar que a la hora de traducir el término inglés *fuzzy* se

barajaron principalmente dos alternativas: borroso y difuso. Aunque en alguna bibliografía se habla aún de Lógica Borrosa o Teoría de los conjuntos borrosos, se utiliza más el término difuso [Sur and Omron, 1993], aparte de la habitual terminología científica original “*fuzzy*”.

En primer lugar, hay que destacar que la lógica difusa se trata de una generalización de la lógica *booleana* (lógica clásica, de verdadero o falso) con objeto de permitir manejar el concepto de verdades parciales entre el «completamente verdadero» y el «completamente falso», admitiendo pertenencias valoradas en el intervalo $[0,1]$ en lugar de únicamente en el conjunto $\{0,1\}$ [Zadeh, 1965]. Con ello se expresa el significado de los valores lingüísticos relacionados a una variable lingüística, que serán tratados en el siguiente apartado.

Los antecedentes filosóficos de este planteamiento pueden encontrarse en los trabajos de Bertrand Russell, Jan Lukasiewicz y Max Black, que ante las paradojas encontradas en la lógica tradicional, comenzaron a hablar de lógica multivalente y lógica continua, introduciendo, así, en la naturaleza blanco/negro (verdad/falso) de aquella, las sombras de gris inherentes al mundo real. La lógica continua reconoce el hecho de que la realidad no tiene por qué ser sólo cierta o falsa, sino que puede haber grados de verdad. Dicho de otra forma, los elementos de un conjunto no tienen por qué estar completamente dentro o completamente fuera del mismo; es posible la pertenencia parcial, un grado de pertenencia, de un elemento a un conjunto dado [Kosko, 1992; Zadeh, 1994].

Recuérdese que la noción clásica de conjunto refleja la idea de agrupar colecciones de objetos que cumplen una o varias propiedades que caracterizan a dicho conjunto. Una propiedad puede ser considerada como una función que a cada elemento u del universo de discurso U le asigna un valor en el conjunto $\{0,1\}$, de forma que si el elemento pertenece al conjunto A , es decir, cumple la propiedad, se le asigna el valor 1 o, en caso contrario, el valor 0. De esta forma, los conjuntos introducen una noción de dicotomía que, en esencia, es una clasificación binaria: o se acepta o se rechaza la pertenencia de un objeto a una categoría determinada [Zadeh, 1965]. Esta decisión de aceptar o rechazar la pertenencia de un objeto a una categoría determinada se expresa mediante una función característica

asociada al conjunto, según las propiedades que posean los objetos del conjunto, del tipo siguiente (ecuación 2.1):

$$A(u) = \begin{cases} 1, & \text{si } u \in A \\ 0, & \text{si } u \notin A \end{cases} \quad (\text{ec. 2.1})$$

Así, un conjunto A está completamente definido por el conjunto de pares $A = \{ (u, A(u)) / u \in U, A(u) \in \{0, 1\} \}$ [Chan *et al.*, 2006].

De lo anterior se desprende que los conjuntos clásicos solo presentan dos valores límites, mediante la restricción realizada sobre los objetos del universo de discurso U que pueden ser asignados al conjunto A , dada por su función característica [Bellman and Zadeh, 1970]. Esta es la definición clásica de conjuntos, denominados **conjuntos "crisp"** (en inglés, «nítido») en oposición a "fuzzy" («difuso»), que se muestran a continuación. A manera de ejemplo se presenta la figura 2.1.

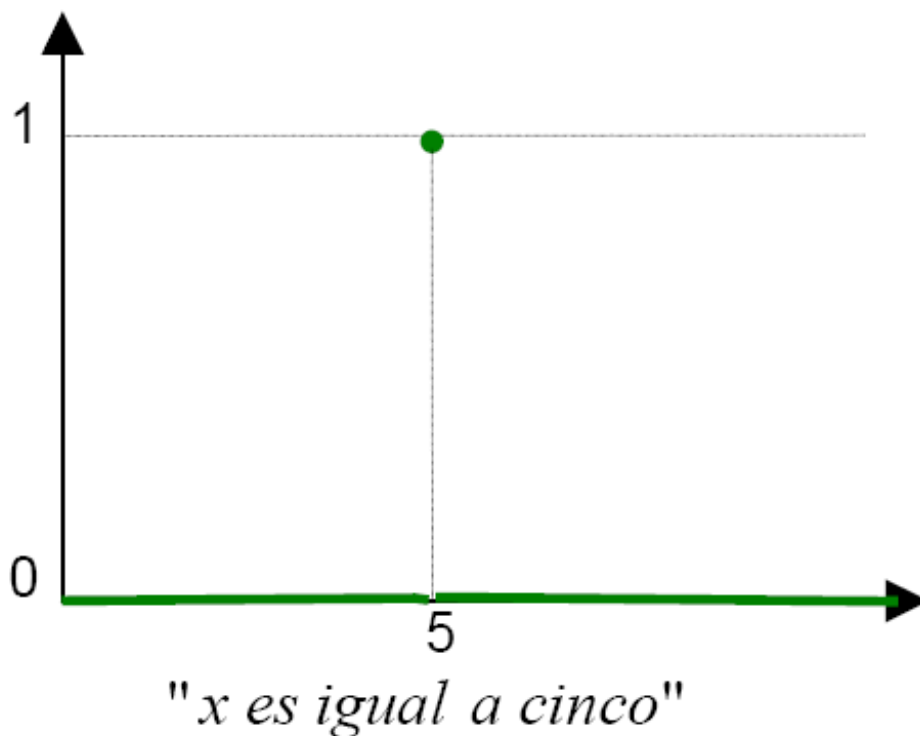


Figura 2.1. Representación del conjunto clásico o crisp «x es igual a 5».

La lógica difusa se fundamenta en el concepto de conjunto difuso, que refleja el requerimiento anterior y admite valores intermedios en la función característica, la cual se denomina **función de pertenencia** [Zadeh, 1965].

Esta relajación permite una interpretación más realista de la información, puesto que la mayoría de las categorías que describen los objetos del mundo real no tienen unos límites claros y bien definidos. Por ejemplo, ordenador *potente*, *buen* sabor, coche *veloz*, etc. (las palabras en cursiva identifican fuentes de imprecisión). Si un objeto pertenece a una categoría con un grado de pertenencia que puede ser expresado por un número real en el intervalo $[0,1]$, cuanto más cercano a 1 sea el grado, indicará mayor pertenencia a esa categoría determinada, y cuanto más cercano a 0, indicará menor pertenencia a dicha categoría.

Por tanto, un **conjunto difuso** puede definirse como una colección de objetos con valores de pertenencia entre 0 (exclusión total) y 1 (pertenencia total). Los valores de pertenencia expresan los grados con los que cada objeto es compatible con las propiedades o características distintivas de la colección. Así, formalmente, se puede definir un conjunto difuso \tilde{A} sobre un dominio o universo de discurso U al caracterizarlo por una función de pertenencia del tipo $\mu_{\tilde{A}} : U \rightarrow [0,1]$, que asocia a cada elemento u , $u \in U$, el grado con que pertenece al conjunto difuso \tilde{A} , asignándole un valor en el intervalo $[0,1]$ [Zadeh, 1965].

Así, un conjunto difuso \tilde{A} en U puede representarse como un conjunto de pares ordenados de un elemento genérico u , $u \in U$, y su grado de pertenencia $\mu_{\tilde{A}}(u)$ (por enumeración) [Terano *et al.*, 1992]:

$$\tilde{A} = \{ (u, \mu_{\tilde{A}}(u)) / u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) \in [0, 1] \} \quad (ec. 2.2)$$

O bien de la siguiente forma:

$$\tilde{A} = \sum_{i=1}^n \mu_{\tilde{A}}(u_i) / u_i = \mu_{\tilde{A}}(u_1) / u_1 + \mu_{\tilde{A}}(u_2) / u_2 + \dots + \mu_{\tilde{A}}(u_i) / u_i + \dots + \mu_{\tilde{A}}(u_n) / u_n \quad (ec. 2.3)$$

Cuando U es continuo, el conjunto difuso \tilde{A} puede ser escrito de forma concisa como:

$$\tilde{A} = \int_U \mu_{\tilde{A}}(u) / u \quad (\text{ec. 2.4})$$

Nótese que en estas notaciones el sumatorio o la integral pierden su significado habitual, pues en lógica difusa quieren simbolizar una mera enumeración de *tuplas*. La barra tampoco indica una fracción sino que simplemente separa los dos elementos de la *tupla*.

Puede verse un ejemplo de función de pertenencia en la figura 2.2, junto a la comparación de lo que podría ser el equivalente en conjuntos clásicos del mismo «concepto», puesto que un conjunto difuso es un «conjunto con fronteras borrosas» al compararlo con un conjunto nítido [Terano *et al.*, 1992].

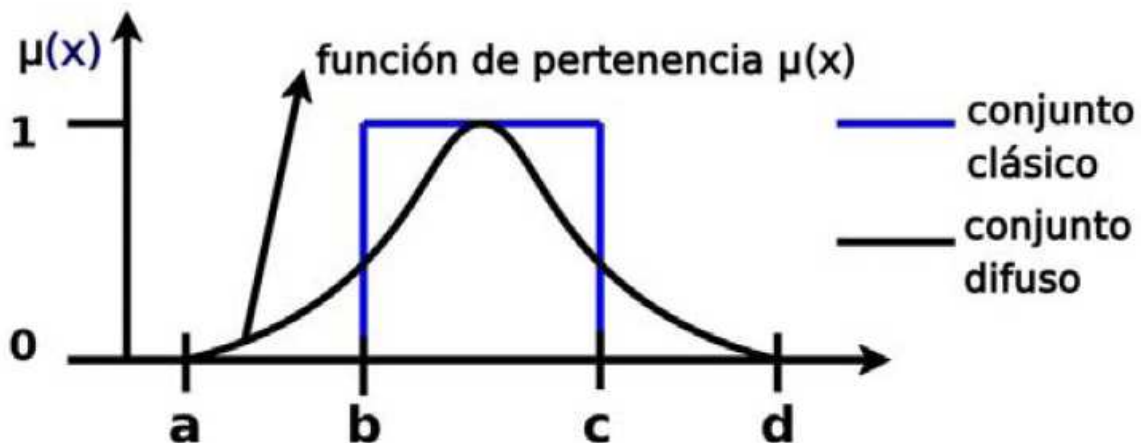


Figura 2.2: Ejemplo de función de pertenencia de un conjunto difuso.

2.1.3. Conceptos básicos sobre conjuntos difusos.

A continuación se introducen otros conceptos básicos a la hora de trabajar con conjuntos difusos como son: el soporte, el núcleo, la altura, el α -corte y los tipos de funciones de pertenencia [Chen and Hwang, 1992; Kruse *et al.*, 1994; McNeill and Thro, 1994]:

- El **soporte** de un conjunto \tilde{A} en el universo U , $S(\tilde{A})$, se define como el conjunto formado por todos los elementos de U cuyo grado de pertenencia a \tilde{A} sea mayor que 0.

$$S(\tilde{A}) = \{u \in U / \mu_{\tilde{A}}(u) > 0\} \quad (ec. 2.5)$$

Habitualmente, se suelen tomar como conjuntos difusos estrictamente al soporte del mismo, significando así que los elementos que presentan un grado de pertenencia 0 no pertenecen al conjunto difuso. Cuando el soporte de un conjunto difuso es el conjunto vacío, nos encontramos ante el conjunto difuso vacío.

- Si la definición se restringe a aquellos elementos del universo de discurso U con grado de pertenencia igual a 1, se tiene el **núcleo** del conjunto difuso, $N(\tilde{A})$, que se define como el conjunto de todos los elementos de U cuyo grado de pertenencia a \tilde{A} es igual a 1.

$$N(\tilde{A}) = \{u \in U / \mu_{\tilde{A}}(u) = 1\} \quad (ec. 2.6)$$

- La **altura** de un conjunto difuso \tilde{A} , $Altura(\tilde{A})$, se define como el mayor grado de pertenencia de todos los elementos de dicho conjunto.

$$Altura(\tilde{A}) = \max \{ \mu_{\tilde{A}}(u) / u \in U \} \quad (ec. 2.7)$$

- En muchas ocasiones, puede ser interesante conocer no solo los elementos que pertenecen en algún grado al conjunto difuso, sino también conocer el conjunto de aquellos elementos que lo hacen con un valor al menos igual o mayor que un umbral determinado α . Cada uno de estos conjuntos se denomina **α -cortes** de un conjunto difuso \tilde{A} , \tilde{A}_α , definido como el conjunto formado por todos los elementos del universo de discurso U cuyos grados de pertenencia en \tilde{A} son mayores o iguales que el valor de corte $\alpha \in [0, 1]$.

$$\tilde{A}_\alpha = \{u \in U / \mu_{\tilde{A}}(u) \geq \alpha\} \quad (ec. 2.8)$$

- La **anchura** de un conjunto difuso convexo es la anchura del intervalo del soporte del conjunto:

$$L(\tilde{A}) = \sup(S(\tilde{A})) - \inf(S(\tilde{A})) \quad (ec. 2.9)$$

$\alpha = \sup(A)$ si y solo si $\forall u \in A / u \leq \alpha$ y $\forall \varepsilon > 0, \exists u \in A / u > \alpha - \varepsilon$.

$\beta = \inf(A)$ si y solo si $\forall u \in A: u \geq \beta$ y $\forall \varepsilon > 0, \exists u \in A / u < \beta + \varepsilon$.

- Finalmente, se dice que un conjunto difuso está **normalizado** si y solo si su núcleo contiene algún elemento (o alternativamente, si su altura es 1), es decir: $\exists u \in A / \mu_{\tilde{A}}(u) = 1$ o $\sup_x \mu_{\tilde{A}}(u) = 1$.

También se pueden diferenciar los conjuntos difusos en cuanto a los **tipos de sus funciones de pertenencia** $\mu_{\tilde{A}}: U \rightarrow [0, 1]$, que dependen no solo del concepto que representan, sino también del contexto en el que se usan. Las gráficas de las funciones pueden tener diferentes representaciones o formas y pueden tener algunas propiedades específicas como, por ejemplo, continuidad [Terano *et al.*, 1992].

Los conjuntos difusos suelen representarse con familias de funciones paramétricas. Las más comunes con las siguientes (véanse figuras 2.3 a 2.7) [Kruse *et al.*, 1994; McNeill and Thro, 1994]:

- Funciones decrecientes o de inicio de dominio (llamadas también funciones lambda, L, por su forma de representación):

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = \begin{cases} 1, & \text{si } u \leq \alpha \\ \frac{\beta - u}{\beta - \alpha}, & \text{si } \alpha \leq u \leq \beta \\ 0, & \text{si } u \geq \beta \end{cases} \quad (\text{ec. 2.10})$$

donde α es el valor a partir del cual la función de pertenencia no es igual a 1 y β el límite inferior para los valores no nulos de $\mu_{\tilde{A}}(u)$.

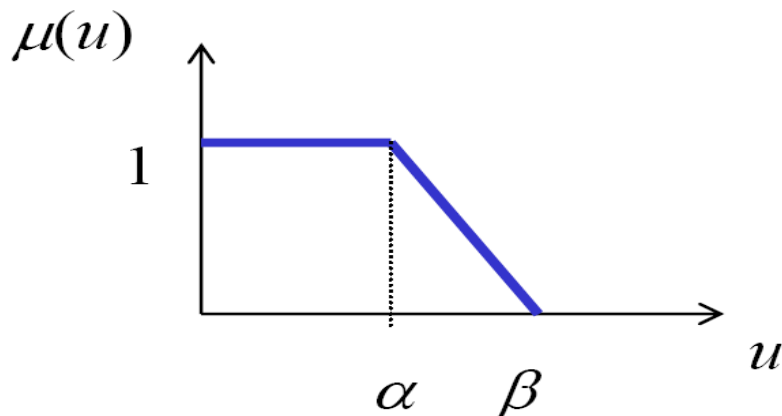


Figura 2.3: Representación gráfica de función de pertenencia de inicio de dominio o L.

- Función triangular (llamada también lambda, Λ , por su forma):

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = \begin{cases} 0, & \text{si } u \leq \alpha \\ \frac{u-\alpha}{\beta-\alpha}, & \text{si } \alpha \leq u \leq \beta \\ \frac{\gamma-u}{\gamma-\beta}, & \text{si } \beta \leq u \leq \gamma \\ 0, & \text{si } u \geq \gamma \end{cases} \quad (\text{ec. 2.11})$$

donde β es el punto modal de la función triangular y α y γ los límites inferior y superior respectivamente para los valores no nulos de $\mu_{\tilde{A}}(u)$.

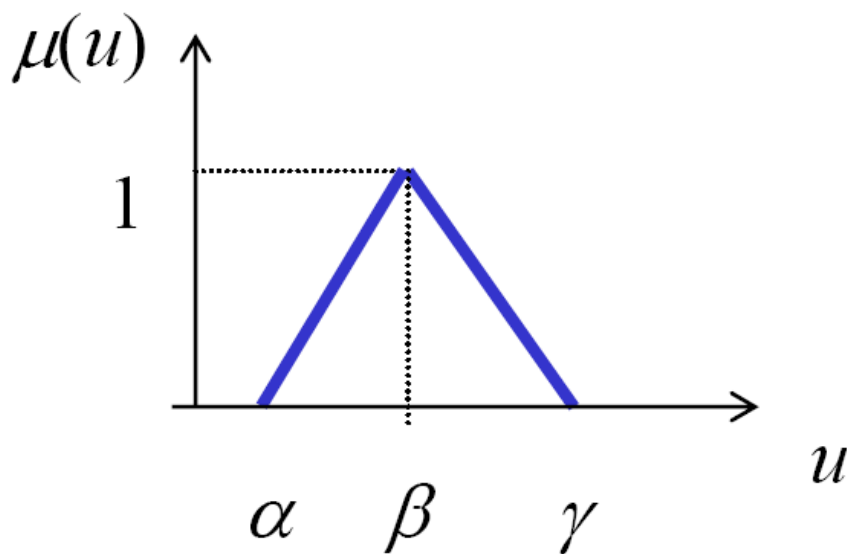


Figura 2.4: Representación gráfica de función de pertenencia triangular o Λ .

- Función trapezoidal (o función pi, Π):

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = \begin{cases} 0, & \text{si } u \leq \alpha \\ \frac{u-\alpha}{\beta-\alpha}, & \text{si } \alpha \leq u \leq \beta \\ 1, & \text{si } \beta \leq u \leq \gamma \\ \frac{\delta-u}{\delta-\gamma}, & \text{si } \gamma \leq u \leq \delta \\ 0, & \text{si } u \geq \delta \end{cases} \quad (\text{ec. 2.12})$$

donde β y γ indican el intervalo donde la función de pertenencia vale 1 y α y δ los límites izquierdo y derecho del dominio de definición de la función de pertenencia trapezoidal. Este tipo de función y la anterior se usan para describir valores intermedios; su principal diferencia reside en que la función PI implica

un margen de tolerancia alrededor del valor que se toma como más representativo del valor lingüístico asociado al conjunto difuso.

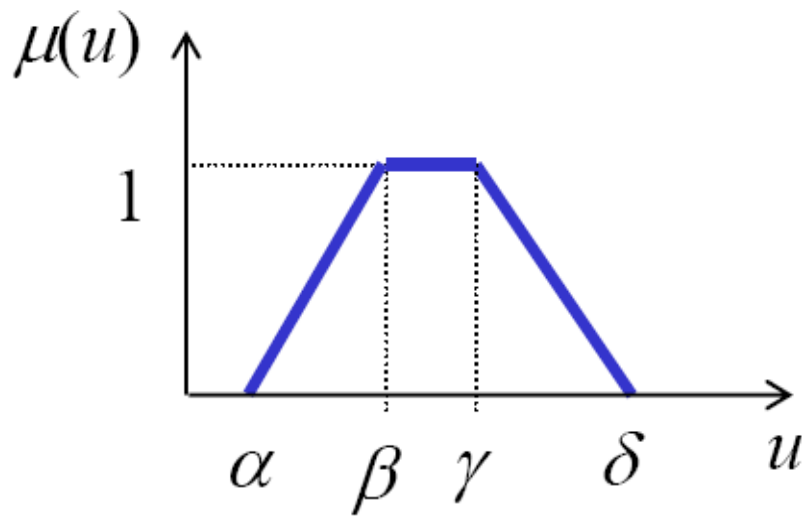


Figura 2.5: Representación gráfica de las funciones de pertenencia trapezoidal o Π .

- Funciones crecientes o de fin de dominio (también llamada gamma, Γ):

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = \begin{cases} 0, & \text{si } u \leq \alpha \\ \frac{u - \alpha}{\beta - \alpha}, & \text{si } \alpha \leq u \leq \beta \\ 1, & \text{si } u \geq \beta \end{cases} \quad (\text{ec. 2.13})$$

donde α es el límite inferior para los valores no nulos de $\mu_{\tilde{A}}(u)$ y β el valor a partir del cual la función de pertenencia es igual a 1.

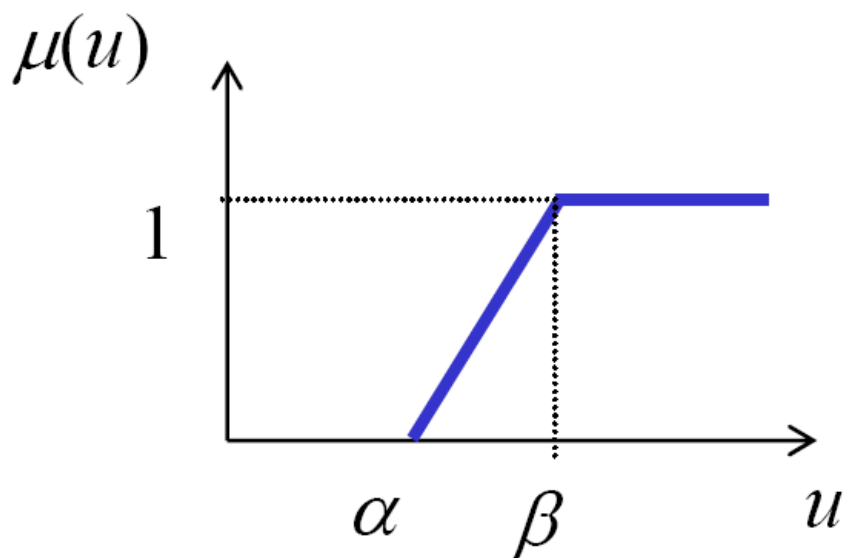


Figura 2.6: Representación gráfica de función de pertenencia de fin de dominio o Γ .

- Función Gaussiana:

$$\mu_A(u) = e^{-k(u-m)^2} \quad (\text{ec. 2.14})$$

donde $k > 0$ y m es el punto modal.

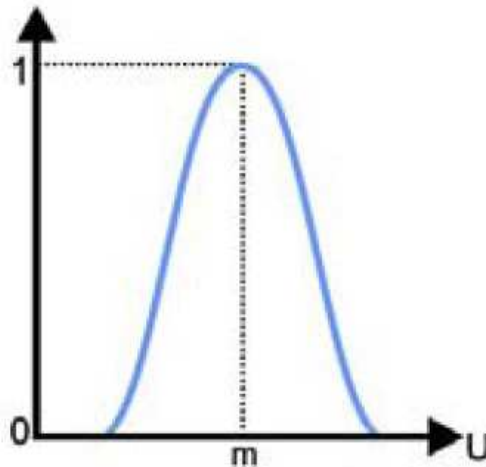


Figura 2.7: Representación gráfica de la función de pertenencia gaussiana.

Finalmente, se hace referencia al **principio de extensión**, que es una de las ideas fundamentales de la teoría de conjuntos difusos pues hace posible la aplicación de conceptos matemáticos no difusos al tratamiento de sistemas difusos. Es especialmente útil para los propósitos del cálculo difuso, por cuanto en muchas ocasiones es oportuna su aplicación al álgebra real con números difusos cuando son de carácter discreto [Chen and Hwang, 1992].

Este principio se presenta como el que permite la transformación de la operación definida sobre dos elementos del Universo U , en otra operación definida sobre dos conjuntos difusos de U [Mizumoto and Tanaka, 1976].

Por ejemplo si U es la recta real \mathbb{R} y se tienen dos números difusos A y B , entonces se obtiene el número difuso C tal que $C = F(A, B)$, donde F es la función inducida por f , tal que $F(\{x\}, \{y\}) = f(x, y)$. Por el Principio de Extensión se obtiene que el número difuso resultante se calcula como:

$$C(z) = \sup_{x,y \in \mathbb{R}, z=f(x,y)} \{A(x) \wedge B(y)\} \quad (\text{ec. 2.15})$$

Interpretando la intersección como el conector min la ecuación anterior se convierte en:

$$C(z) = \sup_{x,y \in \mathbb{R}, z=f(x,y)} \{\min[\mu_A(x), \mu_B(y)]\} \quad (\text{ec. 2.16})$$

Es decir, para un valor z , el grado de pertenencia se encuentra como el supremo del mínimo de las funciones de pertenencia de los valores x e y de todas las posibles parejas ordenadas, donde $z = f(x, y)$.

2.1.4. Números difusos.

Entre los distintos tipos de conjuntos difusos, tienen especial significación aquellos que están definidos sobre el conjunto de los números reales, \mathbb{R} , es decir, $\tilde{A} : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$.

Bajo ciertas condiciones, estos conjuntos difusos pueden ser vistos como números difusos, que se convierten así en una generalización del concepto de intervalo, definiéndose el **concepto de número difuso** \tilde{A} como un subconjunto de \mathbb{R} que verifica las siguientes propiedades [Zadeh, 1975a; Zadeh, 1975b; Zadeh, 1975c]:

- La función de pertenencia es convexa, es decir, $\forall x, y \in \mathbb{R}, \forall z \in [0, 1], \mu_{\tilde{A}}(z) \geq \min\{\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{A}}(y)\}$. Ello implica que para cualquier $\alpha \in (0,1]$, \tilde{A}_α debe ser un intervalo cerrado.
- La función de pertenencia es continua por partes.
- El soporte de \tilde{A} debe ser finito.
- \tilde{A} está normalizado, es decir, el valor de pertenencia máximo es 1.

De acuerdo con estas definiciones, casos particulares de números difusos son [Klir and Yuan, 1995]:

- Los números reales (Figura 2.8a).
- Intervalos de números reales (Figura 2.8b).

- Valores aproximados (Figura 2.8c).
- Intervalos aproximados o difusos (Figura 2.8d).

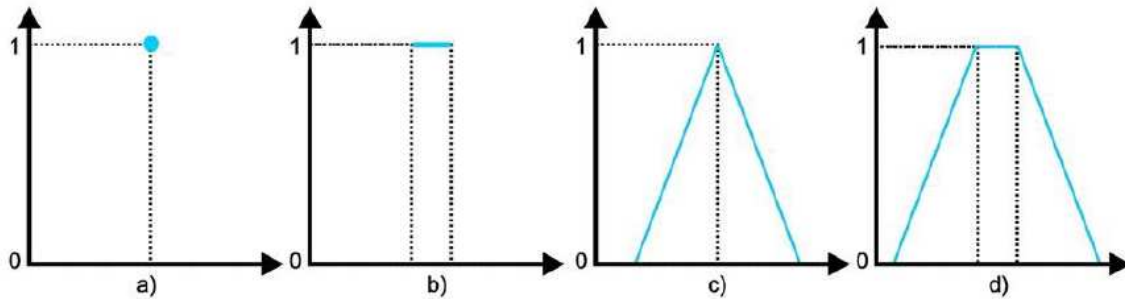


Figura 2.8: Ejemplos de números difusos. Fuente: [García-Cascales, 2009].

De este modo, un **número real difuso** \tilde{A} se describe como un subconjunto difuso de la recta real \mathbb{R} por medio de una función de pertenencia f_A que tiene las siguientes propiedades [Klir and Yuan, 1995]:

- $f_A(x)$ es una aplicación continua de \mathbb{R} en el intervalo cerrado $[0,1]$.
- $f_A(x) = 0$, para todo $x \in (-\infty, a]$.
- $f_A(x)$ es estrictamente creciente en $[a, b]$.
- $f_A(x) = 1$, para todo $x \in [b, c]$.
- $f_A(x)$ es estrictamente decreciente en $[c, d]$.
- $f_A(x) = 0$, para todo $x \in [d, +\infty)$.

donde $a, b, c,$ y d son números reales.

A menos que se especifique otra cosa, se asumirá que la función de pertenencia f_A es convexa, normal y acotada, (es decir $-\infty < a, d < \infty$). El número difuso (a, b, c, d) se representará por los cuatro números de la definición. La imagen (el opuesto) de $A = (a, b, c, d)$ puede definirse como $-A = (-d, -c, -b, -a)$.

En la presente tesis doctoral se va a trabajar con **números difusos reales triangulares** que serán definidos de acuerdo con la siguiente función de pertenencia [Klir and Yuan, 1995]:

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & \text{si } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{si } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases} \quad (\text{ec. 2.17})$$

donde a , b , y c son números reales.

En este caso el número difuso se expresa con la tripleta (a, b, c) y con el mismo significado que para los números trapezoidales. Representa el concepto o cantidad difusa « x es aproximadamente igual al valor de b », valor que se corresponde con la **moda** o el corazón del intervalo soporte $[a, c]$, definido como $\text{Mod}(f_A) = \{x \in \mathbb{R} / f_A(x) = 1\}$ [Bolaños *et al.*, 1988].

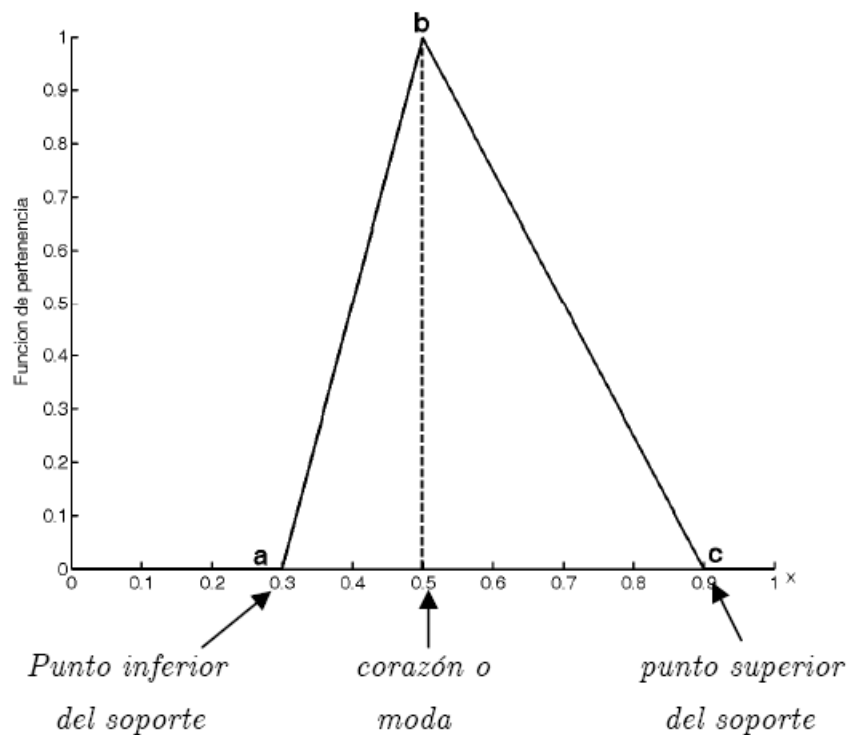


Figura 2.9. Representación de un número difuso triangular con sus tres puntos fundamentales (a , b , c). Fuente: [García-Cascales, 2009]

Teniendo en cuenta la definición de número difuso, se representa por $f_A^L : [a, b] \rightarrow [0, 1]$ a la parte izquierda de la función de pertenencia del número difuso \tilde{A} , que es continua y estrictamente creciente en $[a, b]$; y por $f_A^R : [b, c] \rightarrow [0, 1]$ a la parte derecha de la función de pertenencia del número difuso \tilde{A} , que es continua y estrictamente decreciente

en $[b, c]$. Por estas propiedades, ambas funciones tienen su correspondiente función inversa y todas ellas son integrables.

En la presente tesis se considerarán únicamente los números difusos triangulares convexos y continuos, porque la matemática difusa ha sido desarrollada principalmente para este tipo de conjuntos. Además, se considera que esta representación es suficientemente adecuada para representar muchas de las valoraciones inciertas de problemas reales y, en particular, del que se ocupa esta investigación.

2.1.5. Operaciones con números difusos.

Para las operaciones con los números difusos existen diferentes definiciones dependiendo del teórico que las hiciera o con qué finalidad las usara. En este apartado se van a mostrar las más útiles para este estudio, referidas a números difusos triangulares.

En primer lugar, se resumen las **propiedades más importantes de las operaciones con números difusos triangulares** [Terano *et al.*, 1992]:

- El resultado obtenido a partir de la adición o la sustracción entre números difusos triangulares es también un número difuso triangular.
- El resultado obtenido a partir de la multiplicación o división no es un número triangular difuso.
- Las operaciones max y min no dan como resultado un número difuso triangular.

Sin embargo, a menudo se asume que los resultados operacionales de la multiplicación o la división pueden resultar en números difusos triangulares por aproximación de sus valores.

De este modo, sean A y B dos números triangulares difusos parametrizados por las tripletas (a_1, b_1, c_1) y (a_2, b_2, c_2) respectivamente, entonces [Chen and Hwang, 1992; García-Cascales and Lamata, 2007; Kahraman, 2008(a)]:

- Suma de números difusos: $A + B = (a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2)$.
- Sustracción de números difusos: $A - B = A + (-B)$, donde el opuesto $-B = (-c_2, -b_2, -a_2)$. Entonces: $A - B = (a_1 - c_2, b_1 - b_2, c_1 - a_2)$.
- Multiplicación de números difusos: $A \times B \sim (a_1 \times a_2, b_1 \times b_2, c_1 \times c_2)$.
- Multiplicación por un escalar: $k \cdot A = (k \cdot a_1, k \cdot b_1, k \cdot c_1)$, $k \geq 0$
- Inverso: $A^{-1} = (a_1, b_1, c_1)^{-1} = [1/c_1, 1/b_1, 1/a_1]$, $0 \neq (a_1, b_1, c_1)$.
- División de números difusos: $A / B \sim ((a_1, b_1, c_1) \times (1/c_2, 1/b_2, 1/a_2))$, $0 \neq (a_2, b_2, c_2)$.
- Máximo y mínimo: $\text{Max}(A, B) \sim (\text{Max}(a_1, a_2), \text{Max}(b_1, b_2), \text{Max}(c_1, c_2))$; $\text{Min}(A, B) = (\text{Min}(a_1, a_2), \text{Min}(b_1, b_2), \text{Min}(c_1, c_2))$.
- Potenciación: $A^n = (a_1^n, b_1^n, c_1^n)$, siendo n un número natural distinto de cero y a_1, b_1 y c_1 números reales positivos.
- Operación exponencial: $\exp(A) = (\exp(a_1), \exp(b_1), \exp(c_1))$, siendo a_1, b_1 y c_1 números reales positivos.
- Logaritmo: $\ln A = (\ln a_1, \ln b_1, \ln c_1)$, siendo a_1, b_1 y c_1 números reales mayores de 1.
- Finalmente, la distancia Euclídea entre dos números difusos triangulares se puede definir como: $d(A, B) = \sqrt{((a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 + (c_1 - c_2)^2)}$.

Para terminar esta revisión de operaciones, se considera la comparación entre números difusos, aspecto que requiere especial consideración, toda vez que la comparación de valores es particularmente importante en los procesos de decisión, es así como en los métodos de análisis multicriterio. En este aspecto cabe reseñar que existen diferentes modos que la bibliografía recoge para establecer la comparación entre números difusos, pero solo se muestran los métodos de *defuzzificación* que se seguirán en esta tesis, escogidos por guardar especial significación en su uso sobre números difusos triangulares convexos y simétricos, que son los que usan para la investigación, así como en la obtención de un resultado tradicional para los valores de los atributos tratados a partir de los números difusos utilizados. De hecho, la *defuzzificación* no es más que la

decodificación del número difuso en un número tradicional (“*crisp*”), para lo cual también existen diferentes métodos [Chen, 1985; Kaufmann and Gupta, 1988; Sur and Omron, 1993]. Los más empleados son:

- El valor máximo (es decir, el más posible). Si se producen empates puede seleccionarse el primer valor encontrado o la media (en cuyo caso el método se denomina media de máximos). Pero para este estudio, en que se utilizarán números difusos triangulares convexos y simétricos, se corresponde con el valor modal.
- El centroide difuso, concebido como el o centro de gravedad de la representación de su función de pertenencia. Se da la circunstancia que esta alternativa arroja el mismo valor que la anterior, por la propia geometría de la función triangular simétrica.

Por tanto, según estos dos métodos de *defuzzificación*, cuando se desea comparar dos números difusos triangulares A y B, se transforman primero a números *crisp*, pudiendo así determinar cuál de ellos es mayor o menor escogiendo sencillamente su valor central.

- Otra técnica alternativa es la medida de la posibilidad, entendida como una medida que expresa el grado de posibilidad que tiene el número difuso A de ser menor que el número difuso B, lo cual se representa como $V(A \geq B)$. En otras palabras, la posibilidad puede entenderse como el grado de solapamiento que existe entre dos números difusos. Así, cuando los números difusos son iguales, la posibilidad tendrá un valor de uno (1). En tanto se vayan alejando los números, este valor se acercará cada vez más a cero (0). La formulación matemática para la posibilidad en números triangulares asimétricos es la siguiente [Chang, 1992; Büyüközkan *et al.*, 1994]:

Sean $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ y $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ dos números difusos triangulares donde la operación posibilidad se define como:

$$V(M_2 \geq M_1) = \begin{cases} 1, & \text{si } m_2 \geq m_1 \\ 0, & \text{si } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (ec. 2.18)$$

donde d es la ordenada del punto de intersección más alto D ubicado entre μ_{M_1} y μ_{M_2} , tal como se muestra en la figura 2.10. Para comparar M_1 y M_2 es necesario conocer $V(M_1 \geq M_2)$ y $V(M_2 \geq M_1)$.

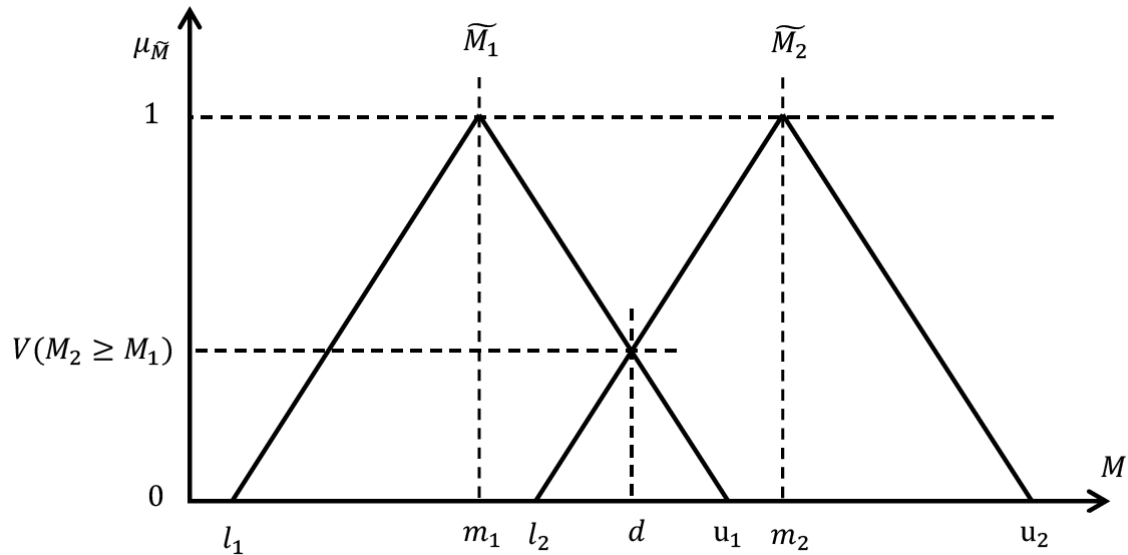


Figura 2.10. Comparación entre dos números difusos triangulares. Fuente: [Büyükoçkan et al., 2004].

2.1.6. Modelado lingüístico difuso.

Los problemas presentes en el mundo real presentan aspectos que pueden ser de distinta naturaleza. Cuando dichos aspectos o fenómenos son de naturaleza cuantitativa, estos se valoran fácilmente utilizando valores numéricos más o menos precisos. Sin embargo, cuando se trabaja con información vaga e imprecisa o cuando la naturaleza de tales aspectos no es cuantitativa como cualitativa, no es sencillo ni adecuado utilizar un modelado de preferencias numérico. En este caso, es más aconsejable utilizar otro tipo de modelado como, por ejemplo, el lingüístico [Chen and Hwang, 1992].

Este tipo de aspectos suele aparecer frecuentemente en problemas en lo que se pretenden evaluar fenómenos relacionados con percepciones y relaciones de los seres humanos (diseño, gusto, diversión, preferencia, etc.). En estas ocasiones, esta incertidumbre se representa mediante variables lingüísticas, que se adecuan mejor a la

cognición humana al utilizar palabras del lenguaje natural (*bonito, feo, dulce, salado, simpático, mucha, poca*, etc.) en lugar de valores numéricos para emitir tales valoraciones. Así, el uso de un modelado lingüístico de preferencias puede deberse a varias **razones** [Chen and Hwang, 1992; Zadeh, 1996; Pedrycz, 1998; Zadeh, 2005]:

- En primer lugar, por la capacidad acotada de los órganos sensitivos, así como del cerebro, para resolver problemas complejos y almacenar información.
- En segundo lugar, cuando la información numérica no existe, es parcial o está incompleta, ya sea porque no están disponibles los elementos necesarios para llevar a cabo una medición exacta o porque el coste de su medición es muy elevado. En este caso, el uso de un valor aproximado que permita reflejar los distintos valores del problema puede ser adecuado.
- En tercer lugar, cuando un atributo no es cuantificable, es vago o impreciso, de modo que solo se puede expresar cualitativamente, es decir, mediante datos cualitativos según la subjetividad de los individuos, habitualmente expertos a los que se recurre para la caracterización del problema.
- En cuarto lugar, cuando el ajuste de una variable puede producir el desajuste de otras.
- Y en quinto lugar, cuando hay cierta tolerancia con la imprecisión, lo que puede ser aprovechado por la metodología con el fin de lograr operatividad, robustez y economía en la comunicación. Según [Zadeh, 2005], debería notarse que esta última es la razón más importante para el uso de la imprecisión, en la forma de variables lingüísticas.

El modelado lingüístico difuso, que tiene como base teórica la Teoría de Conjuntos difusos expuesta anteriormente, se ha mostrado como una técnica eficaz para valorar aspectos de la naturaleza cualitativa [Degani and Bortolan, 1988; Yager, 1995; Adamopoulos and Pappis, 1996; Bordogna *et al.*, 1997; Herrera *et al.*, 2000; Torra, 2001; Xu, 2004; Arfi, 2005]. Para representar los aspectos cualitativos como valores lingüísticos, utiliza variables lingüísticas, definidas como aquella noción o concepto que se va clasificar de forma difusa y del que se determinan sus características mediante el lenguaje hablado, o

sea, cuyo dominio de expresión son conjuntos de palabras o términos lingüísticos [Zadeh, 1975a; Zadeh, 1975b; Zadeh, 1975c].

Una **variable lingüística** se caracteriza por un valor sintáctico o etiqueta y por un valor semántico o significado. La etiqueta es una palabra o frase perteneciente a un conjunto de términos lingüísticos y el significado de dicha etiqueta viene dado por un subconjunto difuso en un universo de discurso [Delgado *et al.*, 1992; Herrera and Herrera-Viedma, 1992; Zadeh and Kacprzyk, 1999].

Al ser las palabras menos precisas que los números, el concepto de variable lingüística es una buena propuesta para caracterizar aquellos fenómenos que no son adecuados para poder ser evaluados mediante valores numéricos.

Formalmente una variable lingüística se define como un quintuplo $\{ X; T(X); U; G; M \}$, donde [Zadeh, 1973; Carlsson and Fullér, 2002]:

- X es el nombre de la variable.
- T(X) es el término conjunto de X, esto es, la colección de sus valores lingüísticos.
- U es un universo de discurso de la variable.
- G es la regla sintáctica para la generación de los elementos de T(X) y
- M es la regla semántica que asocia a cada elemento de T(X) su significado. Para cada valor $L \in T(X)$, M(L) será un subconjunto difuso de U.

Los términos lingüísticos difusos a menudo consisten de dos partes [Zadeh, 1975(b)]:

- Predicado difuso (por ejemplo: costoso, viejo, raro, peligroso, bueno, etc.).
- Modificador difuso (por ejemplo: muy, apropiado, casi imposible, extremadamente inapropiado, etc.). El modificador es usado para cambiar el significado del predicado y este puede ser agrupado en las siguientes dos clases:
 - Calificador de verdad difuso, tales como: muy cierto, bastante cierto, más o menos cierto, en su mayoría falso, etc.

- Cuantificador difuso, del tipo: mucho, poco, casi, todo, usualmente, etc.

En cualquier ámbito en el que se desee aplicar un enfoque lingüístico difuso para la resolución de algún problema, se deben tomar dos decisiones:

- Modelo de representación: elección del conjunto de términos lingüísticos junto con su semántica. De esta forma, se proporciona a una fuente la información (experto, juez, etc.) un número de términos con los que poder expresarla. Son los descriptores o etiquetas lingüísticas.
- Modelo computacional: definir el modelo computacional seleccionando los correspondientes operadores de comparación y de agregación.

Por tanto, las etiquetas lingüísticas son un caso particular de conjuntos difusos, concretamente estandarizados, puesto que el universo de discurso asume valores estándares y el número de conjuntos difusos depende de la *discretización* del conocimiento deseada. De hecho, para que una fuente de información pueda expresar con facilidad su información y conocimiento es necesario que disponga de un conjunto apropiado de descriptores lingüísticos.

Un aspecto muy importante que es necesario analizar con el fin de establecer la descripción de una variable lingüística es la **granularidad de la incertidumbre** [Bonissone, 1986], es decir, la cardinalidad del conjunto de términos lingüísticos usado para expresar y representar la información.

Se dice que un conjunto de términos lingüísticos tiene:

- Una granularidad baja o un tamaño de grano grueso cuando la cardinalidad del conjunto de etiquetas lingüísticas es pequeña. Esto significa que el dominio está poco aprisionado y que existen pocos niveles de distinción de la incertidumbre, produciéndose una pérdida de expresividad.
- Una granularidad alta o un tamaño de grano fino cuando la cardinalidad del conjunto de etiquetas lingüísticas es alta. Esta situación puede provocar un aumento de la complejidad en la descripción del dominio.

La cardinalidad de un conjunto de términos lingüísticos no debe ser demasiado pequeña como para imponer una restricción de precisión a la información que quiere expresar cada fuente de información, y debe ser lo suficientemente grande como para permitir hacer una discriminación de las valoraciones en un número limitado de grados. Habitualmente, la cardinalidad usada en los modelos lingüísticos suele ser un valor impar como 5, 7 o 9, no superando las 11 o 13 etiquetas. El término medio representa una valoración de aproximadamente 0,5 y el resto de los términos se distribuyen alrededor de este [Bonissone, 1986]. Estos valores clásicos de cardinalidad parecen estar dentro de la línea de observación de Miller sobre la capacidad humana, en la que se indica que se pueden manejar razonablemente y recordar alrededor de 7 o 9 términos diferentes [Miller, 1956].

Una vez establecida la cardinalidad, es necesario definir un mecanismo para generar los términos lingüísticos. Existen dos enfoques para esto, uno los define a partir de una gramática libre de contexto y el otro mediante un orden total definido sobre el conjunto de términos lingüísticos, que es lo más habitual. En este caso, los valores lingüísticos asumen nombres independientes de la aplicación como, por ejemplo [Terano *et al.*, 1992]:

- Para 3 valores: NE (*Negative*), ZE (*Zero*), PO (*Positive*).
- Para 5 valores: NB (*Negative Big*), NS (*Negative Small*), ZE (*Zero*), PS (*Positive Small*), PB (*Positive Big*).
- Para 7 valores: NB, NM (*Negative Medium*), NS, ZE, PS, PM (*Positive Medium*), PB.
- Etc.

Existen varios modos para definir la semántica del conjunto de etiquetas lingüísticas [Yager, 1994; Torra, 1996; Bordogna *et al.*, 1997], siendo uno de los más utilizados el enfoque basado en funciones de pertenencia [Tong and Bonissone, 1980; Bonissone, 1986; Delgado *et al.*, 1992; Bordogna and Pasi, 1993; Huey-Ming, 1996; Martínez *et al.*, 2010] relacionadas con adverbios que conforman el cuantificador difuso que modifica el atributo que se está evaluando, que es el que se utilizará en esta tesis.

Obviamente, la estandarización adoptada para las funciones de pertenencia debe definir la superposición de los conjuntos difusos relacionados.

El **enfoque basado en funciones de pertenencia** define la semántica del conjunto de términos lingüísticos utilizando números difusos en el intervalo $[0,1]$, donde cada número difuso es descrito por una función de pertenencia [Bellman and Zadeh, 1970; Kacprzyk and Yager, 2001]. Un método eficiente desde un punto de vista computacional para caracterizar un número difuso es usar una representación basada en parámetros de su función de pertenencia [Bonissone, 1986]. Debido a que las valoraciones lingüísticas dadas por las fuentes de información son aproximadas, algunos autores consideran que las funciones de pertenencia triangulares son lo suficientemente buenas como para representar la vaguedad de dichas valoraciones lingüísticas [Tong and Bonissone, 1980; Bonissone, 1982; Tong and Bonissone, 1984; Bonissone, 1986; Delgado *et al.*, 1992].

Es muy común utilizar un sistema numérico para convertir sistemáticamente las variables lingüísticas en sus correspondientes números difusos, mediante el empleo de determinadas escalas de conversión [Chen and Hwang, 1992; Celik *et al.*, 2009]. De este modo, para cada variable lingüística se tiene su correspondiente número difuso triangular y es el decisor el que elige el número de niveles que desea emplear para representar la importancia de los objetivos o los valores de los objetivos para las diferentes alternativas.

Las variables lingüísticas difusas constituyen una gran ventaja respecto a la forma como se valoran generalmente las variables, que al dividir el rango de posibles valores en intervalos excluyentes genera grandes diferencias entre valoraciones cercanas a los límites de los intervalos, lo que es su mayor inconveniente. Por ejemplo, si un intervalo determina como bajo a valores entre 0 y 0,3, y medio a valores entre 0,31 y 0,69, un valor de 0,29 queda clasificado como bajo, mientras uno de 0,31 queda determinado como medio. Las variables lingüísticas difusas no crean esos abismos entre valores tan cercanos.

Gráficamente algunas de las escalas se representan de la manera como se muestra en las figuras 2.11 y 2.12.

Tabla 2.1. Resumen de los términos empleados en las escalas para conversión de términos lingüísticos.
Fuente: adaptado de [Chen and Hwang, 1992].

| Nº DE TÉRMINOS EMPLEADOS | 2 | 3 | 5 | 5 | 7 | 9 |
|----------------------------|---|---|---|---|---|---|
| ESCALA | | | | | | |
| Extremadamente bajo | | | | | | X |
| Muy bajo | | | X | | X | X |
| Bajo | | X | X | X | X | X |
| Moderadamente bajo | | | | X | X | X |
| Medio | X | X | X | X | X | X |
| Moderadamente alto | | | | X | X | X |
| Alto | X | X | X | X | X | X |
| Muy alto | | | X | | X | X |
| Extremadamente alto | | | | | | X |

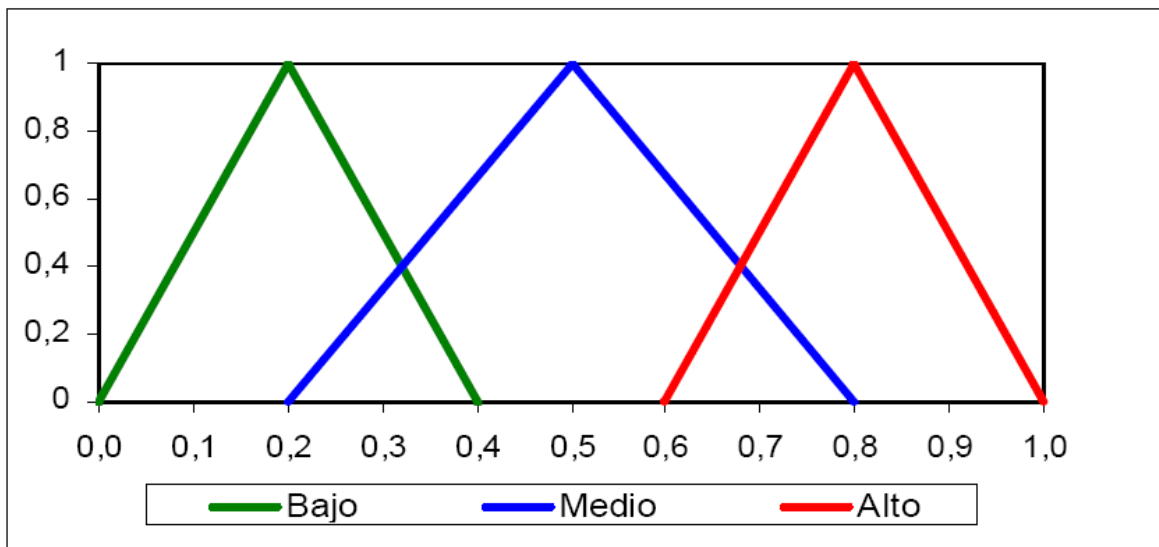


Figura 2.11. Escala de tres términos lingüísticos. Fuente: [Chen and Hwang, 1992].

De forma general, se puede considerar que el empleo de términos lingüísticos es de gran utilidad en la solución de problemas prácticos, lo cual se manifiesta en [Zadeh, 1975(a); Zadeh, 1994]:

- Contribuye a la caracterización de fenómenos que están mal definidos o son de gran complejidad su definición o ambas inclusive.

- Es una variante que permite trasladar descripciones lingüísticas a representaciones numéricas, facilitando el tratamiento automático. Relaciona procesos simbólicos a procesos numéricos.
- Una etiqueta incluye muchos valores posibles, por lo que es una forma de comprimir información (granulación).

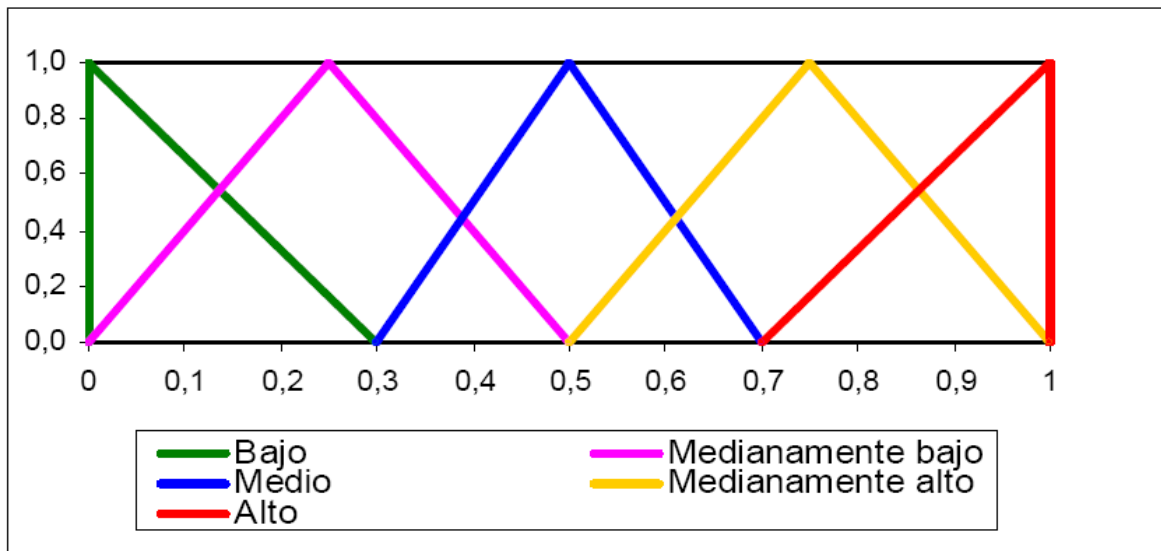


Figura 2.12. Escala de cinco términos lingüísticos (Tipo 2). Fuente: [Chen and Hwang, 1992].

2.2. LA TOMA DE DECISIONES.

2.2.1. Técnicas de decisión.

La toma de decisiones resulta un proceso habitual en la vida cotidiana del ser humano. En multitud de ocasiones nos encontramos ante diferentes alternativas entre las que debemos seleccionar la que, a nuestro juicio, nos parece la mejor o la que satisface el mayor número de las necesidades requeridas, y el ámbito laboral no es una excepción. Los ejecutivos de las empresas y organizaciones, los responsables políticos, los directores de proyectos y en general los profesionales han de adoptar decisiones difíciles durante el transcurso de sus actividades.

Estas decisiones difíciles se caracterizan por observar intereses diferentes y, en ocasiones, contrapuestos, tener elementos de incertidumbre, envolver distintas personas en la decisión y poseer elementos con diferente facilidad de valoración [León, 2001].

Se puede afirmar que un individuo o colectivo tiene un **problema de decisión** cuando se plantea un conjunto bien definido de alternativas o cursos de acción posibles, al menos dos, y un conflicto tal que es necesario elegir una de las alternativas, o bien establecer en ese conjunto unas preferencias [Dieter, 1983].

A menudo se entiende que una buena decisión se da cuando, transcurrido el tiempo, las consecuencias se han mostrado favorables. Sin embargo, la mayor parte de las veces no se pueden comparar las consecuencias de una decisión adoptada con las que hubieran ocurrido si se hubiera adoptado una solución diferente. Por este motivo resulta imprescindible considerar también el proceso mediante el cual se adoptó la decisión final para poder concluir o no que la solución fue la mejor posible, teniendo en cuenta la información disponible en ese momento y los recursos que entonces se pudieron emplear. Se entiende, por tanto, que una decisión ha sido buena si se ha tomado con el mejor procedimiento disponible. En cambio, no se puede calificar una decisión como buena si ha dado buenos resultados pero no se conoce cómo se procedió en su adopción [León, 2001].

En proyectos de ingeniería la toma de decisiones es una actividad intelectual esencial, sin la cual la planificación y proyección no puede progresar. Durante el desarrollo de un proyecto se toman decisiones complejas; complejidad que viene marcada, no solo por la trascendencia que muchas de estas decisiones tienen para el proyecto, sus responsables o el campo que va a ser objeto de actuación por la decisión adoptada, sino también por los diferentes criterios o puntos de vista que hay que tener en cuenta y que a menudo están en conflicto [De Boer, 1989], independientemente de si son tomadas por una o varias personas [Ehrgott and Gabdibleux, 2002]. De hecho, no es posible ignorar que cada decisión real consiste de hecho en un compromiso entre diversas soluciones, cada una con sus ventajas y sus inconvenientes, dependiendo de la posición que se adopte [Barba-Romero y Pomerol, 1997]. Además, los problemas de toma de decisiones en la ingeniería hoy en día son tan complejos y requieren de visiones integrales de todo el problema, que cada vez será más difícil, si no imposible, no tener en consideración los diferentes puntos

de vista, motivaciones o fines. Es decir, pensar en soportar las decisiones asociadas a estos problemas con base en un solo objetivo sería una consideración demasiado simplista [Ehrgott and Gabdibleux, 2002]; ahora es preciso tener en cuenta los deseos de los distintos actores y la pluralidad de sus intenciones.

Se citan a continuación las diferentes razones que justifican la atención especial que se debe prestar a la **toma de decisiones en proyectos de ingeniería** [De Boer, 1989]:

- El incremento de la magnitud de los problemas de decisión como consecuencia del tamaño y complejidad de los proyectos que se desarrollan en la actualidad.
- La necesidad que tienen las empresas y las administraciones de tomar buenas decisiones o tomar la mejor de las decisiones posibles, en un entorno económico cada vez más competitivo y restrictivo, para obtener mejores resultados.
- La limitación de los seres humanos a la hora de enfrentarse a problemas complejos de toma de decisiones. Ello es debido a la limitada capacidad de mejora de atención, a la tendencia a cambiar las metas y los valores y a ser selectivos en la adquisición y procesamiento de información.
- El aumento de la responsabilidad de los proyectistas debido a que cada vez la legislación exige mayor seguridad y calidad en los productos, instalaciones y obras de ingeniería, así como la sociedad mayor justificación en el gasto, eficiencia de la inversión y justificación de la actuación. Todo ello demanda mayor rigor en los documentos del proyecto y en la dirección de su ejecución.

El proceso de toma de decisiones normalmente se apoya en la experiencia del decisor o en la semejanza a decisiones anteriormente tomadas que llevaron a buenos resultados, y para ello, se hace necesario un método sistemático o herramienta de apoyo a la resolución de tal disyuntiva de una forma racional, que represente fielmente cada problema y analice las distintas alternativas con criterios objetivos [Keeney and Raiffa, 1993]. De esta racionalidad nacen las denominadas técnicas de decisión, que a su vez son estudiadas por la **Teoría de la Decisión** [Romero, 1996]. Esta rama científica pretende sistematizar el proceso de toma de decisiones en los seres humanos para poder simularlo y

aplicarlo a la resolución de problemas concretos [Dale and English, 1999]. De manera algo más formal, la teoría de la decisión es una teoría axiomática que permite tomar decisiones en condiciones de incertidumbre.

Fue a partir de la década de 1960 cuando empezaron a realizarse aplicaciones de la teoría de la decisión, sobre todo en cuestiones económicas relacionadas con la maximización del rendimiento de inversiones y otras situaciones similares. Desde el punto de vista metodológico, la teoría de la decisión se basa en buena medida en las técnicas estadísticas y en la teoría económica [Gough and Ward, 1996]. Así, es muy común encontrarse con la utilización de esta herramienta en aplicaciones de economía, ciencias sociales, planificación territorial y ciencias ambientales. Sin embargo, la teoría de la decisión ha sido también estudiada extensamente en el ámbito de ingeniería y muchos de los métodos más usados en la actualidad son producto de la investigación realizada en esta área del conocimiento [Ehrgott and Gabdibleux, 2002].

La teoría de la decisión se ha orientado a dos direcciones distintas [Barba-Romero y Pomerol, 1997]:

- Una llamada normativa o cualitativa que define la racionalidad de los decisores basándose en una serie de supuestos justificables intuitivamente, es decir, apoya la decisión en un proceso de observación de la realidad y hace uso del conocimiento y experiencia adquiridos para posteriormente realizar una serie de operaciones lógicas que permitan deducir el comportamiento óptimo compatible con la racionalidad previamente establecida. Como se ve, la intuición aquí juega un papel muy importante.
- Otra denominada positiva, cuantitativa o empírica que consiste en elaborar una serie de articulaciones lógicas que pretenden explicar y predecir el comportamiento de los agentes decisores reales. Esta teoría asocia a cada realidad un modelo matemático de decisión a través del cual resulta posible describir, comprender y manejar la realidad. Este enfoque resulta más delicado y más difícil pues precisa desarrollar un lenguaje matemático particular, cuantificar los factores de influencia, analizar los mecanismos de funcionamiento y prever las consecuencias de las posibles decisiones. Todo

modelo no será sin embargo más que una construcción humana, una abstracción de la realidad.

En esencia, el enfoque positivo corresponde a una filosofía de cómo son (cómo se comportan) mientras que el enfoque normativo obedece a cómo han de ser (cómo deben comportarse) los centros decisores. No obstante, ambos enfoques no son incompatibles, de hecho y sobre todo si se trata de realidades muy complejas, el enfoque cuantitativo se desarrolla de más en más, complementándolo con el enfoque cualitativo. Por otro lado, hoy en día las realidades económicas, técnicas u otras son frecuentemente de tal magnitud y complejidad, que resulta prácticamente imposible abordarlas de forma exclusivamente cualitativa.

El esquema de resolución de un problema de toma de decisión se compone de 8 fases [Clemen, 1975] que se muestran gráficamente en la figura 2.13, siendo las 7 primeras denominadas al proceso de análisis de decisión.

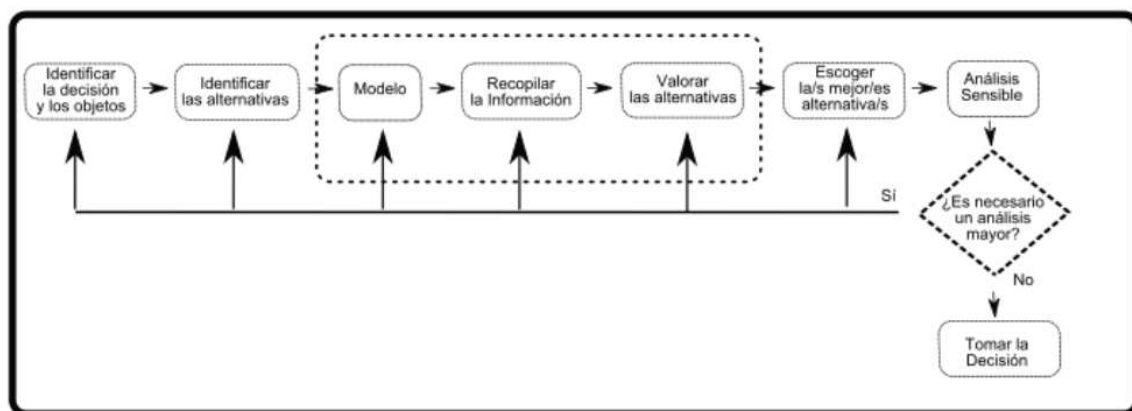


Figura 2.13. Esquema de un proceso de toma de decisión. Fuente: [Clemen, 1975].

Por tanto, se observa que aunque el análisis de decisión (parte emocional del proceso de toma de decisión) no sea seguido siempre por los decisores a la hora de tomar sus decisiones (parte irracional del proceso de toma de decisión), sí es responsable de realizar un estudio metódico y analítico que ayude a analizar las alternativas, indicadores, etc., del elemento que se está estudiando, para lo cual son necesarias una serie de herramientas, que constituyen el objetivo de las técnicas de evaluación.

Así, en general, las **técnicas de decisión** mejoran considerablemente los resultados de la toma de decisiones incidiendo en los siguientes aspectos [Hsu *et al.*, 1995; Rauscher, 1999, Vacik and Lexer, 2001]:

- Facilitan el proceso de identificación de los factores implicados en el problema a resolver.
- Asisten a la hora de elegir entre las posibles alternativas antes de tomar la decisión.
- La sistematización del proceso de toma de decisiones hace que este sea reproducible con facilidad. El proceso está documentado, es transparente y puede ser evaluado. Esto reduce notablemente la arbitrariedad y subjetividad del proceso de toma de decisiones.
- Por último y muy importante, aumentan considerablemente la capacidad de explicar y justificar las decisiones que se han tomado. Esto se debe a la capacidad de análisis, despliegue y procesamiento de la información con la que cuentan. De esta manera su uso permite conocer mejor el proceso que se está analizando, lo cual redundará en una mejora de la decisión tomada.

2.2.2. Conceptos básicos sobre decisión.

Para entender mejor el proceso de decisión, especialmente los métodos de análisis de decisión multicriterio que se revisarán en apartados siguientes, es necesario definir claramente algunos de los conceptos básicos involucrados, pudiendo diferenciar entre los actores que participan, los elementos que aparecen o las problemáticas que se presenten. Seguidamente se va a tratar brevemente sobre ellos.

En primer lugar, cuando se aborda la elaboración de un modelo de decisión (o proceso de decisión) de una realidad, los **actores** que participan pueden ser varios [Roy, 1985; Ríos *et al.*, 1989; Ríos *et al.*, 2006; Tsoukiás, 2006]:

- El decisor o decisores: aquellos que en función de sus sistemas de valores hacen valer sus preferencias y a los que se dirige la ayuda a la decisión. Estos actores pueden ser un grupo responsable de una empresa, un consejo de administración, un individuo, etc. En el caso abordado en esta tesis, representa los niveles superiores de la Administración que ha de afrontar el problema de ruido de una carretera de su competencia (por ejemplo, el jefe o jefes del Departamento de Carreteras de una región determinada).
- Los afectados: quienes se benefician o sufren las consecuencias de la decisión tomada. Como es importante que esta sea consensuada, conviene tener muy en cuenta sus preferencias. En nuestro este estudio se trata de los ciudadanos afectados por el ruido, así como los usuarios de la carretera analizada.
- El analista u hombre de estudio: quien ejerce la actividad de ayuda a la decisión, es decir, el técnico o equipo de técnicos que ejerce su actividad tomando apoyo sobre modelos claramente explicitados pero no necesariamente formalizados de manera completa, ayuda a obtener elementos de respuestas a las cuestiones que se plantean los que intervienen en un proceso de decisión, elementos que concurren a aclarar la decisión y a recomendar, un comportamiento que aporte coherencia entre la evolución del proceso y los objetivos de los que intervienen. El analista no expresa opiniones personales, sino que se limita a reconocer las del decisor y a tratarlas de la manera más objetiva posible. El hombre de estudio en el ámbito de esta tesis puede ser la empresa consultora de ingeniería que realiza el estudio para la Administración o bien los propios ingenieros de la misma que elaboran el plan, ya sea directamente o con el apoyo externo de otros técnicos.
- El solicitante: quien encarga el trabajo y se ocupa de proporcionar el apoyo y los medios que pueda necesitar el hombre de estudio. En el caso presente se puede identificar como la propia Administración, vista como ente completo que, obligada por su propia normativa y responsabilidades, ha de dar respuesta a un problema de ruido.

Los actores que pueden participar en el proceso interactúan continuamente con sus opiniones y criterios, pudiendo además surgir conflictos entre ellos. En concreto, no hay que perder de vista los roles y la complementariedad entre el decisor y el hombre de estudio, de forma que el primero trabaja en el mundo real, toma la decisión y asume la responsabilidad de dicha decisión, mientras que el hombre de estudio trabaja en el modelo, se encarga del análisis y procura ayuda y asistencia. Además, es el decisor quien tiene en cuenta los factores de influencia mientras el hombre de estudio los representará en el lenguaje matemático del modelo, bajo forma de funciones y restricciones. Por último, se observa que los objetivos que tiene el decisor serán traducidos en criterios de evaluación por el hombre de estudio [Brans and Mareschal, 2002].

En cuanto a las **problemáticas** que se pueden presentar en un problema de decisión, deben considerarse las siguientes de referencia [Roy, 1975; Roy, 1985]:

- Problemática $P\alpha$ (o problemática de selección): el decisor desea seleccionar una acción concreta. La investigación se orienta a proporcionar la mejor solución posible, es decir hacia la puesta en evidencia de un subconjunto dentro de las alternativas tan restringido como sea posible, concebido para esclarecer directamente al decisor sobre lo que debe ser objeto de la siguiente fase del proceso. Esta problemática prepara una forma de recomendación o de simple participación tendente a indicar con un máximo de precisión y de rigor una decisión de selección de la mejor acción o, en su defecto, de las más satisfactorias.
- Problemática $P\gamma$ (o problemática de ordenación): el decisor desea una ordenación de todas las acciones planteadas, por ejemplo de la mejor a la menos buena. La investigación se orienta a obtener una ordenación (un preorden total) sobre el conjunto de soluciones en función de un modelo de preferencias.
- Problemática $P\beta$ (o problemática de clasificación): el decisor desea afectar cada acción a una categoría definida *a priori*. El procedimiento debe proceder a esta clasificación, es decir la investigación se orienta hacia la puesta en evidencia de una asignación de las alternativas posibles a estas categorías sobre las que

efectuar determinadas recomendaciones, según el carácter de las mismas, como por ejemplo la aceptación o el rechazo para ciertas de ellas.

- Problemática P δ (o problemática de descripción): el decisor desea obtener una descripción sistemática y formalizada de las alternativas y/o de sus consecuencias cualitativas o cuantitativas, es decir la investigación se orienta hacia la puesta en evidencia, con un lenguaje apropiado, de informaciones relativas a las alternativas concebidas en vista de ayudar directamente al decisor a descubrirlas, a comprenderlas y a juzgarlas.

En el caso de esta tesis, se orientará la metodología no solo a una selección de la mejor solución, sino incluso a establecer una ordenación de las posibles, tanto desde el punto de vista de dónde se debe actuar como de la forma en que se debe hacer, es decir, se buscarán técnicas de decisión que faciliten la aproximación a la problemática P γ .

Finalmente, en cuanto a los **elementos que intervienen** en el problema de toma de decisión, existen básicamente los siguientes [Chernof, 1985; Ríos *et al.*, 1989; Romero, 1993; Aragonés y Gómez-Senent, 1997]:

- El ambiente, entorno o contexto de la situación de decisión y en el que transcurre el proceso de toma de decisiones. El conjunto de características que definen perfectamente la situación de decisión respecto al entorno se denomina estado del ambiente o de la naturaleza.
- El conjunto de alternativas para resolver el problema. Se entiende como el conjunto finito de soluciones, estrategias, acciones, decisiones, etc. posibles que hay que analizar durante el proceso de resolución del problema de decisión que se considere. Constituye el conjunto de posibles opciones definidas sobre las que la unidad decisora realiza una decisión, cada una con sus pros y sus contras. El conjunto de alternativas se designa por $A = \{ A_1, A_2, \dots, A_m \}$, donde A_i ($i = 1, \dots, m$) son cada una de las alternativas posibles, que se suponen diferentes, excluyentes y exhaustivas: diferentes porque cada alternativa está definida de tal forma que es claramente diferenciable del resto; excluyentes porque la elección de una de ellas imposibilita la elección de cualquier otra; y exhaustivas porque definido el conjunto, este constituye el universo de decisión. Estos

términos se concretan en que se prohíbe que el decisor escoja una solución mixta, es decir, intermedia entre dos alternativas, A_i y A_j , ya que dicha solución constituiría una alternativa diferente que debería ser tenida en cuenta de forma independiente. También se le prohíbe escoger una alternativa que no pertenezca al conjunto de elección: si el decisor introduce una nueva alternativa es preciso volver a comenzar el análisis con el nuevo conjunto así definido.

Un conjunto de soluciones es eficiente cuando está formado por soluciones factibles, tales que no existe otra solución factible que proporcione una mejora en un atributo sin producir un empeoramiento en al menos otro de los atributos. A esta solución se le denomina solución Pareto eficiente en honor al economista italiano Pareto [Romero, 1993].

- Los criterios, o sea, cada uno de los distintos aspectos de la realidad que se desprenden del manejo de las alternativas, o como parte de las mismas en la solución de un problema, y constituyen los puntos de vista o parámetros que se utilizan para manifestar las preferencias del decisor y sirven de elementos de referencia en base a los cuales se realiza la decisión. Un criterio trata de resumir, con ayuda de una función, las evaluaciones de una acción sobre diversas dimensiones que se asocian al mismo punto de vista. Los criterios de decisión suelen representarse como el conjunto $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, donde C_j ($j = 1, \dots, n$) y su significado engloba los conceptos de objetivo, atributo y meta [Romero, 1993; Roy and Bouyssou, 1993; Aragonés y Gómez-Senent, 1997]:
 - Los objetivos indican las direcciones en la que la unidad decisora debería esforzarse para hacer las cosas mejor, por lo que suelen representarse como maximización y minimización (optimización) de las funciones que corresponden a los criterios. Por ejemplo, minimizar el presupuesto de ejecución de un proyecto.
 - Los atributos son las características que definen a las alternativas e interesan al decisor acerca de las mismas, con las que puede establecer el grado de alcance o cumplimiento de un objetivo. Son valores que da el decisor respecto a una realidad objetiva, es decir, se pueden medir, y normalmente se expresan como las variables de decisión de la función matemática $f(x)$ que define el criterio, de tal forma que cada alternativa se puede caracterizar

mediante un conjunto de medidas relacionadas con los objetivos del decisor (por ejemplo, el volumen en euros del presupuesto total de ejecución de un proyecto). En el momento en que el decisor imprime sus preferencias sobre los atributos de las alternativas, estos se convierten en criterios.

- Una meta se define como el valor que cuantifica un nivel de logro aceptable que un atributo debe esforzarse por alcanzar. La combinación de un atributo con un nivel de aspiración genera una meta y se expresa como una inecuación de la función matemática del atributo que define el criterio. Por ejemplo: alcanzar un cierto nivel de ventas, representa una meta, su expresión matemática será $f(x) \geq t$; en algunos casos el centro decisor puede desear alcanzar exactamente el nivel de aspiración, por lo que la expresión matemática de la meta será $f(x) = t$ donde el parámetro t representa el nivel de aspiración; en otras ocasiones, la meta es un valor que no debe ser superado, como, por ejemplo, que el presupuesto total de ejecución de un proyecto sea inferior a una determinada cantidad, es decir, $f(x) \leq t$.

Una aclaración pertinente es señalar la diferencia entre metas y restricciones, cuando aparentemente no existiría ninguna diferencia entre ambos conceptos, pues ambas se representan como desigualdades, la sutileza reside en el significado que se dé al término de la derecha de la correspondiente desigualdad. Si se trata de una meta, el término de la derecha es un nivel de aspiración deseado y puede o no ser alcanzado, pero si la desigualdad se refiere a una restricción, el término de la derecha debe alcanzarse o la solución será no factible o será inalcanzable. En otras palabras, las metas permiten ciertas violaciones de las inecuaciones, lo que no es posible en el dominio de las restricciones. [Aragonés y Gómez-Senent, 1997]

Entre las **características que deben reunir los criterios** aparecen, en primer lugar, que deben ser comprensibles y medibles, es decir, el valor del atributo ha de ser el adecuado para expresar o medir el grado de cumplimiento del objetivo asociado y debe ser posible asociarle una escala conocida, bien mediante la obtención de una distribución de probabilidad sobre los distintos niveles del atributo para cada alternativa, o bien mediante la asignación de un orden a las preferencias del decisor para los diferentes niveles del

atributo. También es recomendable que el conjunto de atributos tenga las siguientes propiedades [Chernof, 1985; Saaty, 1994]:

- **Completitud:** se considera completo cuando el conjunto de atributos es adecuado para indicar el grado de cumplimiento de todos los objetivos, condición que se satisface si todos los objetivos del nivel más bajo de la jerarquía incluyen a todas las áreas implicadas en el problema y si los atributos asociados a estos objetivos satisfacen la propiedad de comprensibilidad.
- **Descomponibilidad:** los atributos deben permitir la simplificación del proceso de evaluación mediante la descomposición en partes del problema.
- **No redundancia:** el conjunto de atributos debe evitar cuantificar dos veces las mismas consecuencias.
- **Minimalidad:** el conjunto de atributos debe ser lo más pequeño posible sin que se pierdan por ello aspectos importantes. Esta condición se formaliza diciendo que no debe existir otro conjunto completo de atributos que represente el mismo problema con un número menor de atributos.
- Finalmente, la matriz de decisión, que es una tabla en la que están representadas cada una de las alternativas del problema por medio de columnas y cada uno de los criterios (para valorar las alternativas) a través de las filas y contiene los valores de utilidad o consecuencias asociados a los pares formados por cada alternativa y atributo.

De acuerdo con lo anterior, si se tiene un problema de decisión constituido por un conjunto de m posibles de alternativas a implementar A_1, A_2, \dots, A_m y un conjunto de n criterios de decisión C_1, C_2, \dots, C_n (figura 2.14), se supone que el decisor es capaz de dar, para cada uno de los criterios considerados y para cada alternativa del conjunto de elección, un valor numérico o simbólico r_{ij} que expresa una evaluación o juicio de la alternativa A_i con respecto al criterio C_j , o visto de otra manera, el grado de cumplimiento de la alternativa i con respecto al objetivo j [Smith *et al.*, 2000]. Esta evaluación puede ser numérica o lingüística y al ser representada en forma de matriz da lugar a la denominada **matriz de valoración o decisión** (r_{ij}), en la cual cada fila de la matriz expresa valoraciones de la alternativa A_i con respecto a los n criterios considerados y cada columna de la matriz

recoge las evaluaciones o juicios emitidos por el decisor de las m alternativas respecto al criterio C_j [Romero, 1993]. Como se verá, también son muy importantes los pesos que cada criterio tenga dentro de la evaluación de las alternativas, pues permiten ponderar los resultados de estas valoraciones, así como es importante la normalización de las mismas, para que sean comparables entre sí.

$$R = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_i \\ \dots \\ A_m \end{matrix} & \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2j} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} & \dots & r_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mj} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Figura 2.14: Representación de una matriz de decisión de alternativas frente a criterios. Fuente: elaboración propia.

Una etapa fundamental de la ayuda a la decisión es aquella en la cual se tienen en cuenta las preferencias de la unidad decisor en relación a las alternativas. Se admitirá que estas preferencias pueden ser modelizadas mediante las siguientes cuatro situaciones caracterizadas a través de relaciones binarias [Colson and Bruyn, 1989; Romero, 1993; Roy and Bouyssou, 1993]:

- Indiferencia: cuando existen razones claras y positivas que justifican una equivalencia entre las dos acciones. «La acción a es indiferente a la acción b » se denota por aIb , relación simétrica y reflexiva.
- Preferencia estricta: cuando existen razones claras y positivas que justifican una preferencia significativa de una de las dos acciones. «La acción a es estrictamente preferida a la acción b » se denota por aPb , relación asimétrica e irreflexiva.
- Preferencia débil: cuando existen razones claras y positivas que invalidan una preferencia estricta en favor de una de las dos acciones pero esas razones son insuficientes para deducir bien una preferencia estricta en favor de la otra, bien una indiferencia entre las dos acciones (esas razones no permiten por tanto

aislar una de las dos situaciones precedentes como la única apropiada). «La acción a es débilmente preferida a la acción b» se denota por aQb , relación asimétrica e irreflexiva.

- *Incomparabilidad*: cuando no existen razones claras y positivas que justifiquen una de las tres situaciones precedentes. «Las acciones a y b son incomparables» se denota por aRb , relación simétrica e irreflexiva.

2.2.3. Clasificación de los problemas de decisión.

Ante la gran variedad de situaciones o problemas de decisión que se pueden presentar en la vida real, la teoría de decisión ha establecido una serie de criterios que permiten clasificar los problemas de decisión atendiendo a diferentes puntos de vista [Luce and Raiffa, 1985; Aragonés y Gómez-Senent, 1997; Triantaphyllou, 2000]:

- Según el número de criterios o atributos que se han de valorar en la toma de decisión.
- Según el carácter de los criterios utilizados.
- Según la situación de las decisiones que se toman.
- Según el ambiente de decisión en el que se han de tomar las decisiones.
- Según las características del conjunto de alternativas.
- Según las características de la unidad decisora.

A continuación se analiza cada clasificación.

Según el número de criterios.

A la hora de clasificar los problemas de decisión, en primer lugar, como ha podido desprenderse del apartado anterior, puede establecerse la diferenciación según el número de criterios que son tenidos en cuenta, es decir, bien si se plantea un único criterio

(problema unicriterio) o bien si existen dos o más (problema multicriterio) [Fodor and Roubens, 1994; Chuu, 2005; Choi *et al.*, 2007; Fu, 2008].

El primer tipo es el más antiguo en la literatura y es el que ha sido seguido por los modelos clásicos de investigación de operaciones, establecidos progresivamente desde 1937. Según este Paradigma Decisional Clásico o **Unicriterio**, para decidir entre varias acciones cuál es la que más conviene, se procede del siguiente modo [Romero, 1993]:

- Se establece el conjunto de soluciones factibles del problema de decisión analizado.
- Partiendo de un cierto y único criterio, que representa las preferencias del centro decisor, se asocia a cada solución un número que representa el grado de deseabilidad que tiene cada alternativa para el centro decisor. Esta función de criterio recibe el nombre de «función objetivo».
- Se establece una ordenación de las soluciones factibles, es decir, de aquellas que cumplen las restricciones del problema.
- Utilizando técnicas matemáticas más o menos sofisticadas, se procede a buscar entre las soluciones factibles aquella que posee un mayor grado de deseabilidad. Esa alternativa es la «solución óptima», pues queda totalmente determinada por su formulación y no por el modo de resolución del problema. La solución óptima de un problema que sigue un modelo unicriterio, será siempre propuesta al decisor, y este, si estima que el modelo es coherente con la realidad, no tiene más espacio de libertad, debe aceptarla.

De otra parte, en el mundo real, como ya se ha visto, la mayor de los problemas de decisión, sean económicos, industriales, financieros, políticos, técnicos u otros, son **multicriterio**, esto es, los agentes decisores implicados no toman sus decisiones basándose en un único criterio, sino que el proceso decisional está influenciado por una gama de criterios usualmente en conflicto. Por ejemplo, nadie compra un automóvil en base únicamente al precio (criterio financiero), sino que otros criterios como el confort, la calidad, el resultado, el prestigio, etc. son sin duda siempre tenidos en cuenta. Además, no todo el mundo se manifiesta de la misma manera, de hecho, para alguien que mira

diferentes automóviles, su elección está sujeta a sus gustos personales; diferentes personas asignan desiguales conjuntos de pesos o preferencias a los criterios. Este enfoque, conocido como Paradigma Multicriterio, resulta particularmente de interés en el tratamiento de realidades humanas y será el utilizado en la presente tesis doctoral, por lo que se profundizará en él más adelante.

Atendiendo al carácter de los criterios.

También es posible clasificar los problemas de decisión según el carácter cualitativo o cuantitativo que tomen los atributos que definen los criterios, es decir, si se emplea una técnica de decisión normativa o empírica, de acuerdo con lo definido en el apartado 2.2.1.

En consecuencia con ello, existen métodos que emplean solamente criterios **cuantitativos**, otros que sólo trabajan con **cualitativos** y finalmente los que pueden emplear de ambos tipos (**mixtos**). Básicamente pueden definirse como sigue [Simon, 1960; Romero, 1993]:

- Los métodos cuantitativos son aquellos que capturan una realidad estática y objetiva, estudiando las relaciones entre variables cuantificadas, que pueden ser de tipo ordinales, de intervalos lineales o de razón. Sus resultados poseen el carácter de ser generalizables.
- Los métodos cualitativos son aquellos que estudian las relaciones entre variables cualitativas. Otorgan información sobre juicios, actitudes o deseos. Esta puede originarse a partir de encuestas, observación, dinámicas de grupo, entrevistas o técnicas proyectivas. Aportan información sobre aspectos no considerados en los métodos cuantitativos, por lo tanto es complementaria, permitiendo una evaluación integral y holística. Pueden adquirir la capacidad de cuantificación si se les asigna un valor para indicar mayor o menor grado del atributo en el objeto.
- Los métodos mixtos son procesos capaces de recolectar, analizar y vincular datos de tipo cualitativo y cuantitativo. Poseen la ventaja de dar una visión más precisa y adquirir un mayor grado de comprensión del fenómeno en estudio, la

posibilidad de una multiplicidad de observaciones permite un análisis más acabado del problema y una mayor variedad de perspectivas de análisis.

De entre los métodos cuantitativos destacan los que además forman parte del conjunto de técnicas multicriterio, sobre las cuales existe un importante desarrollo, que será analizado en el apartado siguiente, al constituir la base de la metodología propuesta por la presente tesis doctoral, así como los modelos de puntuación, catalogados como modelos mixtos, y que, como más adelante se verá, constituyen el núcleo de las metodologías de toma de decisión en carreteras. Por otro lado, en el caso unicriterio de los métodos cuantitativos aparece como uno de los métodos más usados para la selección y determinación de prioridades de alternativas el empleo de indicadores económicos, que se basan fundamentalmente en el análisis coste-beneficio, de gran tradición en el ámbito de carreteras. Aun cuando este tipo de indicadores es el más recomendable si se desea asegurar una máxima eficiencia en el uso de los recursos, usualmente no se cuenta con información suficiente para un cálculo confiable de ellos. Presentan además la desventaja de excluir todos aquellos criterios que no pueden expresarse en términos monetarios [Azqueta, 1994].

Sin embargo, también existen otros métodos muy conocidos y utilizados en el caso cualitativo, como son las listas de verificación, el modelo de aporte a metas y el *Q-sorting*, en la vertiente unicriterio, y el método Delphi como representante más destacado dentro del grupo multicriterio cualitativo. Se detalla brevemente sobre ellos a continuación [Canter, 1986; Canter and Sadler, 1997]:

- Lista de verificación. Este procedimiento, también llamado de lista de chequeo (*“check list”*), permite juzgar en forma sencilla y rápida si una alternativa cumple o no con los objetivos que se hayan fijado para el proyecto en cuestión, lo cual precisa que estos objetivos estén claramente definidos. Típicamente, las listas de chequeo contienen una serie de puntos, criterios o cuestiones a los que el decisor debe atender y contestar como parte del estudio de toma de decisiones. Su principal ventaja es su sencillez, pero no es posible emplearlo para jerarquizar alternativas, por lo tanto solo sirve para descartar rápidamente aquellas que no cumplen ciertas condiciones mínimas. Suele ser bastante

utilizado en los estudios de impacto ambiental de los proyectos de ingeniería, puesto que las listas representan recordatorios útiles para identificar impactos y proporcionar una base sistemática y reproducible para el proceso de evaluación de impacto ambiental.

- Aporte a metas. Con este enfoque se pretende obtener una estimación del avance porcentual hacia el logro de determinada meta debido a la realización de cada alternativa. Por ejemplo, si la meta es reducir el tiempo de recorrido entre dos poblaciones en 1 hora y una determinada alternativa contempla la construcción de una carretera cuyo tiempo de recorrido hace que se reduzca en 15 minutos, el porcentaje de aporte a la consecución de la meta será de un 25%. Su aplicación práctica resulta casi imposible, ya que rara vez será posible encontrar metas claramente definidas, aparte de que el carácter unicriterio del método lo hace demasiado simplista para los casos que actualmente se presentan en el ámbito de carreteras.
- *Q-sorting*. Este procedimiento de jerarquización de alternativas es un método estadístico que analiza la distribución y la interrelación de valoraciones individuales en la evaluación por un grupo. Combina etapas de trabajo individual con etapas de trabajo en grupo, donde se consulta en forma individual y grupal, en sucesivas ocasiones, la importancia de las alternativas. Así, el puntaje que el criterio obtiene para cada alternativa es el resultado del aporte que hace al objetivo especificado cada una. Suele ser una técnica basada más en análisis subjetivo, por lo que su utilización en proyectos de carreteras es muy escasa y limitada.
- Método Delphi. Este método de comunicación grupal consiste en la realización de una serie de encuestas anónimas a un conjunto seleccionado de expertos con el fin de recoger posibles convergencias de opiniones y consensos, sin que ningún miembro del grupo conozca las respuestas particulares de ninguno de los otros participantes. La esencia de este método es reducir los espacios intercuartiles para precisar la mediana. Se trata de un proceso iterativo, de modo que en cada ronda se transmite la posición general del grupo frente al problema analizado y algunas aportaciones o sugerencias significativas de algún

miembro, y seguidamente los expertos vuelven a emitir su opinión, y así en varias ocasiones hasta que las opiniones se estabilizan. Por tanto, busca el consenso mediante la retroalimentación controlada [Díaz *et al.*, 1999]. Como puede verse, su concepción está basada en el uso de las encuestas estadísticas, de las que como caso particular sobresale la técnica del panel de expertos, que será utilizada en la metodología de esta investigación y por esta razón se profundizará en ella más adelante.

Atendiendo a las situaciones de decisiones.

Ha habido muchos intentos de clasificar los diferentes tipos de situaciones de decisión existentes. Entre todas ellas, una de las más conocidas es la denominada **Taxonomía de Anthony**, quien describe cuatro tipos de situaciones diferentes [Anthony, 1965]:

- Decisiones de Planificación Estratégica. Se trata de decisiones relativas a la elección de políticas y objetivos de alto nivel, y están asociadas a la asignación de recursos.
- Decisiones de Control de la Gestión. Son decisiones que hay que tomar con el propósito de asegurar la efectividad en la adquisición y en el uso de recursos.
- Decisiones de Control Operativo. Se trata de decidir con el objetivo de garantizar la efectividad en la realización de operaciones.
- Decisiones de Realización Operativa. Son decisiones del día a día que hay que tomar mientras se realizan operaciones.

Por otro lado, también pueden clasificarse las decisiones entre estructuradas y no estructuradas, dependiendo de si el proceso de decisión puede escribirse explícitamente antes del momento en si de tomar la decisión. Generalmente, se prefiere preestructurar más las decisiones de realización operativa que las decisiones de planificación estratégica [Simon, 1960].



Figura 2.15: Relaciones entre decisiones. Fuente: [García-Cascales, 2009].

Finalmente, se puede atender a la capacidad del problema de ser tratado de manera sistemática y, por tanto, modelado con ayuda de **herramientas informáticas**. Según esto, pueden darse dos tipos de problemas, que en sí albergan características observadas en las demás clasificaciones [Simon, 1960; Coello, 2004]:

- Programables. Son problemas de decisión que tienen las siguientes características:
 - Son bien definidos.
 - Son rutinarios.
 - Tienen la información adecuada.
 - Existen muchas reglas para seleccionar las alternativas.
 - Las decisiones se pueden tomar a través de una tabla de decisión.
- No programables. Son problemas de decisión que tienen las siguientes características:
 - No son bien definidos.
 - No son rutinarios.
 - No se tiene la información adecuada.
 - No tienen tantas reglas para seleccionar alternativas.

- El criterio usado es de tipo personal, sentido común. Mayormente usado en el proceso de simulación.
- Tienen una extensa base de datos. En muchos casos se hace tedioso el procesamiento de la información.
- Presencia de altos costes.

Según el estado del entorno.

Como se ha dicho, el ambiente o contexto de decisión viene definido por las características y el estado del entorno en el que se va a llevar a cabo la toma de decisión. La teoría clásica de la decisión distingue tres situaciones o **ambientes de decisión** [Luce and Raiffa, 1985; Triantaphyllou, 2000]:

- Decisiones bajo certeza (ambiente de certidumbre). Llamados también *determinísticos*, debido a que son conocidos con exactitud todos los elementos o factores que intervienen en el problema, y por tanto, los resultados o consecuencias establecidos para cada alternativa y estado de la naturaleza, lo que permite asignar valores cuantitativos de utilidad a cada una de las alternativas presentes en el problema.
- Decisiones bajo incertidumbre. En ellos el decisor se enfrenta a situaciones que nunca han ocurrido y que tal vez no vuelvan a repetirse en el futuro. De esta misma forma, no se conocen las probabilidades de ocurrencia de los criterios. La información disponible sobre las distintas alternativas puede ser inexistente, incompleta, vaga o imprecisa, lo que implica que la utilidad asignada a cada alternativa tenga que ser valorada de forma cualitativa. Esta incertidumbre surge a raíz del intento de modelar la imprecisión propia del comportamiento humano o inherente a ciertos fenómenos que por su naturaleza son inciertos (imprecisos o difusos). Se trata, por tanto, del campo de actuación de la lógica difusa, analizada anteriormente, aplicada a las técnicas de decisión, por lo que más adelante se profundizará en los métodos en ambiente de incertidumbre al ser el campo de estudio de esta tesis doctoral.
- Decisiones bajo riesgo: Son aquellos en los que alguno de los elementos o factores que intervienen están sujetos a las leyes del azar y, por tanto, existe un

factor probabilístico de ocurrencia ligado a los mismos. Se conocen las probabilidades objetivas o subjetivas de los estados de la naturaleza, de modo que, en estos casos, los problemas pueden ser resueltos utilizando la teoría de la probabilidad.

Según la naturaleza de las alternativas.

Las características generales de las alternativas permiten realizar otra clasificación, en la cual también es posible observar algunas propiedades del problema de decisión, que según ellas pueden ser [Korhonen *et al.*, 1992]:

- Discreto: el conjunto de alternativas es numerable y finito. En este caso, se pueden presentar las situaciones siguientes como las más comunes:
 - Un número de alternativas elevado, número de criterios pequeño (menor a diez), los valores de los criterios se conocen con certeza y las alternativas se conocen a priori.
 - Como en el anterior pero los valores de los criterios no se conocen con certeza (se modelan siguiendo una distribución de probabilidad).
 - Un pequeño número de alternativas conocidas a priori, evaluadas utilizando un número elevado de criterios y con una estructura jerárquica.
 - El número de alternativas es muy elevado o la generación de las mismas es muy costosa o difícil. Se tiene que tomar dos tipos de decisión: o bien identificar la alternativa preferida o bien determinar si continúa o no la búsqueda de alternativas mejores.
 - El que toma la decisión no es capaz o no está inclinado a especificar explícitamente sus criterios.
- Continuo: el conjunto de alternativas es infinito y no numerable y están definidas en forma implícita, representadas como la recta real. Este tipo de decisiones son habituales en el mundo de la ciencia y la técnica, en el que se busca optimizar el valor de un parámetro técnico. Los casos más estudiados son:
 - El modelo subyacente es lineal, las variables son continuas, el número de criterios es pequeño, el tamaño del problema es de pequeña escala. Las

relaciones entre las variables son cuantitativas y el espacio de decisión se conoce a priori

- Como en el punto anterior con la excepción de que el modelo utiliza funciones de restricción no lineales.
- Como en el primer caso salvo que algunas o todas las variables asumen valores enteros.
- Como en el primer proceso con la excepción de que el modelo es de gran escala.
- Como en el primer inciso con la excepción de alguna o todas las relaciones entre variables son cualitativas.

El tipo utilizado en este trabajo será el discreto, pues es el que se presenta en los problemas de decisión en ingeniería y más concretamente en el caso investigado.

Según las características de la unidad decisora.

Finalmente, otro punto de vista a la hora de clasificar los problemas de decisión hace referencia al **número de expertos** o fuentes de información que toman parte en el problema de decisión [Xu, 2005; Ben-Arieh and Zhifeng, 2006]:

- Unipersonal: si la unidad incluye una sola entidad, física o jurídica, que es la única que valora cada alternativa.
- Grupo: si la unidad está formada por más de una entidad. En este caso el decisor es un conjunto de individuos interesados en el proceso de decisión, de tal forma que tienen que adoptar una solución única que refleje globalmente las opciones o intereses del grupo. Este tipo de unidades son cada vez más frecuentes, pero da lugar a problemas de toma de decisión más complejos que aquellos en los que la toma de decisión se realiza de forma individual. Sin embargo, el hecho de que intervengan varios expertos, con puntos de vista diferentes, puede ofrecer una solución más satisfactoria al problema, por ello, en la actualidad se extiende cada vez más en el ámbito técnico, tanto empresarial como administrativo, la cultura de la *multidisciplinariedad*, es decir, la formación de equipos de trabajo mediante profesionales de diferentes áreas. Este hecho viene

a reforzar la importancia de la consideración de varias entidades den el proceso de toma de decisiones.

2.3. ANÁLISIS MULTICRITERIO.

2.3.1. Introducción.

Como ya se indicó anteriormente, el análisis multicriterio es un método de comprensión y resolución de problemas complejos de toma de decisiones caracterizado por el uso de varios criterios simultáneamente, y se trata de uno de los más usados en el ámbito de carreteras en que se desarrolla la tesis para auxiliar a los centros decisores a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar objetos [Colson and Bruyn, 1989]. Básicamente, permite a los decisores integrar la diversidad de opiniones (aun cuando sean contradictorias, es decir, al disminuir o aumentar alguno de los criterios seguramente otro u otros se verán afectados ya sea positiva o negativamente) relativas a proyectos heterogéneos o conjunto de alternativas, para emitir un juicio comparativo entre ellos, tomando como base diversos criterios y mediante un método que simplifica el problema.

Antes de continuar con el desarrollo de estos conceptos, conviene detenerse en una aclaración, puesto que es importante distinguir este planteamiento multicriterio de **otros enfoques**:

- La Programación Multiobjetivo se usa cuando el centro decisor toma decisiones en una situación de objetivos múltiples. El primer paso dentro de este enfoque consiste en generar el conjunto eficiente. El segundo paso consiste en buscar un compromiso óptimo para el centro decisor de entre las soluciones eficientes. Las soluciones o alternativas que alcanzan esos objetivos suelen ser infinitas y por lo tanto se trata de problemas continuos [Charnes and Cooper, 1961; Lee, 1972; Ignizio, 1976].

Como se ha visto, las técnicas de decisión en general así como las multicriterio en particular tuvieron originariamente sus principales representantes en las escuelas de economía y dirección de empresas, donde el

interés de la toma de decisiones reside fundamentalmente en ayudar a elegir a un decisor, según varios criterios, entre varias acciones. Sin embargo, progresivamente muchas de las técnicas de toma de decisiones se han ido extendiendo a las ciencias y las ingenierías, donde más que la decisión lo que se investiga es la optimización, es decir, se pretende buscar, con rápidos algoritmos, un conjunto de soluciones eficientes, que se englobaría más dentro del enfoque de Optimización Multiobjetivo.

Sin embargo, aunque cuando se habla de Análisis Multicriterio y de Optimización Multiobjetivo está claro que se trata de dos comunidades diferentes, que se comunican entre sí y que tienen competencias distintas, también se evidencia si se examina la literatura que no existe una gran diferencia de fondo entre los métodos de decisión y los métodos de optimización, y los términos Multicriterio y Multiobjetivo se utilizan indistintamente [Keeny and Raiffa, 1993; Preciado, 1997], en especial en el ámbito científico e ingenieril en el que se desarrolla esta tesis.

- La Programación por Metas se usa cuando el centro decisor tiene que tomar decisiones en un contexto de metas múltiples. Este tipo de optimización se aborda por medio de la minimización de las desviaciones en los logros realmente alcanzados y los niveles de aspiración fijados previamente. Con tal propósito se introducen variables de desviación positiva y negativa que permiten tanto el exceso como la falta de logro para cada meta [Charnes and Cooper, 1961; Lee, 1972; Ignizio, 1976; Ignizio, 1978]. También se trata de un problema continuo, que no es objeto de estudio en esta tesis, ya que la investigación se centra en un problema discreto.

Por tanto, haciendo un poco de **historia**, la decisión multicriterio tiene su origen, desde un punto de vista científico, en el campo de la Economía, ligada a los trabajos de los economistas a finales del siglo XIX y principios del XX sobre el comportamiento de los consumidores a la hora de elegir en la compra de un producto, si bien los conceptos de Análisis Multicriterio en la toma de decisiones tienen orígenes más lejanos (en efecto, ya en el siglo XVIII, Borda y Condorcet se interesaron por los procedimientos de decisión colectiva) [Borda, 1781; Condorcet, 1785; Wooldridge, 2009].

La formulación económica apuntada a finales del XIX se basaba en la postulación de que los agentes económicos buscan maximizar sus funciones de utilidad, las cuales expresan la elección del consumidor o del productor. Sin embargo, en 1896 Pareto mostró que en situaciones en las que varios agentes económicos realizan elecciones diferentes y en conflicto, estos no podían obtener su satisfacción máxima al mismo tiempo: siendo los recursos limitados, lo que uno gana lo hace en detrimento de otro (óptimos de Pareto). Ante esta problemática surgieron las técnicas de decisión multicriterio con el objetivo de resolver estas situaciones y hallar el modo de satisfacer, en la medida de lo posible, al mayor número de agentes económicos, intentando buscar un equilibrio entre los intereses contrapuestos de estos [Barba-Romero y Pomerol, 1997; Smith *et al.*, 2000].

Desde entonces, las técnicas de toma de decisión multicriterio, como tal, han sido materia de investigación continua, teniendo un especial desarrollo a partir de los años 1940 y principios de los años 1950, cuando se presentaron varios trabajos fundamentales, entre los que destacan: la teoría de juegos y comportamiento económico de John von Neumann y Oscar Morgenstern de 1944 [Von Neumann, 1944], interpretada más tarde por Luce y Raiffa en 1957 [Luce and Raiffa, 1985]; la teoría de juegos de Nash [Nash, 1950; Nash, 1951]; la teoría de la racionalidad limitada de Simon [Simon, 1954; Simon, 1956]; el teorema sobre procedimientos dictatoriales de Arrow [Arrow, 1951]; y el problema de criterios múltiples en programación lineal abordado por Kuhn y Tucker [Kuhn and Tucker, 1951]. Más adelante, entre finales de los años 1950 y hasta principios de los años 1970, se propusieron numerosos métodos que hoy en día son clásicos, como por ejemplo los ya citados anteriormente: programación por metas propuesta por Charnes-Cooper [Charnes and Cooper, 1961] y los métodos basados en relaciones de superación o dominancia presentados por Benayoun [Benayoun *et al.*, 1966] y Roy [Roy, 1968]. Otra fecha clave en la historia del análisis multicriterio suele situarse en 1972 con motivo de la celebración de la First International Conference on MCDM (Multiple Criteria Decision Making) organizada por Cochrane y Zeleny [Cochrane and Zeleny, 1973] en la Universidad de Carolina del Sur. A partir de esta fecha, en Estados Unidos las discusiones sobre la toma de decisiones multicriterio se centraron sobre la posibilidad de agregar las preferencias del decisor por cada criterio en una única función «suma» de las anteriores. Esta función de

utilidad global se toma como punto de partida del problema de programación matemática multiobjetivo [Keeney and Raiffa, 1993].

A principios de los 90 se pueden ya distinguir claramente tres enfoques distintos en las investigaciones dentro de la ciencia de la Decisión: la vía del realismo, la vía axiomática y la vía del constructivismo [Barba-Romero y Pomerol, 1997]. La primera defiende que existe una realidad cierta independientemente del grado de conocimiento que se tenga de ella y que por tanto la función del investigador es descubrirla, de forma que se supone que, por aplicación de un cierto número de principios de racionalidad, la descripción del sistema de valores de los intervinientes permite inferir sin ambigüedad la manera en que dos acciones cualesquiera se comparan en términos de preferencia; la segunda vía trata de encontrar unos principios fundamentales, llamados axiomas, a partir de los cuales, y una vez aceptados, se pueden extraer unas consecuencias lógicas que conducirán a la verdad; finalmente la vía del constructivismo reduce el problema de la toma de decisión multicriterio a construir una relación de preferencia global sobre el conjunto de alternativas, teniendo en cuenta que pueden existir dudas e *incomparabilidades*, que las preferencias del decisor son a menudo conflictivas y poco estructuradas, y que los datos del problema van cambiando a lo largo del proceso de decisión e influenciadas del hecho mismo de la puesta en marcha del modelo [Roy and Bouyssou, 1993]. Los trabajos que se desarrollan en esta tesis están concebidos dentro de este último enfoque.

En la actualidad, como se ha apuntado, a pesar de su origen en la teoría económica, el Análisis Multicriterio ha trascendido del ámbito académico y se ha extendido al ámbito público y empresarial. Hoy en día estas técnicas se emplean con múltiples y diversas finalidades: localización de empresas, selección de maquinaria o contratistas, predicciones financieras, definición de estrategias empresariales, etc. Igualmente se ha convertido en una importante vía metodológica para la planificación territorial y ambiental [Preciado, 1997], puesto que ofrece la oportunidad de obtener un estudio equilibrado de todas las facetas de los problemas de planificación, particularmente debido a que varios efectos intangibles, como los sociales y las repercusiones ambientales, pueden ser considerados de una manera cabal, aproximándose en gran medida a la realidad [Nijkamp and Delf, 1977]. Además, debido a que muchos de los datos que definen los criterios o las

alternativas no se conocen con certeza, puesto que representan información sobre el futuro, la incorporación de la lógica difusa a estas técnicas de decisión ofrece una herramienta [Goicoechea *et al.*, 2000] que puede ser de gran ayuda para el director de proyectos en la difícil tarea de tomar decisiones. Esta variante será analizada en la última sección de este apartado.

Sin embargo, con estas técnicas no se pretende sustituir al decisor en el proceso de toma de decisiones, sino que este, de forma ordenada, sea capaz de determinar sus preferencias.

En los apartados siguientes se van a exponer los conceptos básicos, fases y principales características del Análisis Multicriterio y se van a presentar algunos de los métodos más conocidos.

2.3.2. Conceptos básicos.

Los métodos de análisis multicriterio, como toda metodología de toma de decisiones, posee los elementos típicos de todas ellas, por lo que se van a destacar aquí los conceptos básicos que los definen y diferencias de las demás metodologías. Así, los métodos de análisis multicriterio toman como punto de partida dos tipos de **datos básicos**, los cuales habrán de ser o bien proporcionados al decisor, o bien estimados o extraídos directamente por el mismo [Barba-Romero y Pomerol, 1997]:

- De una parte, una enumeración de alternativas (soluciones, proyectos, acciones...) en consideración por parte del decisor, que formarán un conjunto de elementos disjuntos y exhaustivos, es decir, no cabe concebir alternativas «intermedias» a las enumeradas, como ya se dijo. Se mantendrá la notación de A_i ($i=1, \dots, m$) para el conjunto de alternativas posibles, que conforman un conjunto discreto y universal a nuestros efectos.
- De otra parte, los criterios, que constituyen los parámetros o puntos de referencia que se utilizan para describir las cualidades de las alternativas sobre

las cuales se basará la decisión. Al igual que el anterior, se mantiene la notación de C_j ($j=1, \dots, n$) para los n criterios, los cuales constituyen un conjunto discreto, aunque no necesariamente sus elementos son independientes entre sí, sino que puede admitirse cierto solapamiento y/o subordinación entre ellos según un determinado sistema de jerarquía definido previamente.

Después de identificadas las alternativas y los criterios a utilizar, solo resta estructurar adecuadamente la información que les relaciona y define. Para ello, se cuenta con [Barba-Romero y Pomerol, 1997]:

- Por un lado, las evaluaciones r_{ij} de cada alternativa A_i respecto de cada criterio C_j , constituyendo la matriz de decisión, cuyos elementos describen cada alternativa considerada en función de los criterios. La evaluación o juicio r_{ij} puede ser de tipo numérico o lingüístico.
- Y, por otro lado, los pesos w_j , que son las medidas que establecen la importancia relativa que tienen para el decisor los criterios entre sí. Los pesos se denotan a través de un vector de la forma $W = (w_1, w_2, \dots, w_n) = (w_j)$, $j = 1, 2, \dots, n$, donde n representa la cantidad de criterios, puesto que se asocia al criterio C_j el peso w_j .

El problema general del análisis multicriterio, independientemente de la forma concreta en que se midan los r_{ij} y los w_j , es el de seleccionar aquella alternativa que «mejor» satisfaga las preferencias del decisor. Precisamente la manera en que se interprete o se busque dicha «mejor» alternativa permite diferenciar entre los enfoques y métodos propuestos para el análisis multicriterio [García-Cascales, 2009].

Dos aspectos importantes deben tenerse en cuenta en relación a la **medida de las evaluaciones** r_{ij} o forma en que son presentadas, aparte de los problemas que puedan existir para ser conseguidas y que deberán ser objeto de estudio para cada caso concreto [Barba-Romero y Pomerol, 1997]:

- En primer lugar, la escala utilizada para las medidas de estas evaluaciones. Así, se cuenta, de mayor a menor precisión, con medidas según la clasificación tradicional del tipo cardinal racional, cardinal intervalo, ordinal y nominal, así

como del tipo difuso antes estudiado. Ello permite diferenciar, como ya se apuntó antes, entre los métodos cuantitativos (que disponen de información cardinal) y cualitativos (el resto).

- En segundo lugar, aunque por supuesto relacionado con lo anterior, las evaluaciones de las alternativas en función de cada criterio deben ser comparables también en términos de magnitud, unidad de medida, posición del cero, dispersión de la medida, etc. Es decir, se presenta aquí al problema de que las evaluaciones deben estar normalizadas entre sí, es decir, que las evaluaciones r_{ij} de cada alternativa A_i correspondientes a un cierto criterio C_j sean comparables con las correspondientes a otros criterios. Se profundiza a continuación en este aspecto.

Algunas circunstancias que justifican la aplicación de **normalización** son las siguientes [Togerson, 1958; Barba-Romero y Pomerol, 1997]:

- En la mayoría de los casos dentro de los problemas decisorios surgen distintos tipos de unidades en los diferentes criterios considerados, por ejemplo, unidades de distancia, de tiempo, de tipo financieras, etc. por lo que no tendría sentido una comparación o cualquier operación entre esas unidades de diferente naturaleza.
- En algunos casos los valores que toman los criterios (dado que pueden ser de distinta índole) pueden ser muy diferentes entre sí; por ejemplo, un criterio puede estar a una escala muy elevada en comparación con el resto, lo que podría ocasionar un sesgo de la solución a las alternativas que tienen dicho criterio elevado.
- Permiten al decisor realizar con mayor facilidad la tarea de asignación de pesos (que se trata a continuación), pues para las personas es más fácil comparar atributos cuando sus valores de medición han sido normalizados en lugar de compararlos utilizando sus valores originales.

2. HERRAMIENTAS Y MARCO DE TRABAJO

Para ello existen diferentes métodos de normalización, siendo los más utilizados los que se presentan en el tabla 2.2, que generalmente optan por transformar las mediciones a valores entre 0 y 1.

Tabla 2.2. Resumen de los principales procedimientos de normalización. Fuente: adaptada de [Barba-Romero y Pomerol, 1997] y [García Cascales, 2009].

| | Procedimiento 1 | Procedimiento 2 | Procedimiento 3 | Procedimiento 4 |
|---------------------------------------|--|---|---|---|
| Tipo | Normalización vector | Normalización lineal | Normalización lineal | Normalización lineal |
| Definición | $r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$ | $r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}$ | $r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{ij}^{\max}}$ Criterio de beneficio | $r_{ij} = \frac{x_{ij}^{\max} - x_{ij}}{x_{ij}^{\max} - x_{ij}^{\min}}$ Criterio de beneficio |
| | | | $r_{ij} = \frac{x_{ij}^{\min}}{x_{ij}}$ Criterio de coste | $r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij}^{\min}}{x_{ij}^{\max} - x_{ij}^{\min}}$ Criterio de coste |
| Rango | $0 < r_{ij} < 1$ | $0 < r_{ij} < 1$ | $0 < r_{ij} \leq 1$ | $0 \leq r_{ij} < 1$ |
| ¿Conserva la proporcionalidad? | SÍ | SÍ | SÍ | NO |
| Interpretación | i-ésima componente del vector unitario | % del total | % del máximo | % del rango |
| | | | % del mínimo | |

Se supone que todas las evaluaciones $r_{ij} \geq 0$, para todo i . En casos de valores negativos de las r_{ij} pueden construirse los algoritmos de forma análoga.

Así, el procedimiento 1, que aun cuando no tiene un significado muy intuitivo para un decisor poco matemáticamente inclinado, ofrece la importante ventaja de permitir plenamente las comparaciones adimensionales de los vectores criterio del problema, pero es el que menor utilización práctica presenta. El procedimiento 2, que será el que se utilizará en esta investigación por ser el empleado para la técnica de las jerarquías analíticas, ofrece como principales ventajas su intuitiva interpretación y el hecho de mantener la proporcionalidad (es decir, que $r_{ij} / r_{kl} = x_{ij} / x_{kl}$, para todo i, j, k, l). El siguiente procedimiento, el 3, tiene casi las mismas ventajas que el procedimiento 2, aun cuando «extiende» los resultados normalizados hacia valores más grandes. El procedimiento 4, por último, perfecciona al anterior a fin de que la escala normalizada cubra exactamente el

intervalo $[0, 1]$, representando el porcentaje del rango, pero el precio es el de no conservar la proporcionalidad sino que más bien la invierte, por lo que también se deberá invertir el proceso de decisión.

En relación a los pesos, se genera otro gran paradigma del análisis multicriterio como es el de la necesidad de su propia definición o estimación [Barba-Romero y Pomerol, 1997]. La ponderación es tan importante en estas técnicas que conforman el núcleo de cada una, de ahí que sea tratada en mayor profundidad en el siguiente apartado.

2.3.3. Ponderación de criterios.

No cabe duda de la importancia que juegan los valores concretos de los pesos w_j como cuantificación de la estructura de preferencias del decisor debido a que normalmente, para el decisor, los criterios no tienen la misma relevancia, es decir, para él existen preferencias por unos criterios con respecto a otros, y para que el modelo del problema represente mejor la realidad, es preciso contar con una medida del peso de esa relevancia [Smith *et al.*, 2000]. Pero esta información debe ser «extraída» del mismo por algún procedimiento, y ahí radica precisamente el problema, puesto que los condicionantes y las inercias psicológicas del ser humano producen sesgos y contradicciones peligrosas [Shepard, 1964; Tversky, 1977; Vansnick, 1986; Cross, 1994; Barba-Romero y Pomerol, 1997; Saaty, 1980].

De hecho, la asignación de pesos de tal manera que ellos representen adecuadamente la estructura de preferencias del decisor ha sido fuente de incertidumbre y de muchas consideraciones en la literatura anteriormente reseñada, donde han sido propuestos variados procedimientos, los cuales caracterizan igualmente a los diferentes tipos de métodos de análisis multicriterio, al estar ligados fuertemente a este parámetro. De hecho, aparte de aquellos métodos cuyo objetivo es únicamente la ponderación de variables o asignación de pesos, otros muchos se emplean en combinación con otras herramientas de decisión, en determinadas etapas de su metodología [Korhonen *et al.*, 1992; Alarcón, 2006; Haghghat, 2011].

La mayoría de estos procedimientos están enfocados en tratar de representar lo más fielmente posible la estructura de preferencias del decisor. Esta no siempre es conocida, debido a la racionalidad limitada del decisor [Smith *et al.*, 2000]. De hecho, se han estudiado aspectos tanto teóricos como prácticos del problema: por ejemplo, la forma cómo se le piden los pesos al decisor, su interpretación, la influencia o relevancia de estos dentro de las respuestas de los métodos, la forma de agregación de varios conjuntos de pesos, etc. [Salo and Hämäläinen, 1997; Pöyhönen and Hämäläinen, 2001]. De hecho, se ha demostrado que el método de asignación de pesos influye fuertemente en la respuesta final que se obtenga del problema [Schoemaker and Waid, 1982].

Los métodos de ponderación de variables se pueden clasificar en métodos de asignación directa y métodos de asignación indirecta [Flament, 1999].

Así, comenzando con los llamados **métodos de asignación directa**, son aquellos en los que el decisor asigna directamente los pesos a los objetivos utilizando generalmente su juicio, lo que le da cierta subjetividad al método. Fueron los primeros en ser desarrollados, de entre los que se pueden citar los siguientes [Barba-Romero y Pomerol, 1997]:

- El método de ordenación simple (ranking) de Kendall es un procedimiento que requiere que el decisor efectúe una ordenación cualitativa de los criterios del más importante al menos importante, para posteriormente otorgarle un número según el orden ascendente, de manera que el uno es el más importante, el dos el siguiente y así sucesivamente (en caso de empate el valor asignado es el promedio) [Kendall, 1970]. A continuación, se calculan los pesos a cada uno de los criterios dividiendo cada asignación, según posición en el ranking creado anteriormente, por la suma de los n criterios. Son métodos muy simples de utilizar, pero quedan bastante limitados por la cantidad de criterios empleados en la evaluación. Han sido muy criticados por la falta de un fundamento teórico en la otorgación de las ponderaciones, ya que para dos problemas totalmente distintos con el mismo número de criterios, estos tendrán la misma importancia según la posición que ocupen en las respectivas lista de clasificación de su respectivo problema. Por ello, son utilizados como técnicas aproximativas.

- El método de asignación probabilística de Rietveld, por su parte, partiendo del ordenamiento cualitativo de los criterios y asumiendo una distribución uniforme de probabilidad para los pesos de los mismos w_j , fija una cota superior para cada peso, y le asocia según el ordenamiento anterior intervalos de valor a cada objetivo de acuerdo con su importancia (a mayor importancia, mayor intervalo de asociación) [Rietveld, 1984].
- El método de tasación simple de von Winterfeldt y Edwards requiere de una valoración numérica del peso en cierta escala de medida (0 a 100 por ejemplo) según la cual el decisor reparte a cada criterio el valor que estima oportuno, siendo un cero para los atributos que queden ignorados y un 100 para el criterio único de mayor importancia, y después de que se han asignado todos los valores, estos se normalizan. Esta técnica también ha sido bastante criticada por la falta de fundamento teórico, ya que los pesos asignados pueden ser de difícil justificación. Una variación de este consiste en pedirle al decisor que evalúe la importancia relativa de los criterios con relación al criterio considerado como el menos importante de todos. Luego, respetando tales relaciones de proporcionalidad y forzando a que la suma de los pesos sea igual a la unidad, se obtienen los pesos cardinales de los objetivos del problema [Winterfeldt and Edwards, 1986].
- El método de comparaciones sucesivas o de las utilidades relativas de Churchman, posteriormente analizado y mejorado por Eckenrode, Knoll y Solymosi fundamentalmente, requiere por parte del decisor de la ordenación de los criterios, la estimación provisional de los pesos de los criterios en una escala cardinal, la comparación sistemática de cada criterio con los demás, y la comprobación y modificación de dichos valores en el sentido de mejorar su consistencia interna. Este método corrige las inconsistencias de valoración que se pueden presentar en el procedimiento de tasación simple [Churchman *et al.*, 1957; Eckenrode, 1965; Knoll and Engelberg, 1978; Solymosi and Dombi, 1986].
- Finalmente, existen diversos procedimientos utilizados en el contexto de los modelos de utilidad multiatributo (UMA), de los cuales el llamado

procedimiento del valor medio (*midvalue*) es uno de los más utilizados [Fishburn, 1970; Keeny and Raiffa, 1993].

Otra vía completamente distinta es la basada en el concepto de **entropía** [Zeleny, 1974]. La idea esencial de este método, denominado también método «objetivo», es que la importancia relativa del criterio C_j (a medir por el peso w_j) en una situación dada de decisión (reflejada en su matriz de decisión), está directamente relacionada con la información intrínseca promedio generada por el conjunto de alternativas respecto a dicho criterio, y asimismo por la asignación subjetiva de la importancia que el decisor le otorgue según sus preferencias. Toma importancia en problemas de decisión que presentan conflictos de intereses y en los que se busca la neutralidad ante los criterios, ya que sus pesos se determinan en función de las evaluaciones normalizadas de la matriz de decisión, sin que influyan las preferencias del decisor [Zeleny, 1982]. La forma operativa de cuantificar todo esto es utilizando el concepto de entropía de Shannon aplicado al vector de evaluaciones de cada criterio como medida inversa de la importancia que a este criterio dichos datos atribuyen, combinado con unos pesos subjetivos dados a priori por el decisor [Shannon, 1949]. Es decir, que mientras mayor diversidad haya en las evaluaciones de las alternativas, mayor relevancia tendrá dicho criterio en la evaluación final, ya que tiene mayor capacidad de discriminación entre el resto de alternativas. A pesar de su elegancia teórica no es un procedimiento que parezca utilizarse mucho.

Y un conjunto importante y amplio de técnicas de estimación de pesos se agrupan en los denominados procedimientos por aproximación o de **asignación indirecta**. Representante significado de los mismos es el método de las jerarquías analíticas (AHP, *Analytic Hierarchy Process*) de Saaty [Saaty, 1977; Saaty, 1980; Saaty, 1985], que aparte de constituir una metodología estructurada de toma de decisión, es muy utilizado solo como técnica de ponderación, como es el caso de la presente tesis, por lo que se profundizará en él en el siguiente apartado. Básicamente, este método consiste en construir una matriz cuadrada de comparaciones entre criterios ($n \times n$), en donde cada entrada de la matriz representa cuantas veces es más importante el criterio de la fila respecto al criterio de la columna. A partir de ella se calcula el autovector asociado al autovalor dominante de dicha matriz, el cual constituye el conjunto de pesos del problema de decisión [Barba-Romero y Pomerol, 1997; García-Cascales, 2009]. Este procedimiento es llamado por

aproximación puesto que, en la práctica el decisor cometerá ciertas inconsistencias al estimar las comparaciones pareadas de importancia de criterios, por lo que la determinación del vector de pesos no será completamente exacto, de ahí que sea necesario, como más adelante se verá, analizar la consistencia del proceso, de forma que la certeza del resultado sea más o menos aproximada [Watson and Freeling, 1982; Belton and Gear, 1983].

Otros representantes de la familia de procedimientos de aproximación son los llamados de *eigenpesos*, parecidos al de Saaty con ciertas variantes que permiten un cálculo más simplificado, como el de Srinivasan y Shocker [Srinivasan and Shocker, 1973], los formulados por Pekelman y Sen [Pekelman and Sen, 1974] o el de Cogger y Yu [Cogger and Yu, 1985], teóricamente muy cercano a otro procedimiento clásico, aunque no muy utilizado, de estimación de pesos denominado de Aproximación por Distancia Cuadrática Mínima [Chu *et al.*, 1979], que también conduce a un problema de programación lineal fácilmente resoluble. Como se ha dicho, estos procedimientos de estimación de pesos forman parte de métodos de análisis multicriterio completos que necesitan para alcanzar un grado aceptable de exactitud que se efectúen todas o casi todas las posibles comparaciones binarias de alternativas, lo que los hace impracticables para valores de m no muy grandes. Por ello surgieron métodos interactivos que solo necesitan un subconjunto de tales comparaciones de alternativas [Zionts, 1981; Korhonen, 1984; Korhonen, 1986] o de ordenaciones de alternativas [Jacquet-Lagrange and Siskos, 1982].

Posteriormente se desarrollaron otros procedimientos caracterizados por exigir lo mínimo posible al decisor, y que son llamados procedimientos cualitativos ya que, generalmente, solo le plantean a aquel cuestiones de tipo ordinal («¿cuántas veces es más importante?»). Ejemplos son el de Solymosi [Solymosi and Dombi, 1986] o el QUALIFLEX de Paelinck [Paelink, 1978].

La selección de una técnica u otra para la estimación de los pesos de los criterios, dependerá del tipo de problema que se tenga, y del resultado que el centro decisor quiera obtener. Si por un lado se quiere una facilidad en el uso, y no se busca tanto la exactitud, se deberá recurrir a técnicas como la clasificación o la valoración. Mientras que, por el

contrario, se busca exactitud y el fundamento teórico lo más apropiado es acudir a técnicas como la comparación por pares.

Por tanto, y como más adelante se verá, se seleccionará para esta tesis doctoral un método de este último tipo, concretamente, el proceso analítico jerárquico (AHP), pero en este caso particular, aplicado sobre juicios emitidos por expertos, es decir, en la fase de ponderación de criterios en relación no intervendrá un único decisor, sino que será un grupo de expertos que apoyan el proceso de decisión [Hwang and Yoon, 1981; Chen and Hwang, 1982; Keeny and Raiffa, 1993; Triantaphyllou, 2000]. En este proceso, además, cobrará especial importancia la agregación de las preferencias de los expertos.

2.3.4. Fases.

El proceso de toma de decisión se divide generalmente en tres partes y se plasma en la figura 2.16, en la que es fácil comprobar que no es sino una adaptación del esquema general de un problema de toma de decisión presentado en el apartado 2.2.1.

Así, las fases de una toma de decisión son las que seguidamente se detallan [Simon, 1960; Romero, 1993; Romero, 1996; Martín-Ramos, 2003; García-Cascales, 2009]:

1. **Estructuración del problema de decisión.** Es parte del proceso de toma de decisión que comprende los siguientes componentes:

- **Definición del problema:** Es el paso inicial para la toma de decisión; sin un problema bien definido, no hay objetivo definido y no hay una solución veraz.
- **Identificación de alternativas:** es la detección de la cantidad de opciones que tiene el decisor para efectuar la toma de decisión. Se deben plantear aquellas soluciones factibles y eficientes; es decir, el conjunto de soluciones posibles se divide en dos subconjuntos disjuntos: el subconjunto de soluciones factibles no eficientes y el subconjunto de soluciones factibles eficientes. Una vez alcanzada la partición, serán solo estas últimas las que se contemplen en el proceso.

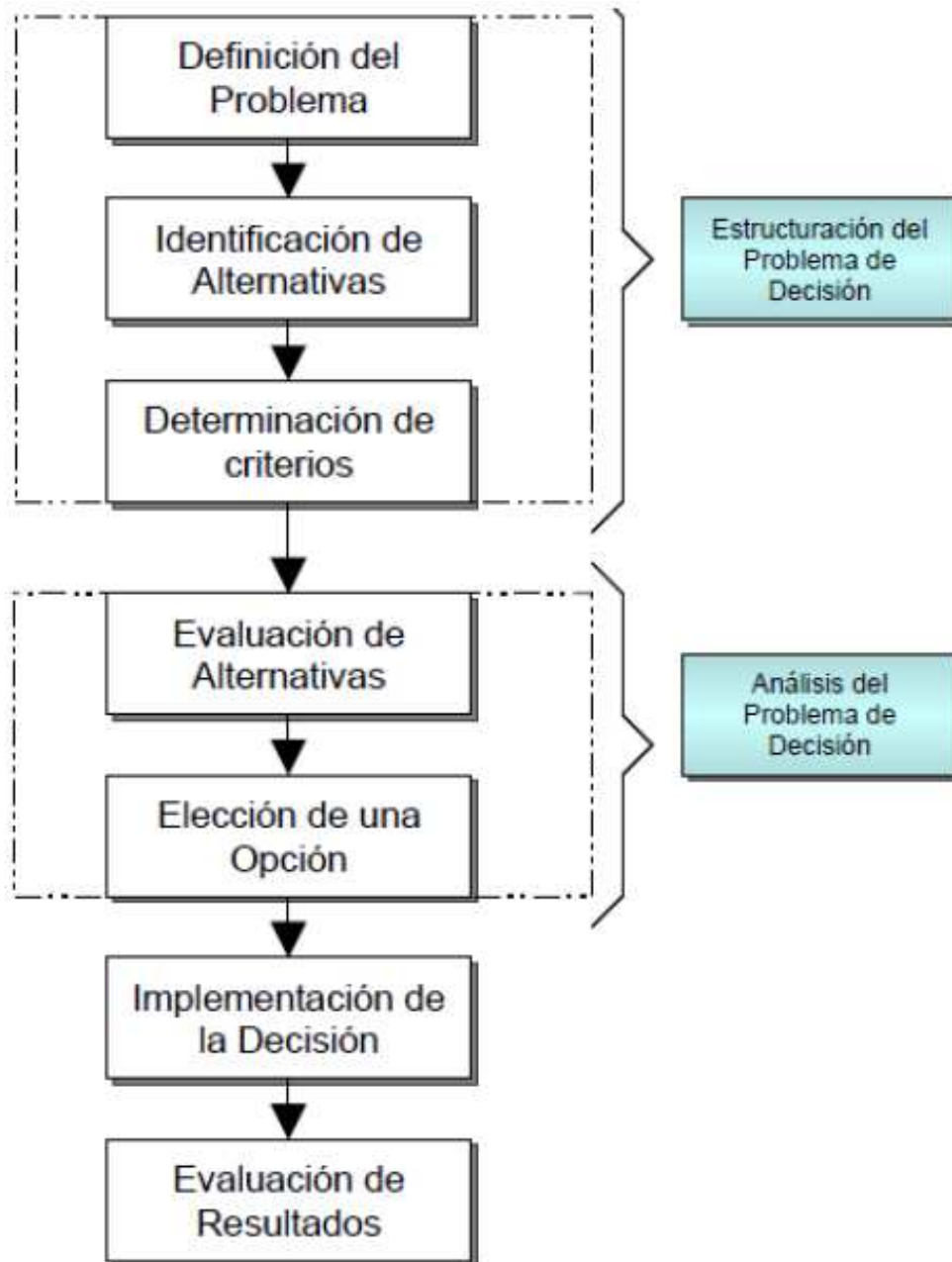


Figura 2.16. Representación de las fases de un proceso de decisión multicriterio. Fuente: [García-Cascales, 2009].

- Determinación de criterios: corresponde a las características más relevantes que los decisores han considerado para luego evaluar en función de ellos qué alternativa resulta más conveniente. Para ello, deben seleccionarse mediante las correspondientes variables o funciones y deben cumplir con las propiedades de comprensibilidad y *medibilidad*, es decir, sus valores han de ser adecuados para expresar el criterio y es posible asociarlos a los distintos niveles una escala

conocida. En la mayor parte de problemas de decisión multicriterio es difícil establecer estos criterios de decisión, no obstante su determinación resulta un paso esencial del proceso, ya que un planteamiento inadecuado puede llevar a resultados no satisfactorios o invalidar el proceso.

Una decisión importante en esta fase es el tipo y carácter de los criterios, distinguiendo especialmente entre las variables cualitativas y cuantitativas y su modo de representación correspondiente. En el caso de que sea *crisp*, habría que especificar el universo de donde toma valores y en el caso de que sea difuso, hay que especificar la variable lingüística de la que tomará valores. Igualmente, es esencial definir el objetivo de cada criterio, especificando si se busca maximizar o minimizar. También es habitual establecer una jerarquía de criterios, lo cual consiste en especificar los objetivos fundamentales de alto nivel que el decisor pretende alcanzar y los objetivos más concretos y detallados de bajo nivel, cuidando no caer en la excesiva proliferación de jerarquías en sentido horizontal y vertical.

2. Análisis del problema de decisión. Es la parte del proceso de toma de decisión consecuente con la estructuración del problema de decisión, que comprende los siguientes componentes:

- Evaluación de alternativas. Definidas las acciones y criterios que intervienen en el proceso de toma de decisiones, se debe a continuación obtener una serie de evaluaciones para cada acción [Roy and Bouyssou, 1993] según cada uno de los criterios establecidos, generando la matriz de decisión. Depende del método de evaluación utilizado en cada caso, pero debe seguir las siguientes etapas:
 - Normalización de las evaluaciones. Como se vio en el apartado anterior, para que las evaluaciones según cada criterio puedan ser comparables entre sí, y seguidamente ponderadas de manera coherente, precisan ser normalizadas, según alguno de los procedimientos presentados. Esta necesidad es básica debido a que en la mayor parte de decisiones las unidades en que están medidos los distintos criterios suelen ser muy diferentes entre sí, los valores alcanzables por los criterios existentes pueden

variar mucho, y además la normalización facilita la interacción con el centro decisor [Romero, 1996].

- Asignación de Pesos o ponderación de los criterios. Determinar la importancia relativa de cada criterio de selección en el proceso de elección de la mejor o mejores alternativas de ejecución del proyecto.
- Elección del método de análisis multicriterio de entre el conjunto de metodologías disponibles.
- Obtención de Parámetros. Determinación, según el método escogido, de los parámetros necesarios para su aplicación. Estos parámetros deben ser proporcionados por el que tomará la decisión.
- Elección de una opción. Una vez aplicado el método de decisión multicriterio sobre la evaluación de las alternativas, se obtendrá la información necesaria para escoger la mejor, las mejores o una ordenación del conjunto de alternativas. Esta etapa comprende la denominada agregación de las evaluaciones realizadas, es decir, se trata ahora de saber en qué se basa para poder decir que una acción *b* es al menos tan buena como otra *a* teniendo en cuenta, no ya un único criterio, sino todos los criterios. Es por tanto, el núcleo que caracteriza al método de análisis multicriterio [Roy and Bouyssou, 1993].

3. **Proceso de Estudio y Análisis.** El decisor analiza la ayuda que proporciona los métodos de decisión, y puede elegir entre [Romero, 1993; Romero, 1996; García-Cascales, 2009]:

- Escoger una alternativa determinada, implementarla y evaluar sus resultados una vez ejecutada.
- Modificar los parámetros y pesos, para obtener más ayuda al problema de decisión.
- Modificar los criterios de selección.
- Escoger otro método de decisión multicriterio.
- Empezar por completo determinando los criterios de selección.

2.3.5. Ventajas e inconvenientes.

Entre las principales **ventajas** de la utilización de los métodos de análisis multicriterio se pueden destacar las siguientes [Romero, 1996; Barba-Romero y Pomerol, 1997; Aruldoss *et al.*, 2013; Oltean-Dumbrava *et al.*, 2013]:

- Encontrar una solución en situaciones complejas. La principal ventaja del análisis multicriterio es su utilidad para simplificar situaciones complejas. Efectivamente, se ha comprobado que, más allá de determinados criterios, la mayoría de los decisores no son capaces de integrar la totalidad de la información en su valoración. Descomponiendo y estructurando el estudio, el análisis multicriterio permite avanzar paso a paso hacia la búsqueda de una solución, con toda transparencia.
- Un método comprensible. Aunque las herramientas matemáticas empleadas para tratar la información puedan ser complejas, las bases sobre las que se realiza la selección de los criterios y la puntuación de los resultados son a menudo sencillas, comprensibles y determinadas por el grupo que conduce el análisis. Gracias a ello, los actores implicados pueden seguir con claridad el proceso y las selecciones realizadas.
- Un método racional. Gracias al estudio homogéneo y simultáneo de un gran número de factores, este método permite también una valoración estable de los diferentes elementos incluidos en el análisis. En este sentido, racionaliza el proceso que conduce a las decisiones.
- Una herramienta de negociación útil en discusiones complejas. Dadas sus ventajas, el análisis multicriterio se ha convertido en un instrumento muy utilizado en la resolución de problemas complejos y en contextos conflictivos, como por ejemplo el de la ordenación territorial. La claridad del método contribuye a relajar el debate y a aumentar y desarrollar la comunicación entre los actores. Es, pues, una herramienta de negociación de gran utilidad en las discusiones entre los usuarios.
- El realismo y la legibilidad. Se trata de activos importantes en las organizaciones, en un momento en el que la complejidad de las decisiones es

reconocida por la mayor parte de los actores, aun cuando no todos ellos muestren la misma sensibilidad ante los diferentes criterios. Ya se ha expresado que toda decisión, incluso individual, es un compromiso entre diversas aspiraciones difíciles de satisfacer en toda su plenitud.

Por otro lado, entre sus principales **limitaciones** se encuentran [Carlsson and Fuller, 1995; Barba-Romero y Pomerol, 1997; Aruldoss *et al.*, 2013; Oltean-Dumbrava *et al.*, 2013]:

- Condiciones previas. Un requisito previo para la realización del análisis es la existencia de un mínimo de puntos de acuerdo entre los actores. Así, por ejemplo, el análisis multicriterio de los objetivos operativos de un programa solo puede llevarse a cabo si los actores coinciden en su objetivo global y, si es posible, en su objetivo específico.
- Dificultad de las discusiones. Seleccionar las acciones o alternativas que deben estudiarse, para definir los criterios de comparación y elaborar las tablas de puntuación, puede ser un proceso muy tedioso. En ocasiones, los procesos para resolver estos puntos, esenciales para el éxito del ejercicio, pueden ser largos y complicados.
- Excesiva cantidad de información que se le exige al decisor. Ello provoca en él desgaste y en algunas ocasiones su eventual contradicción.
- Disponibilidad de los datos. Relacionado con la anterior, en determinadas situaciones, la falta de datos fiables en el plazo necesario para establecer y validar los métodos puede suponer un problema.
- Dificultad en la ponderación de los criterios. El tener que expresar las preferencias de decisión de forma numérica o, en aquellos casos, de forma cualitativa, puede resultar complicado si el decisor no tiene clara dicha valoración. Además, en su mayoría, para realizar la valoración de sus pesos, decisores y metodologías consideran los criterios como independientes entre sí, lo cual no siempre es cierto, ya que en muchas ocasiones existen interrelaciones entre criterios que hacen que el mejoramiento o empeoramiento de uno concreto contribuya al mejoramiento o empeoramiento de otros respectivamente.

- Factor tiempo. La duración de la ejecución del análisis (y su coste) es a menudo el factor que más limita una evaluación. Los análisis multicriterio suelen basarse en procesos prolongados e iterativos, que pueden requerir un importante y largo período de negociación. En el contexto de la evaluación, el factor tiempo en este tipo de análisis puede constituir un límite.
- Tecnicidad del método. Es evidente que este tipo de análisis conlleva cierto grado de tecnicidad. Los conceptos y métodos matemáticos de agregación de datos requieren la cualificación adecuada; de lo contrario, se puede dirigir el análisis de forma confusa y llegarse a conclusiones erróneas.
- Dimensión subjetiva del análisis. Aunque, sin lugar a dudas, el análisis multicriterio racionaliza el enfoque de problemas complejos, incluyendo datos objetivos y subjetivos, es cierto que puede ser considerado, por sus detractores, como un método subjetivo. De hecho, por ejemplo, para un mismo decisor, las estimaciones de los pesos únicamente por métodos directos varían según el momento en el que se interroge el decisor [Barba-Romero y Pomerol, 1997]. También se ha demostrado que esta valoración cambia de acuerdo con las alternativas que el decisor conoce previamente del problema, es decir, que indirectamente, este está escogiendo de forma sesgada la solución del problema.

Como puede verse, muchas de las limitaciones de los métodos de análisis multicriterio estriban en la subjetividad de la ponderación de los criterios utilizados en los mismos. Por ello, se considera necesario contar con una metodología de ayuda para la asignación de los pesos de importancia relativa de los criterios de un problema de toma de decisiones multicriterio discreto que combine de igual forma las preferencias de decisión con las bondades mismas de la información del problema. Con base en esto, se propone en esta tesis doctoral una metodología que permite minimizar estos problemas y facilitar una toma de decisiones más objetiva y racional, a la par que clara y sencilla.

Por ello, se tratan a continuación los distintos métodos de análisis multicriterio existentes en la bibliografía, con la intención de seleccionar entre ellos aquellos que resulten más adecuados a los objetivos de esta investigación.

2.3.6. Principales métodos.

Partiendo de la clasificación realizada en el apartado al respecto de las principales técnicas de toma de decisión, se procede ahora a establecer las diferentes tipologías para el caso de los métodos de análisis multicriterio en general, de entre las cuales se destacarán las más utilizadas en el ámbito de carreteras así como aquellos métodos que en capítulos posteriores serán objeto de mayor desarrollo al tratarse de las técnicas utilizadas para el desarrollo de esta investigación.

Como ya se ha dicho, el análisis multicriterio es una área de mucho desarrollo en investigación tanto tradicionalmente como hoy en día, de tal manera que muchos son los métodos disponibles y presentan diferencias tanto en las características de los modelos desarrollados como en las características del proceso de desarrollo de los mismos [Shärling, 1985; Doumpos and Zopounidis, 2002; Jankowski, 2005].

De esta manera, los métodos de análisis multicriterio se pueden clasificar atendiendo a los diferentes elementos que conforman todo problema de decisión, es decir, según el tipo de evaluación, los datos a manejar, las características de los objetivos, el punto de vista del centro decisor, etc. [Kohornen *et al.*, 1992; Gómez Delgado y Barredo Cano, 2005]. De hecho, una primera clasificación se puede establecer **según la naturaleza de las alternativas** (véase apartado 2.2.3.5), diferenciando entre metodologías continuas y discretas [Alarcón, 2006]:

- Continuas: si el conjunto de alternativas es infinito, se suelen aplicar aproximaciones basadas en optimización, en la que se supone que los distintos criterios pueden ser expresados en un denominador común mediante intercambios. En esta tipología existe una gran gama de métodos «clásicos», como factores ponderantes [Zadeh, 1963], método de las restricciones [Haimes *et al.*, 1971], programación por compromiso [Zeleny, 1973] con diferentes métricas y programación por metas [Charnes and Cooper, 1963], entre otros.
- Discretas: para un número finito y numerable de alternativas (normalmente no muy elevado y que además se conocen explícitamente) se suelen denominar también técnicas de decisiones con multiatributos [Barba-Romero y Pomerol,

1997]. Por sus características, existe una gran cantidad de problemas del ámbito de la ingeniería civil, y más concretamente en relación a las carreteras, que pueden ser representados por medio de una estructura de análisis de decisión multicriterio de tipo discreto, ya que habitualmente en ellos el decisor debe elegir, a través de una evaluación, de entre un grupo finito y generalmente reducido de alternativas. Por esta razón, serán los que se presenten a continuación y de entre los que se seleccionará para su aplicación en la metodología.

Otra clasificación clásica de las técnicas de decisión multicriterio es la propuesta en [Korhonen *et al.*, 1992], **en función de la información de que se disponga:**

- Se dispone de información completa sobre las preferencias del decisor. Este es el enfoque clásico adoptado por la teoría de utilidad multiatributo (MAUT, *Multi-Attribute Utility Theory*) de inspiración norteamericana, en la que se profundizará más adelante. Es decir, se tiene la información completa sobre las preferencias del decisor sobre un conjunto de alternativas y, entonces se asume la existencia de una función de valor global que agrega las funciones de valor de cada uno de los criterios. En el caso de que el conjunto de alternativas sea discreto, el problema consiste en construir la función de valor que refleje las preferencias del decisor y que integre los criterios. Si existe incertidumbre, hay que construir una función de utilidad, previa asignación de las funciones de probabilidad correspondientes. En el caso de que el conjunto de alternativas sea continuo, existen varios algoritmos que resuelven el problema de optimización, y se reduce a un problema de programación matemática.
- Se dispone de información nula sobre las preferencias del decisor. Este es el enfoque clásico adoptado por la programación matemática y se utiliza cuando no se tiene la información suficiente sobre las preferencias del decisor para construir una función de valor. Bajo este planteamiento surgen diversos tipos de problemas y distintos enfoques para solucionarlos, no obstante el propósito final es ayudar al decisor a encontrar la mejor solución. La resolución de este problema implica obtener un punto óptimo que sea máximo respecto a cada uno de los criterios, que se define como punto ideal. Debido al conflicto de

objetivos y la limitación de recursos, la existencia de dicho punto es muy rara en los problemas reales, por lo que se introduce el concepto de solución eficiente o Pareto óptima.

- Se dispone de información parcial sobre las preferencias del decisor. Este enfoque, el más reciente, es el adoptado por los métodos interactivos, llamados así porque el analista interactúa con el decisor de forma que se parte de una solución inicial que el decisor evalúa en base a sus preferencias, las cuales se introducen en el modelo para generar una nueva solución mediante iteraciones de ensayo-error. También llamados métodos locales, alternan las etapas de cálculo (proporcionando compromisos sucesivos) y las etapas de diálogo (fuentes de información suplementarias sobre las preferencias del decisor). Aunque desarrollados, en su mayor parte, en el contexto de la programación matemática con objetivos múltiples, algunos de estos métodos pueden adaptarse a casos más generales. Entre ellos se encuentran el método STEM, el método de Zionts y Wallenius, el método de Geoffrion, Dyer y Feinberg, el método Surrogate Worth Tradeoff, etc. Se tienen dos enfoques: el primero se basa en una función de valor implícita, de modo que el decisor responde a unas cuestiones específicas que se emplean como guía en el proceso hacia una solución que es la óptima o la más deseada; el segundo enfoque se basa en la no existencia de una función de valor, por lo que en este caso los niveles de aspiración del decisor son proyectados respecto a los objetivos sobre la región factible.

Centrados en los métodos de análisis multicriterio discreto, puesto que dan mejor respuesta a los problemas que se van a analizar en la presente tesis como ya se ha dicho, existen algunos de ellos que están basados en la transformación de los criterios a una escala de valoración concreta para así tratar el problema como unicriterio (caso de la escala monetaria, utilizando entonces indicadores económicos para el análisis coste/beneficio u otros de rentabilidad citados anteriormente), otros en la evaluación de la distancia a una solución ideal multiobjetivo, otros en procedimientos de clasificación de todas las alternativas considerando todos los criterios, otros en consideraciones de intercambio entre criterios, y muchos otros en combinaciones de los métodos anteriores [Smith *et al.*, 2000].

Por tanto, y ante la gran variedad existente, existen nuevamente diferentes clasificaciones de los mismos, de entre las cuales se ha seleccionado la que atiende al **modo de agregación** que presentan, pues como se dijo anteriormente esta etapa del método es una de las principales características que los diferencia. Los modos de agregación son numerosos, debido a que en la naturaleza de las cosas ningún método respeta la totalidad de las exigencias que un actor podrá encontrar normales en la idea del multicriterio, siendo preciso decidir en qué exigencia se va a ceder [Schärling, 1985]. Así, un modo de agregación multicriterio es una regla o procedimiento matemático que permite establecer sobre el conjunto de evaluaciones de las alternativas según cada uno de los criterios y sobre las informaciones entre criterios (coeficientes de importancia, tasas de sustitución, umbrales de veto, etc.), uno o varios sistemas relacionales de preferencias sobre el conjunto de las alternativas [Roy and Bouyssou, 1993]. Es decir, los resultados obtenidos pueden referirse tanto a las puntuaciones de las alternativas respecto de algún criterio, como a la utilidad que reporta el puntaje obtenido en dicho criterio [Flament, 1999]. Roy distingue fundamentalmente dos enfoques de agregación: agregación completa y agregación parcial [Roy, 1985].

Métodos de agregación completa.

Los métodos de agregación completa se caracterizan por agregar los diferentes puntos de vista o criterios (con sus eventuales pesos) en una única función de utilidad global que se toma como punto de partida del problema de programación matemática multicriterio [Von Neumann and Morgenstern, 1944]. Cuando el problema es discreto y no existe una situación de incertidumbre, esta función se denomina función valor. Roy los denomina *enfoque del criterio único de síntesis eliminando toda incomparabilidad* [Roy, 1985]. Con esta técnica de agregación, todas las soluciones son comparables (no se admite la *incomparabilidad*), consiguiéndose una ordenación completa para cualquier par de alternativas; ello permite tratar fácilmente tanto las problemáticas de selección $P\alpha$ como las problemáticas de ordenación $P\gamma$, como fue tratado anteriormente. En el dominio de la agregación completa, englobada en la llamada «Escuela Americana», puesto que tuvieron su origen en los años 70 del pasado siglo en Estados Unidos [Cvetković and Coello, 2005], se plantean dos enfoques diferentes para modelizar las preferencias según la función de valor, o sea, el tratamiento de los criterios [Howard and Matherson, 1984; Keeny and

Raiffa, 1993]: directos, entre los que destacan la suma ponderada y MAUT; y jerárquicos, representado por la técnica de jerarquías analíticas (AHP), TOPSIS y SMART.

Como ya se comentó anteriormente, el **proceso analítico jerárquico** tiene un gran potencial en la fase de ponderación de criterios y será el método utilizado en este trabajo para establecer los pesos de las variables y atributos utilizados, de ahí que sea desarrollado en un apartado específico. Por su parte, se van a escoger los dos métodos de análisis multicriterio más representativos de cada enfoque para proponerlos en el estudio del problema objeto de la tesis, por lo que tanto la suma ponderada como el método TOPSIS también serán explicados en sus correspondientes apartados más adelante. Finalmente, y solo con la intención de poder presentar brevemente el resto de métodos para poder establecer comparaciones entre ellos y justificar las elecciones antes citadas, a continuación se introducen sus características principales.

De entre los métodos de agregación completa directos se tiene la **Teoría de la Utilidad Multi-atributo (MAUT)**, desarrollada por Keeney y Raiffa en 1976, que sienta sus bases en los axiomas que en 1944 Von Neumann y Morganstern elaboraron como aplicación unidimensional en econometría [Von Neumann and Morganstern, 1944; Keeney and Raiffa, 1993]. Estos métodos asumen que un problema de decisión puede modelizarse en términos de la utilidad que le reporta (principio de racionalidad) mediante funciones valoradas reales que pueden ser maximizadas/minimizadas entre las alternativas [Howard and Matherson, 1984]. Así, permiten, al menos teóricamente, funciones de valor más sofisticadas e incorporan la posibilidad de valorar el riesgo y la incertidumbre [Fishburn, 1970].

Por tanto, la principal dificultad de estos métodos consiste precisamente en construir la función de valor que asocia un número real a cada una de las alternativas posibles, pero una vez obtenida, el problema de decidir la mejor de las alternativas se reduce a obtener el máximo/mínimo de todos los valores calculados. Además, el mayor o menor grado de independencia de los criterios permitirá reducir dicho problema a otros más sencillos de construir funciones univariantes las cuales se agregarán luego debidamente. El caso más sencillo es el llamado aditivo ponderado (coincidente con el

método de suma ponderada que se desarrollará más adelante, por lo que la teoría MAUT no es sino una generalización del mismo) [Keeny and Raiffa, 1993]:

$$U(A_i) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot U_j(r_{ij}), \quad i=1, \dots, m \quad (ec. 2.19)$$

Pero existen otros conocidos, como el multiplicativo (para $n = 3$):

$$u(z) = \lambda_1 \cdot u_1(z_1) + \lambda_2 \cdot u_2(z_2) + \lambda_3 \cdot u_3(z_3) + k\lambda_1\lambda_2 \cdot u_1(z_1)u_2(z_2) + k\lambda_1\lambda_3 \cdot u_1(z_1)u_3(z_3) + k\lambda_2\lambda_3 \cdot u_2(z_2)u_3(z_3) + k^2\lambda_1\lambda_2\lambda_3 \cdot u_1(z_1)u_2(z_2)u_3(z_3) \quad (ec. 2.20)$$

o el multilinear (para $n = 3$):

$$u(z) = \lambda_1 \cdot u_1(z_1) + \lambda_2 \cdot u_2(z_2) + \lambda_3 \cdot u_3(z_3) + \lambda_{12}\lambda_1\lambda_2 \cdot u_1(z_1)u_2(z_2) + \lambda_{13}\lambda_1\lambda_3 \cdot u_1(z_1)u_3(z_3) + \lambda_{23}\lambda_2\lambda_3 \cdot u_2(z_2)u_3(z_3) + \lambda_{123}\lambda_1\lambda_2\lambda_3 \cdot u_1(z_1)u_2(z_2)u_3(z_3) \quad (ec. 2.21)$$

Y entre los modelos jerárquicos, aparte de los dos más importantes que se verán más adelante, es también conocido el **método SMART** (*Simple Multi-Attribute Rating Technique*), que fue desarrollado por Edwards y Barron [Edwards and Barron, 1994]. En él se juzga la actuación de la alternativa mediante la elección de un apropiado valor entre un límite inferior predeterminado para la peor (real o imaginaria) alternativa y un límite superior para la mejor (real o ideal) alternativa. A partir de ahí se requiere a diferentes participantes sucesivas comparaciones de los criterios y respuestas simples hasta determinar su peso definitivo en el problema, a la vez que permite un mayor entendimiento del mismo. Dado que el análisis es transparente, se facilita la aceptación de los resultados. El método produce resultados relativamente rápido, pero el costo de su simplicidad es que no captura todos los detalles y complejidades del problema real. El método original está diseñado para situaciones donde se reconoce que existe cierto número de alternativas posibles y se evalúa cada una. En el caso de ordenamiento esto no es posible, ya que el número de alternativas posibles es muy grande [Dasarathy, 1976].

La ventaja del modelo SMART es que es independiente de las alternativas. Cuando las evaluaciones de las alternativas no son relativas, cambiando el número de alternativas considerado no cambiarán las puntuaciones de la decisión con respecto a las alternativas [Lootsma and Schuijt, 1997]. Esta característica es particularmente útil cuando se añaden nuevas alternativas a la comparación existente, lo cual constituye una de las principales debilidades de los demás métodos.

Métodos de agregación parcial.

Los métodos de agregación parcial (también llamados métodos de superación [Vincke, 1989] o enfoque de superación de síntesis aceptando la *incomparabilidad* [Roy, 1985]; en inglés *outranking methods*), contrariamente a los métodos de agregación completa, sí toleran la presencia de *incomparabilidad* e intransitividad [Roy, 1985]. Esta familia de métodos intenta construir una relación de sobreclasificación que modelice las mismas preferencias que posee el decisor y seguidamente se utiliza para resolver el problema, ayudando por lo tanto a tomar una decisión teniendo en cuenta las dificultades que se derivan para la construcción de la función de valor de la familia de métodos anterior. Sus métodos se basan en comparar entre sí las diferentes alternativas en base a cada criterio y después agregar esta información considerando la fuerza de las evidencias a favor y en contra de la selección de una alternativa respecto a otra [Roy, 1991; Flament, 1999].

Todos ellos se inspiran en el concepto de **sobreclasificación**, también denominado de superación, concebido por un grupo de investigadores franceses a mediados de los años 60 del pasado siglo, entre los que hay que destacar a Bernard Roy, que lo define como una relación binaria S tal que aSb si, dado aquello que se sabe de las preferencias del decisor y dada la calidad de las evaluaciones de las acciones y la naturaleza del problema, hay suficientes argumentos para admitir que a es al menos tan buena como b , sin que haya una razón importante para rechazar esta afirmación [Roy, 1985]. Para expresar las ideas de *al menos tan buena como y sin que haya una razón importante para rechazar esta afirmación* se tienen en cuenta los conceptos de **Concordancia y Discordancia**. La concordancia cuantifica cuánto para un elevado número de criterios una acción es preferida a otra, y para ello se fija un Umbral Mínimo de Concordancia. La discordancia cuantifica hasta qué punto no existe ningún criterio para el que una acción es mejor que otra, fijándose también un Umbral Mínimo de Discordancia [Roy, 1968].

Como se ha visto anteriormente, las relaciones de superación no son necesariamente transitivas (es decir, recuérdese que si aSb y bSc , ello no necesariamente implica que aSc). Esto hace que estos métodos sean simultáneamente prácticos y ambiguos, a semejanza de multitud de casos que se encuentran en la vida cotidiana.

Además, en ellos subyace la idea de que es mejor aceptar un resultado menos exacto, si con ello se evita introducir hipótesis matemáticas demasiado fuertes, y abrumar al decisor con cuestiones normalmente demasiado difíciles. Son, por tanto, menos sólidos teóricamente pero más fáciles de aplicar en problemas reales con un número reducido de alternativas posibles que deben ser evaluadas con base a varios atributos o criterios [Romero, 1996].

Estos métodos, en general, están entre la relación de dominancia (relación binaria que determina qué alternativas dominan o superan al resto de alternativas para todos los criterios de decisión, lo cual es demasiado pobre para ser útil ya que pocos pares de alternativas realmente verifican esta relación) y la función de utilidad multiatributo (demasiado rica para ser realizable en muchos casos), por lo que pretenden enriquecer la relación de dominancia, mediante elementos que no padezcan ninguna discusión por considerar preferencias fuertemente establecidas.

Los diferentes métodos de esta familia también se originaron y desarrollaron en la escuela francófona (principalmente en Francia, Bélgica, Suiza, aunque ya puede considerarse europea puesto que se verifican muy importantes contribuciones de los Países Bajos y Polonia, entre otros, a tal esquema) y presentan como trabajos pioneros los métodos ELECTRE (ELECTRE I [Roy, 1968], ELECTRE II [Roy, 1973], ELECTRE III [Roy, 1978], ELECTRE IV [Roy and Hugonnard, 1982], ELECTRE IS [Roy and Shalka, 1984] y ELECTRE TRI [Yu, 1992]), que brindan opciones para resolver diferentes tipos de problemas en el tratamiento de la teoría de la decisión. También se encuentra entre las técnicas de agregación parcial a los métodos PROMETHEE, ORESTE, MACBETH, TODIM, ZAPROS, VIKOS, lexicográfico, etc.

De este enfoque también se va a seleccionar el método más tradicional y representativo, el **ELECTRE**, que será desarrollado en un apartado concreto, por lo que igualmente que en el caso de los métodos de agregación completa se presentan a continuación las principales características del resto de integrantes de esta familia.

El siguiente método de superación más popular es el **PROMETHEE** (*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations*), desarrollado por J. P. Brans,

P. Vincke y B. Mareschal, que utiliza la relación de sobreclasificación entre alternativas realizando una comparación por pares de las mismas, para identificar la mejor. El principal concepto que introduce es el de pseudocriterio, generalización del concepto usual de criterio, ya que construye el grado de superación entre cada par de alternativas ordenadas tomando en cuenta la diferencia de puntuación que las mismas poseen respecto a cada atributo. La evaluación de esas diferencias puede realizarse mediante funciones de valor posibles y que son utilizadas de acuerdo a las preferencias del decisor, quién además debe proporcionar los umbrales de indiferencia y de preferencia asociados a estos pseudocriterios. Otras variantes del método plantean situaciones más sofisticadas de decisión, en particular problemas con un componente estocástico. Así se han desarrollado las versiones PROMETHEE II, PROMETHEE III, PROMETHEE IV y PROMETHEE V [Brans, 1982; Brans *et al.*, 1984; Brans and Vincke, 1985; Brans and Mareschal, 1986; Brans and Mareschal, 2002].

El método **MACBETH** (*the Measuring by A Categorical Based Evaluation TecHnique*) es un método interactivo que mide el grado de preferencia de un decisor sobre un conjunto de alternativas. Construye una función criterio desde un punto de vista fundamental y determina los parámetros relacionados con la información entre criterios (pesos) en la fase de agregación. El método utiliza un procedimiento mediante un cuestionario inicial iterativo que compara dos niveles al mismo tiempo, requiriendo solamente un juicio de preferencia cualitativo. Empieza con la comparación de la opción más atractiva y la menos atractiva; la opción más atractiva se compara entonces con el resto de opciones y el siguiente paso considera la comparación de la segunda opción más atractiva con la tercera, y así con todas [Bana *et al.*, 1999].

El método **ORESTE** (*Organisation, Rangement Et Synthèse de données relaTionnelles*) fue desarrollado por M. Roubens. Este método tiene como objetivo encontrar una estructura de preferencia global sobre el conjunto de alternativas A, que refleje los juicios de las alternativas para cada criterio y la estructura de preferencia entre ellos. En esta técnica, la importancia relativa entre los criterios no se establece mediante la asignación de pesos a los mismos, sino a través de un orden débil mediante la relación $S = (I \text{ o } P)$ que es completa y transitiva, ya que P (preferencia) es antisimétrica e I (indiferencia) es simétrica. Además, la relación S también se utiliza para establecer el

orden débil a partir de cada criterio C_j sobre el conjunto de alternativas A [Roubens, 1982; Pastijn and Leysen, 1989].

El método **ZAPROS** (abreviación de las palabras rusas correspondientes a *Procedimientos Cerrados cerca de Situaciones de Referencia*), desarrollado por Larichev y Moshkovich, utiliza evaluaciones cualitativas mediante las que el decisor elabora ordenes parciales en un posible gran conjunto de alternativas, pero el método solo proporciona un orden parcial y no garantiza una ordenación completa. El método está basado en operaciones psicológicamente validas para la extracción de la información del decisor: comparaciones de dos distancias entre las evaluaciones en las escalas ordinales de dos criterios. La información recibida por el decisor se utiliza para la construcción de relaciones binarias entre un par de alternativas que producen relaciones de preferencia, indiferencia o incompatibilidad. [Larichev and Moshkovich, 1991; Larichev *et al.*, 1993]

El método **VIKOR** (su nombre proviene de las siglas de la frase en serbio *VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*, que significa «Optimización Multicriterio y Solución de Compromiso»), introducido por Serafim Opricovic en 1998, determina una solución de compromiso, proporcionando una «utilidad de grupo» para la «mayoría» y una penalización mínima individual para el «opponente». Se basa en una función de agregación que representa el acercamiento al punto ideal. Primero se realiza la definición de las soluciones ideales positivas y negativas, donde la solución ideal positiva es la alternativa que obtiene el valor más alto, mientras que la solución ideal negativa es el menor valor. VIKOR es una herramienta en la toma de decisión multicriterio que es útil particularmente en una situación donde el decisor no es capaz o no sabe expresar sus preferencias al comienzo del diseño del sistema, de modo que la solución de compromiso podría ser la base para negociaciones, incluyendo las preferencias del decisor para el peso de los criterios. Igualmente, la ordenación mediante VIKOR puede realizarse con diferentes valores para los pesos de los criterios, analizando el impacto de los estos en la solución de compromiso propuesta, así como los intervalos de estabilidad de los pesos [Opricovic, 1998; Opricovic and Tzeng, 2002; Mei-Tai *et al.*, 2007].

El método **TODIM** (acrónimo de *TOmada de Decisión Interactiva Multicriterio*) fue desarrollado por Gomes y Lima y tiene en cuenta la toma de decisión bajo riesgo. El

método consiste en prescribir una acción a través de una priorización de todas las alternativas. El riesgo asociado a cada alternativa será un valor adimensional, en la medida en que no se prefiera un objetivo sobre los restantes, es decir que se respeta la existencia de múltiples dimensiones en el problema de decisión. Los riesgos parciales asociados a una alternativa determinada pueden obtenerse fácilmente a partir de las preferencias de los expertos en el caso de criterio cualitativo o mediante los cálculos obtenidos con los criterios cuantitativos [Gomes and Lima, 1992].

Finalmente, el método **lexicográfico** está fundamentado teóricamente en un esquema básico muy simple, requiriendo inicialmente tan solo un orden de los criterios y un preorden, o incluso un semiorden, en las evaluaciones, para seguidamente tomar el criterio con mayor peso y atendiendo a su vector de evaluaciones elegir la mejor alternativa, si hay empate se utiliza para dirimirlo el segundo criterio en importancia, y así sucesivamente [Georgescu-Roegen, 1954; Debreu, 1960; Fishburn, 1974]. Es un método sencillo, tanto por su aplicación como por la información que demanda al decisor, pero tiene el inconveniente de que no utiliza toda la información disponible.

La variante del semiorden lexicográfico [Luce, 1956] se caracteriza por que el subsiguiente criterio es considerado no solo en caso de empate exacto en el anterior, sino cuando las diferencias entre las mejores evaluaciones de este son menores que una cierta tolerancia prefijada. Es un enfoque más realista, pero tal proceder puede dar lugar a intransitividad en la ordenación final de las alternativas [Tversky, 1969].

Existe otra variante en la cual la alternativa finalmente elegida es aquella que más veces salga elegida en primer lugar tras aplicar el método lexicográfico a todas las permutaciones de orden de preferencia de los criterios, por lo que ni siquiera es necesario asignar pesos ordinales a los mismos [Massam and Askew, 1982].

Queda claro, por tanto, la gran variedad de métodos de análisis multicriterio desarrollados. Sin embargo, solo unos pocos son los que comúnmente son utilizados en el ámbito de las carreteras, como se analiza a continuación.

2.3.7. Metodologías de toma de decisión en carreteras.

Una vez analizados los conceptos y tipos esenciales de las técnicas de análisis multicriterio en general, la presente revisión bibliográfica va a centrarse a continuación en el análisis de las que más comúnmente son utilizadas para los problemas de decisión que se presentan en la ingeniería civil, y más concretamente, en el campo de las carreteras.

Como ya se apuntó anteriormente, hay que destacar que en Europa, en el contexto de las carreteras, ha existido una tradición de analizar y evaluar las vías por medio del coste respecto a su beneficio para tomar una decisión, es decir, mediante indicadores económicos sobre los que se basa el conocido **análisis coste-beneficio** [Fernández *et al.*, 1996; Biondini and Frangopol, 2008]. La razón principal de utilizar en mayor medida este mecanismo se debe a la facilidad para identificar los beneficios (económicos o sociales) que aportan las soluciones. Sin embargo, las Administraciones en carreteras de la Comunidad Europea han ido sistemáticamente marginando este planteamiento, expresando con mayor insistencia y rigor el desarrollo de nuevos métodos de análisis de los proyectos desde el punto de vista integrado de sostenibilidad, tomando en consideración aspectos económicos, sociales y medioambientales y, apartándose de las concepciones más estándar (primacía del económico y visión no agregada) [Ortiz *et al.*, 2007]. El mismo, en consecuencia, debe articularse a través de un método multicriterio.

Si se analizan los documentos de planificación y proyección publicados por las diferentes administraciones en España, puede observarse rápidamente que los ejemplos de uso análisis multicriterio son innumerables, puesto que es una de las premisas que la propia Administración exige a las empresas consultoras que son las que suelen formular estos estudios para ellas.

La inmensa mayoría de los documentos utilizan el método de la **suma ponderada** o ponderación lineal, como apoyo en el proceso de planificación y para comparar diferentes alternativas (trazados de carreteras, opciones de ordenación territorial, etc.) o diversas medidas de un plan o programa [Voogd, 1983; Ellis *et al.*, 2004], como es el caso analizado en esta tesis. Tanto es así que cuando se habla de análisis multicriterio para la

selección de alternativas idóneas o jerarquización de las mismas en relación con proyectos de carreteras, sin especificar la metodología concreta, suele referirse a la suma ponderada.

Por otro lado, en algunos estudios informativos aparece utilizado también el método **ELECTRE**, aplicado en condiciones de incertidumbre. De hecho, este método, junto al de la suma ponderada, es estudiado en las Escuelas de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos en nuestro país para la valoración y selección de alternativas, así como procedimiento de evaluación de impactos ambientales en los proyectos. Además, el empleo de ambos métodos es recomendado por la propia Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento para la justificación de las elecciones en los estudios informativos y anteproyectos (y en general por la Administración central, ya que también el Ministerio de Medio Ambiente, por ejemplo, establece la obligatoriedad de utilizar estos métodos para la evaluación y selección de proyectos, actuaciones e inversiones en los organismos de cuenca), con lo que la especialización de las empresas consultoras en estos trabajos ha generalizado su utilización.

Por todo lo anterior, y teniendo en cuenta que la problemática tratada en esta tesis requiere una ordenación entre las alternativas estudiadas, se selecciona de entre aquellos métodos los que posibilitan no tanto la elección de la mejor alternativa, sino los que dan como salida una prioridad completa dentro del conjunto de opciones planteadas.

Así, aparte del típico de ponderación lineal (como caso particular de la Teoría Multiatributo, MAUT, como se ha visto) y que representa la familia de los métodos de agregación completa directos, se escogerá también el **ELECTRE**, igualmente conocido en el ámbito de desarrollo de esta investigación y, para completar con otro método de agregación completa (y, por tanto, de escuela diferente a la del **ELECTRE**) pero en este caso jerárquico, el **TOPSIS**, del que también se ha visto que existen antecedentes de su utilización exitosa relacionada con carreteras. Todos ellos se apoyarán en la ponderación de criterios establecida mediante la aplicación del más importante método de los existentes, la técnica de jerarquías analíticas [Haghighat, 2011], sobre los datos obtenidos de diferentes paneles de expertos.

2.3.8. Análisis multicriterio difuso.

Como fue tratado anteriormente, la teoría de la decisión presenta también su variedad «difusa» en el caso en que las decisiones se muevan en el campo de la imprecisión o incertidumbre que es esencialmente derivada de la naturaleza imprecisa e insuficiente de los datos que sirven como entrada, así como de la subjetividad y carácter evaluativo de las preferencias de los tomadores de decisiones.

La incorporación de las herramientas facilitadas por la lógica difusa permite desarrollar el modelamiento de las aplicaciones en esta materia [Kahraman, 2008(b)] y también brinda un marco adecuado para tratar simultáneamente variables numéricas y lingüísticas, algo que las metodologías basadas en formulaciones convencionales *crisp* no logran.

Por tanto, cuando las decisiones se mueven en términos de incertidumbre, es lógico pensar que la metodología se mejoraría significativamente si se construyese sobre un modelo lingüístico más adecuado que el convencional. Así, mediante variables lingüísticas puede obtenerse una representación matemática adecuada de conceptos vagos, es decir, de conceptos que no pueden delimitarse por fronteras exactas. Por ejemplo, la variable «importancia de un impacto» puede calificarse como irrelevante, moderada, severa o crítica, y aunque cada una de esas etiquetas tiene un contenido semántico claro, no hay una diferencia nítida entre cada una de ellas. Esta clasificación adolece del mismo problema que adolecen todas las clasificaciones mediante intervalos de conceptos vagos: supóngase que esta variable de importancia de un impacto establece una división de sus valores según los intervalos 0-25 para irrelevante, 26-50 para moderada, 51-75 para severa y 76-100 para crítica y se tienen dos evaluaciones cuyos índices de importancia sean 50 y 51, respectivamente ¿resulta lógico considerar que sean tan diferentes como para asignarles dos etiquetas diferentes (moderada y severa)? Si, por el contrario, se define la valoración de este parámetro mediante una variable lingüística con las mismas cuatro etiquetas, pero representadas por conjuntos difusos, se eliminarían estos cambios bruscos.

Sin embargo, existen otras variables cuya representación con números reales (*crisp*) parecería, al menos en principio, adecuada, como por ejemplo el caso de la magnitud coste,

que se mide empleando indicadores económicos (en valores monetarios concretos). De todas formas, no hay que olvidar que en los estudios de planificación o proyección se efectúa una predicción que puede ser imprecisa. En estos casos la representación *crisp* es insuficiente para modelar la imprecisión.

Por tanto, el uso de los números difusos para representar estas magnitudes es muy adecuado, puesto que permiten modelar adecuadamente valores numéricos en los que exista incertidumbre. Además, no hay que olvidar que los números difusos son una extensión de los números *crisp*, de tal manera que al remplazar números *crisp* por números difusos en estos estudios, aquellas variables cuya representación *crisp* sea adecuada, podrán seguir siendo representadas de esa forma.

De este modo, con el empleo de un método de toma de decisiones multicriterio con base en lógica difusa puede manejarse la información de carácter impreciso y encontrar soluciones satisfactorias que optimicen diferentes criterios en conflicto [Turban and Aronson, 1998]. Visto así, los elementos que componen las metodologías de decisión multicriterio difuso son los mismos que la convencional.

En general, los métodos de análisis multicriterio difuso otorgan inicialmente a cada alternativa una calificación difusa (“*fuzzy rating*”) que corresponde a la agregación de las evaluaciones de la alternativa con respecto a todos los criterios. Posteriormente, se realiza una fase de ordenamiento difuso (“*fuzzy ranking*”) en la cual se comparan la puntuación agregada de las alternativas mediante un método de ordenamiento difuso. Los resultados de ambas fases se denominan calificación final y posición de ordenamiento (“*ranking order*”), respectivamente. La evaluación de cada alternativa con respecto a todos los atributos se representa por medio de un conjunto difuso, por lo que la calificación final se expresará también como un conjunto difuso [Chen and Hwang, 1992; Chang *et al.*, 2008].

Al respecto del conjunto de alternativas y el subconjunto de aquellas eficientes o factibles (véase apartado 2.2.2) en un problema de decisión multicriterio bajo incertidumbre o difuso (p.d.b.i.), se establecen los siguientes axiomas [Luce and Raiffa, 1985]:

- Axioma 1: para cualquier p.d.b.i. que cuente con un conjunto de alternativas posibles, el conjunto de alternativas eficientes al respecto de los criterios de decisión (elegibles, por tanto) es no vacío, es decir todos los problemas tienen solución.
- Axioma 2: el conjunto de alternativas eficientes o factibles de un p.d.b.i. no depende de la elección del origen y la unidad de la escala utilizada para la abstracción del problema.
- Axioma 3: el conjunto de alternativas elegibles no depende del etiquetado de las alternativas, es decir, las alternativas reales singularizadas como óptimas son independientes de las etiquetas arbitrarias que sean asignadas a las alternativas en el proceso de abstracción del problema.
- Axioma 4: si una alternativa A es óptima y otra alternativa A' es equivalente o es preferida débilmente a la anterior, entonces esta alternativa A' también pertenece al conjunto de alternativas eficientes.
- Axioma 5: resultante del anterior, si una alternativa A' pertenece al conjunto de alternativas eficientes, entonces A' es admisible o Pareto-óptima. Dicho de un modo inverso, dada una alternativa A', si existe una alternativa A que sea preferida débilmente a A', entonces es que A' no es eficiente y no pertenece al conjunto de alternativas elegibles.
- Axioma 6: si se añaden nuevas alternativas a un p.d.b.i., cada una de las cuales es débilmente dominada o es equivalente a alguna de las antiguas alternativas, no hay efecto sobre el carácter óptimo o no-óptimo de las antiguas alternativas.
- Axioma 7: si una alternativa es no-óptima para un p.d.b.i., esta no puede ser óptima añadiendo nuevas alternativas al problema. De este axioma de independencia de las alternativas irrelevantes se deducen los siguientes.
- Axioma 7': la adición de nuevas alternativas no pueden transformar una antigua alternativa, originariamente no-óptima, en una óptima, y solo se puede cambiar una antigua alternativa, originariamente óptima en una no-óptima si al menos una de las nuevas alternativas es óptima.

- Axioma 7'': la adición de nuevas alternativas a un p.d.b.i. nunca cambia antiguas originariamente no-óptimas en óptimas y, además:
 - bien todas las antiguas alternativas originariamente óptimas permanecen óptimas.
 - bien ninguna de las antiguas alternativas originariamente óptimas permanece óptima.
- Axioma 7''': Una alternativa A' es óptima si y solo si es óptima en las comparaciones pareadas entre A' y A, para todas las alternativas A posibles.

Para terminar, solo cabe mencionar que la denominación de los métodos multicriterio difuso parte de los modelos convencionales de los que derivan, por lo que existen el proceso analítico jerárquico difuso (FAHP), ELECTRE difuso, TOPSIS difuso, función de utilidad multiatributo difuso, etc. Igualmente, la notación para estas metodologías es similar a la de los convencionales.

2.4. MÉTODO DE LAS JERARQUÍAS ANALÍTICAS.

2.4.1. Características principales y axiomas básicos.

El método de las jerarquías analíticas, también llamado proceso analítico jerárquico o proceso de jerarquización analítica (conocido por sus siglas en inglés, AHP), constituye, como se ha dicho, el representante más importante de la familia de métodos de análisis multicriterio de agregación completa.

Fue desarrollado durante los años 70 del pasado siglo en la Universidad de Pennsylvania por el Dr. Thomas L. Saaty, al buscar elaborar un instrumento formal para la evaluación y selección de alternativas, que tuviera las características de ser sólido en sus fundamentos matemáticos, útil y confiable en la toma de decisiones y sencillo en su aplicación [Sánchez Guerrero, 2003]. Su **origen** puede situarse en 1971 cuando Saaty trabajaba para el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, y lo perfeccionó en un estudio para la NSF (Fundación Nacional para la Ciencia) sobre el racionamiento de

energía para industrias en 1972, año en que Saaty también creó la escala que relaciona las opiniones con los números. La técnica llegó a su madurez aplicativa con el Estudio de los Transportes de Sudán en 1973 y tuvo un gran enriquecimiento teórico entre 1974 y 1978 [Saaty, 1977]. Fue publicado por su autor en 1980 [Saaty, 1980].

Consiste esencialmente en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos utilizando una estructura jerárquica y basándose en los principios de establecimiento de prioridades y de consistencia lógica [Alarcón, 2006]. El método es aplicable siempre que sea posible representar los problemas en una **jerarquía** de objetivos, criterios, subcriterios y alternativas de la que parte para a continuación realizar comparaciones por pares de elementos del mismo nivel de la jerarquía con respecto a cada elemento del nivel superior, y finalmente de manera vertical sintetizar los juicios sobre los diferentes niveles de la jerarquía [Saaty, 1980; Marques Martins, 2008]. Como resultado entrega un ranking u ordenamiento de las alternativas de acuerdo a los pesos obtenidos [Arancibia *et al.* 2003; Kablan, 2004].

Con estos planteamientos anteriores, se puede decir que el método AHP integra adecuadamente los pesos de los criterios a través de jerarquías y de la ponderación lineal; lo que hace que sea considerado uno de los métodos más completos en el campo de la Decisión Multicriterio [Marques Martins, 2008]. De hecho, según Saaty, «la naturaleza holística de un problema dado necesita dividirse en áreas de asuntos menores, dentro de las cuales diferentes grupos de expertos determinan cuánto afecta cada área al problema total» [Saaty, 1980]. En otras palabras, un problema grande y complejo precisa descomponerse en problemas de menor complejidad, cuyas soluciones puedan ser combinadas para obtener la solución del problema mayor. Tales problemas, sin embargo, argumenta Saaty, «requieren expertos especializados para ser modelados adecuadamente en una estructura e incluir el proceso de evaluación en esa estructura» [Saaty, 1980].

Además, el método de las jerarquías analíticas puede ser realizado en grupo o de manera individual, aplicándose preferentemente a problemas complejos, puesto que permite la utilización de datos cualitativos y/o cuantitativos medibles, siendo estos tangibles o intangibles, en el análisis de criterios, así como la incorporación del subjetivismo y la incertidumbre inherente en el proceso de toma de decisión [Saaty, 1977;

Saaty, 1994; Sánchez Guerrero, 2003]. Su representación en una estructura de árbol, además, permite tener una visión más clara del problema a tratar [Saaty, 1980]. Todo ello hace que el método sea bastante intuitivo en su aplicación y difícilmente manipulable, por lo que probablemente es el método más difundido.

Básicamente el modelo jerárquico que propone el método presenta en su vértice superior el principal objetivo del problema (meta a alcanzar), y en la base se encuentran las posibles alternativas a evaluar. En los niveles intermedios se representan los criterios (los cuales a su vez se pueden estructurar también en jerarquías de subcriterios) en base a los cuales se toma la decisión [Saaty, 1980; Saaty, 1994; Cables Pérez, 2011]. El diseño de las jerarquías requiere experiencia y conocimiento del problema que se plantea, para la cual es indispensable disponer de toda la información necesaria [Gass and Rapsak, 2004]

Una vez construido el modelo jerárquico, se realizan **comparaciones a pares** entre dichos elementos (criterios, subcriterios y alternativas) en términos de preferencia, importancia, probabilidad o contribución de cada uno de ellos al elemento de nivel superior al que están ligados, y se atribuyen valores numéricos a las preferencias señaladas por las personas [Saaty, 1980; Saaty, 1994] (normalmente profesionales o expertos relacionados con el área de análisis de la decisión) [Marques Martins, 2008]. El fundamento del proceso de Saaty descansa en el hecho que permite dar valores numéricos a los juicios dados por las personas, logrando medir cómo contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del cual se desprende. Se forman así matrices cuadradas en las que el número de filas y columnas viene definido por el número de elementos que se comparan. Según el propio Saaty, «Creemos que este es el método natural (pero refinado) que la gente siguió al tomar decisiones mucho antes que se desarrollaran funciones de utilidad y antes que se desarrollara formalmente el AHP» [Saaty, 1990].

En la formulación tradicional del AHP, para representar los juicios de los expertos se utilizan **escalas** de preferencia (si se comparan alternativas) o ratios de importancia (si se comparan criterios), que se evalúan según una escala numérica propuesta por el mismo Saaty (a partir de 28 escalas alternativas que fueron ensayadas), que va desde 1 hasta 9, de acuerdo con la tabla fundamental de correspondencia numérico-conceptual siguiente [Vargas, 1990; Saaty, 1994; Barba-Romero y Pomerol, 1997; Marques Martins, 2008]:

2. HERRAMIENTAS Y MARCO DE TRABAJO

Tabla 2.3: La Escala Fundamental de Saaty. Fuente: adaptada de [Saaty, 1990].

| Intensidad importancia relativa | Definición (i respecto a j) | Valores a_{ij} | Numérico a_{ji} |
|---------------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------|
| 1 | Igual importancia | 1 | 1 |
| 2 | Intermedia | 2 | $\frac{1}{2}$ |
| 3 | Moderadamente más importante | 3 | $\frac{1}{3}$ |
| 4 | Intermedia | 4 | $\frac{1}{4}$ |
| 5 | Más importante | 5 | $\frac{1}{5}$ |
| 6 | Intermedia | 6 | $\frac{1}{6}$ |
| 7 | Mucho más importante | 7 | $\frac{1}{7}$ |
| 8 | Intermedia | 8 | $\frac{1}{8}$ |
| 9 | Extremadamente más importante | 9 | $\frac{1}{9}$ |

Nota: Los valores intermedios (2, 4, 6, 8) están permitidos, cuando sean necesarios para resolver un compromiso. El valor cero (0) no es permitido.

Sin embargo, es posible igualmente utilizar una escala simple, también muy común en la bibliografía [Büyüközkan *et al.*, 1994; Celik *et al.*, 2009], como la de la tabla siguiente:

Tabla 2.4: Escala simple de valoración. Fuente: adaptada de [García-Cascales, 2009].

| Valoración cualitativa | Valoración cuantitativa |
|------------------------|-------------------------|
| Muy débil | 1 |
| Débil | 2 |
| Moderada | 3 |
| Fuerte | 4 |
| Muy fuerte | 5 |

En el caso en que sean varios los expertos que asignan valores a estas comparaciones, es posible agregar los resultados para aplicar sobre ellos el método. Como el propio Saaty dice: «el AHP hace posible la toma de decisiones grupal mediante el agregado de opiniones, de tal manera que satisfaga la relación recíproca al comparar dos elementos. Luego toma el **promedio geométrico** de las opiniones. Cuando el grupo consiste en expertos, cada uno elabora su propia jerarquía, y el AHP combina los resultados por el promedio geométrico» [Saaty, 1990].

El proceso de comparación conduce a una escala de medida relativa de prioridades o pesos de dichos elementos. Los pesos o prioridades relativas deben sumar la unidad. De

hecho, cuando se comparan las alternativas dos a dos en función de uno de los criterios, formando las respectivas «**matrices de comparación por pares**», se crearán tantas matrices como criterios definan el problema, en cada una de las cuales se obtendrán las preferencias de las alternativas en función del criterio que en esa matriz se esté considerando [Saaty, 1980; Saaty, 1994].

En estos juicios que deben realizar los expertos pueden ser evaluados simultáneamente factores intuitivos, racionales y vagos, y posteriormente tales juicios son integrados en una síntesis general, proceso que no precisa de ellos que sean consistentes [Marques Martins, 2008]. De hecho, la información obtenida es generalmente redundante y más o menos inconsistente. Las matrices de comparaciones por pares contienen juicios redundantes en el sentido de que en una matriz de tamaño $n \times n$ se suelen emitir $n \cdot (n - 1)/2$ juicios (ya que conocido un término a_{ij} se obtiene fácilmente el término a_{ji} por la propiedad de reciprocidad, es decir, $a_{ji}=a_{ij}^{-1}$), cuando de hecho solo se necesitarían $n - 1$ juicios si se utilizase el álgebra (pues si se conoce el término a_{ij} y el término a_{jk} es posible conocer, mediante sencillos cálculos, el término a_{ik}). Esta diferencia en el número de juicios supone tiempo invertido que se podría haber evitado y puede producir inconsistencias dentro de la matriz. Sin embargo, desde otro punto de vista, esta redundancia resulta útil para mejorar la exactitud de los juicios y se aprovecha para, mediante la técnica matemática, reducir los errores y mejorar la consistencia de la matriz [Saaty, 1994].

De hecho, la **consistencia** de los juicios solo se revela al final del proceso, esto es, cuando se realiza la síntesis de las prioridades relativas de los criterios con las preferencias de las alternativas por criterio, mediante el cálculo del autovector (*eigenvector*) principal, el cual, una vez normalizado, establece los pesos (w_j) que a su vez proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores [Saaty, 1980], como más adelante se verá. Después de este cálculo, es posible verificar la consistencia de los resultados a partir de los parámetros de las matrices de comparaciones relativas de prioridades locales o de preferencias de las alternativas del proceso y de los valores de las componentes del autovector de prioridades globales [Marques Martins, 2008].

Por último, una vez evaluada la contribución de cada elemento a los elementos del nivel de la jerarquía inmediatamente superior, se calcula la contribución global de cada alternativa al objetivo principal o meta mediante una **agregación de tipo aditivo**. Estas puntuaciones multicriterio globales, denominadas puntuaciones finales, permiten establecer un orden global (o estructura global de preferencia) definida sobre el conjunto de alternativas [Saaty, 1994].

En resumen, los **fundamentos teóricos** del AHP son los siguientes:

- La estructuración del modelo jerárquico (representación del problema mediante identificación de meta, criterios, subcriterios y alternativas).
- Priorización de los elementos del modelo jerárquico.
- Comparaciones binarias entre los elementos.
- Evaluación de los elementos mediante asignación de pesos.
- Ranking de las alternativas de acuerdo con los pesos dados.
- Síntesis.
- Análisis de sensibilidad.

Sus **axiomas básicos** se formulan como sigue [Saaty, 1985; Vargas, 1990; Saaty, 1994]:

- Axioma 1: Reciprocidad. Referente a la condición de juicios recíprocos: el decisor (o expertos) debe ser capaz de realizar comparaciones y establecer la fuerza de sus preferencias. La intensidad de estas preferencias debe satisfacer la condición recíproca: «Si A es x veces preferido que B, entonces B es $1/x$ veces preferido que A».
- Axioma 2: Homogeneidad. Referente a la condición de homogeneidad de los elementos: los elementos que se comparan son del mismo orden de magnitud, es decir, las preferencias se representan por medio de una escala limitada.

- Axioma 3: Dependencia. Referente a la condición de estructura jerárquica o estructura: dependencia en los elementos de dos niveles consecutivos en la jerarquía y dentro de un mismo nivel.
- Axioma 4: Expectativas. Referente a la condición de expectativas de orden de rango: las expectativas deben estar representadas en la estructura en términos de criterios y alternativas y para el propósito de la toma de una decisión, se asume que la jerarquía es completa.

Antes de proceder al desarrollo de la metodología del AHP, cabe citar una variante del mismo, el ANP (*Analytical Network Process*), que aporta un esquema para la introducción de juicios que permiten la incorporación de interdependencias y retroalimentación [Saaty, 2006]. Estos juicios se derivan de una escala de prioridades previamente establecida y adicionalmente se hacen unas comparaciones por pares para obtener prioridades. Este método está dividido en dos partes: la primera es un control de jerarquía o de red de objetivos y criterios que controlan las interacciones del sistema bajo estudio; la segunda corresponde a muchas subredes que pertenecen a cada criterio. El ANP ha sido aplicado a una gran variedad de decisiones: construcción, industria, sector empresarial, marketing, medicina, social y medioambiental entre otros [Arancibia *et al.*, 2003].

2.4.2. Metodología del proceso analítico jerárquico.

Las etapas generales del AHP propuestas por Saaty en su formulación inicial son cuatro [Saaty, 1980; Saaty, 1990; Saaty, 1994; Sánchez Guerrero, 2003; Saaty, 2006; Marques Martins, 2008; Cables Pérez, 2011], como se muestra en la figura 2.17:

Primera etapa: Representación modelización del problema («Modelización»).

Una vez se ha identificado el problema o situación que se desea resolver mediante la selección o priorización de alternativas, se representa mediante la construcción de una estructura jerárquica de al menos tres niveles, en forma de diagrama de árbol, en el que

quedan representados todos los aspectos considerados relevantes en el proceso de resolución, resultando una jerarquía completa, representativa, no redundante y minimalista como la que se muestra en la figura 2.18.

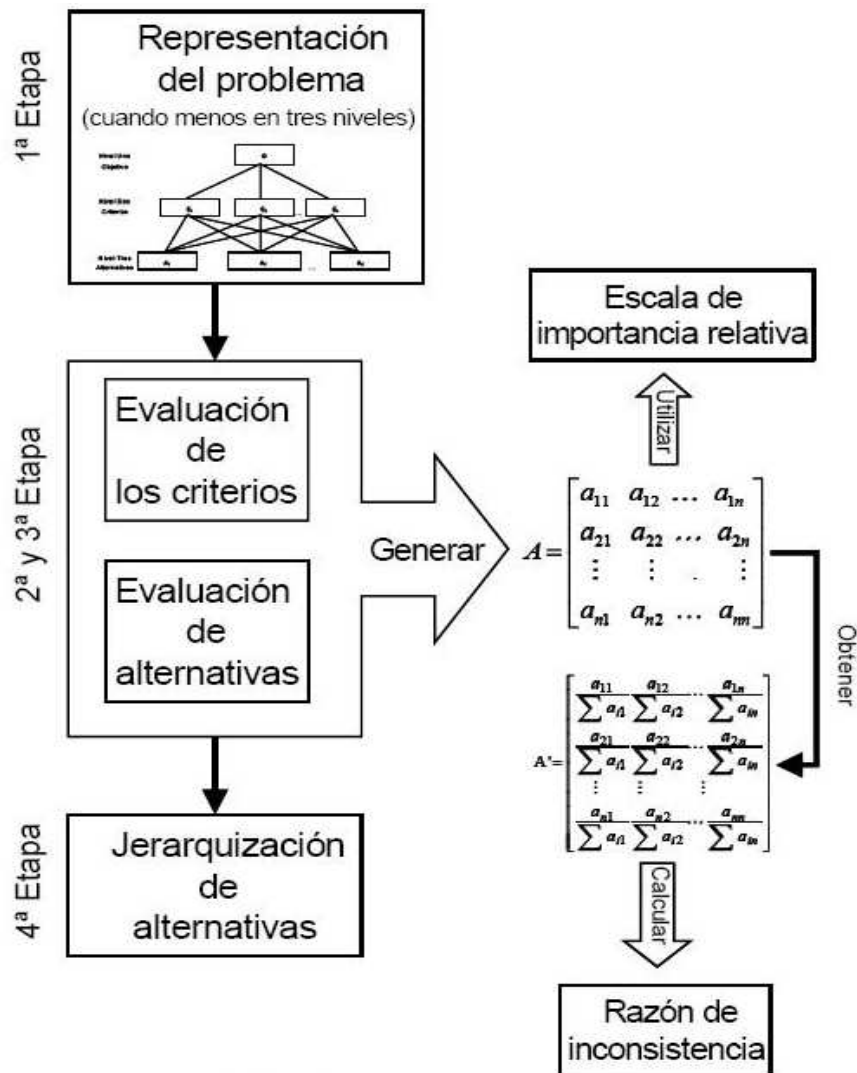


Figura 2.17. Procedimiento para realizar la jerarquización analítica en el AHP. Fuente: [Sánchez Guerrero, 2003].

La jerarquía implica una clasificación ordinal donde los niveles están subordinados entre sí, mediante alguna base definida. Este arreglo arbóreo se forma con los tres factores básicos para la toma de decisiones: las alternativas que serán sujetas de valoración (llámense actividades, estrategias, proyectos, cursos de acción, etc.), el objetivo o meta que se pretende alcanzar y los criterios de valoración con los que se tendrán que valorar las alternativas. Por supuesto, previamente a la construcción de la jerarquía, se requiere un

análisis exhaustivo y detallado del problema con el fin de identificar, aparte de la meta que se persigue, los criterios que afectan significativamente al objetivo y expresan las preferencias de los implicados en la toma de decisión, así como la formulación de las alternativas, que deben constituir propuestas factibles mediante las cuales se puede alcanzar el objetivo general. La selección adecuada de los criterios importantes para el problema constituye un paso fundamental, como en cualquier proceso de toma de decisión, ya que un planteamiento inadecuado de los mismos puede llevar a resultados poco satisfactorios o incluso a invalidar todo el proceso.

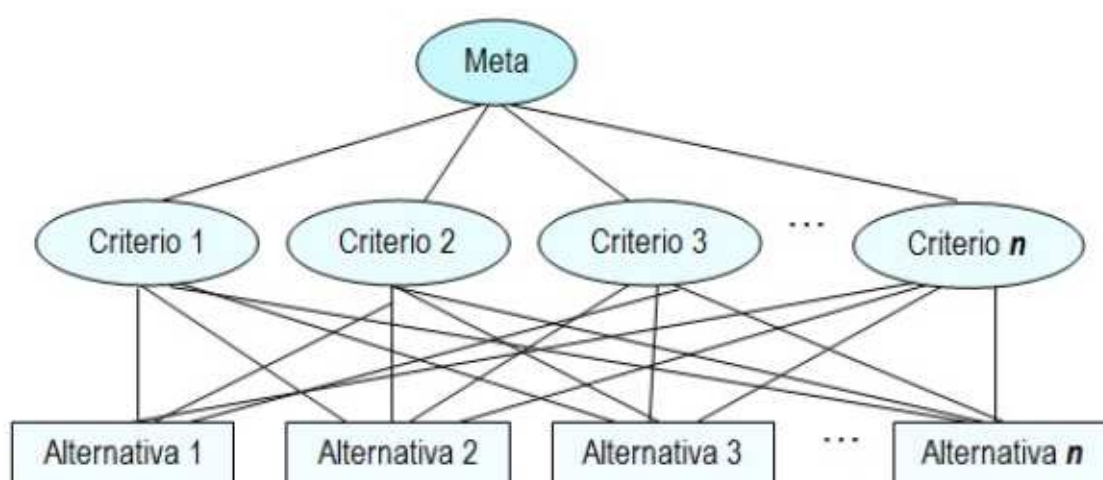


Figura 2.18: Representación del modelo AHP. Fuente: [Cables Pérez, 2011].

Una vez definidos los criterios puede darse el caso de que estos a su vez se puedan descomponer en otros subcriterios formando otra jerarquía descendente. Durante la construcción de esta jerarquía de criterios y subcriterios se debe analizar el problema en profundidad con el fin de representarlo de la forma más completa y global posible (aunque dejando abierta la posibilidad de algunos cambios en los elementos), considerar el entorno que rodea al problema e identificar los atributos que contribuyen a la solución.

El árbol no se limita a un número de niveles ni de elementos por nivel, sin embargo se sugiere un máximo de cuatro niveles y se recomienda que los criterios no sean más de 9, siendo deseable la utilización de 3 a 7 criterios, para que el método sea fiable. Conviene vigilar que tanto las alternativas como los criterios procuren tener el mismo nivel de complejidad y ser mutuamente excluyentes, de lo contrario se pueden producir problemas de consistencia.

Segunda etapa. Evaluación de los criterios de valoración («Valoración»).

En esta etapa se construye una matriz A, llamada matriz de criterios, a partir de la comparación de los diferentes criterios con el propósito de estimar la importancia relativa entre cada uno de ellos. La matriz A es cuadrada de dimensión $n \times n$, siendo n el número de criterios, y tiene la forma representada en la figura 2.19.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

Figura 2.19: Representación de la matriz de criterios del AHP. Fuente: elaboración propia.

Además, la matriz A presenta la propiedad de que $a_{ji}=1/a_{ij}$, es decir, es simétrica inversa (se trata de matrices donde los elementos de la diagonal superior son los inversos de la diagonal inferior), y $a_{ii}=1$ (por supuesto, las calificaciones en la diagonal principal de la matriz siempre tendrán valor 1, esto es, al compararse un elemento consigo mismo mantiene igual importancia). Todo ello como resultado del axioma de comparación recíproca que ya se ha comentado.

A cada comparación se le asignará una calificación según la escala de importancia relativa propuesta por Saaty para las diferentes comparaciones. Para facilitar el proceso de asignación de juicios y evaluaciones se recomienda priorizar previamente los elementos del modelo, para de este modo realizar las comparaciones binarias siempre de un elemento respecto de los menos importantes, puesto que cuando se comparan dos elementos, la mayoría de los individuos prefieren formular una apreciación que represente sus preferencias mediante un número entero.

Como se ve, los juicios son la base del proceso llevado a cabo por AHP, por lo que se debe prestar especial atención a los mismos. Los juicios deben estar guiados por información científica, técnica y la dada por la experiencia y conocimientos útiles de

expertos que puedan asesorar al grupo decisor para evaluar los diferentes componentes del modelo. Es esta situación lo que hace al AHP diferente a otros métodos, puesto que dentro de la evaluación del modelo se tienen en cuenta los juicios, que en este caso son las opiniones de expertos especializados en la toma de decisión.

Es necesario señalar la conveniencia de ser consistentes al establecer la importancia relativa entre los elementos de cada nivel. Por ejemplo, si el criterio es «la dureza» y se dice que el diamante es tres veces más duro que el cuarzo y que el cuarzo es cinco veces más duro que el yeso; entonces, para ser consistentes, el diamante es ocho veces más duro que el yeso. Si se dice que el diamante es cinco veces más duro que el yeso, se estará cayendo en inconsistencia; por lo que se tendrá la necesidad de repetir la asignación de calificaciones (importancias relativas), si se desea obtener mayor exactitud.

Tercera etapa: determinación de los pesos de los criterios («Priorización»).

El objetivo de este paso es construir un vector de prioridades o pesos que evalúe la importancia relativa que la unidad decisor otorga a cada criterio, en este caso, mediante la asignación indirecta que caracteriza al AHP.

Una vez llena la matriz A con las respectivas calificaciones, se procede a estimar los correspondientes pesos relativos de los criterios W . En efecto, si se define el vector que contiene las ponderaciones de los criterios w_i como $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, se verifica que $A \cdot W = \rho \cdot W$, y por lo tanto ρ es el autovalor dominante de A , en tanto que W es su autovector asociado o vector característico (*eigenvector*). Dicho de otro modo, Saaty sostiene que es el autovector propio o dominante de cada matriz el que resume los pesos de cada elemento. Esta suposición está sólidamente fundamentada, puesto que, de hecho, si los juicios aportados por los expertos resultan transitivos, entonces cada puntuación puede entenderse como el cociente entre los pesos de los elementos comparados. Formalmente, esto es $a_{ij} = w_i / w_j$ y bajo esas condiciones se verifica lo anterior.

Una estimación para su cálculo se presenta a continuación, basada en la resolución del sistema homogéneo de ecuaciones $A \cdot W = \rho \cdot W$ ó $(A - \rho \cdot I) \cdot W = 0$. Este sistema tiene una solución no trivial si y solo si el determinante de $A - \rho \cdot I$ es nulo, o sea, ρ es un

autovalor de A. Puesto que A tiene rango unitario, ya que cada fila es un múltiplo constante de la primera fila, todos sus autovalores excepto uno son cero. La suma de los autovalores de una matriz es igual a su traza, la suma de sus elementos diagonales, y en este caso la traza de A es igual a n. Por lo tanto, n es el autovalor propio de A, y el sistema de ecuaciones tiene una solución no trivial, el vector propio asociado W. La solución consiste en entradas positivas y es única dentro de una constante multiplicativa [Barba-Romero y Pomerol, 1997].

Para obtener un único valor de W, se normaliza la matriz A, obteniéndose A'. Para ello, por columna, cada calificación de la matriz A se divide entre el total de su respectiva columna, formándose la matriz normalizada A' (figura 2.20).

$$A' = \begin{pmatrix} \frac{a_{11}}{\sum_i a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum_i a_{i2}} & \dots & \frac{a_{1j}}{\sum_i a_{ij}} & \dots & \frac{a_{1n}}{\sum_i a_{in}} \\ \frac{a_{21}}{\sum_i a_{i1}} & \frac{a_{22}}{\sum_i a_{i2}} & \dots & \frac{a_{2j}}{\sum_i a_{ij}} & \dots & \frac{a_{2n}}{\sum_i a_{in}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{a_{i1}}{\sum_i a_{i1}} & \frac{a_{i2}}{\sum_i a_{i2}} & \dots & \frac{a_{ij}}{\sum_i a_{ij}} & \dots & \frac{a_{in}}{\sum_i a_{in}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{a_{n1}}{\sum_i a_{i1}} & \frac{a_{n2}}{\sum_i a_{i2}} & \dots & \frac{a_{nj}}{\sum_i a_{ij}} & \dots & \frac{a_{nn}}{\sum_i a_{in}} \end{pmatrix}$$

Figura 2.20: Representación de la matriz de criterios normalizada del AHP. Fuente: elaboración propia.

A continuación se calcula el promedio de cada fila de la matriz A', de la fila 1 hasta la fila n, y se obtiene la matriz W de los pesos relativos o *eigenvector*, que con frecuencia se coloca al lado derecho de la matriz A.

Si en la modelización del problema de decisión como una jerarquía se ha considerado la descomposición de algunos o todos los criterios en subcriterios, antes de continuar debe calcularse el vector de pesos global asociado a dichos subcriterios. El procedimiento es el mismo que el descrito, pero en este caso se deberán realizar las

comparaciones pareadas entre subcriterios para determinar su importancia relativa respecto al criterio inmediatamente superior en la jerarquía. De este modo, es posible calcular el vector de pesos asociados a un conjunto de subcriterios respecto a su criterio «padre». Es lo que se denomina prioridad local.

Una vez calculada la importancia relativa de los criterios respecto a la meta del problema y la importancia relativa de los subcriterios respecto al criterio del que dependen, para calcular la importancia relativa global de cada subcriterio respecto a la meta del problema bastará con aplicar el principio de composición jerárquica, realizando el producto de los diferentes pesos de cada uno de los criterios y subcriterios que se recorran en la jerarquía desde el subcriterio del que se quiere calcular su peso hasta la cúspide de la jerarquía.

Se ha apuntado que esta propiedad de la matriz A por la que su autovector es el vector de pesos se verifica puesto que los juicios contenidos en ella son transitivos. Sin embargo, en la realidad los juicios difícilmente son transitivos, por lo que la igualdad $A \cdot W = \rho \cdot W$ no se cumple estrictamente. De todos modos, como la matriz A es simétrica, recíproca y definida positiva sí existe un único autovalor, que cumple la condición $\rho \geq n$, y existe un vector propio, cuyas componentes son positivas, asociado a este autovalor, que se considera una aproximación al vector de prioridades. La incongruencia entre los juicios puede denominarse inconsistencia, cuyo grado puede estimarse mediante la denominada razón de consistencia RC , que puede entenderse como el grado de incoherencia que se comete al calificar la importancia relativa de los criterios y alternativas de un problema. Una práctica común es colocarla en el parte inferior de cada matriz de comparaciones A con el propósito de vigilar la consistencia en las calificaciones. La razón de consistencia RC se calcula dividiendo el índice de consistencia (IC) entre el índice de consistencia aleatorio o *randómico* (IR), con IR obtenido de la tabla 2.5. Es decir,

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (ec. 2.22)$$

El índice de consistencia aleatorio (IR) se define como el índice de consistencia aleatorio medio obtenido mediante la simulación de 100.000 matrices recíprocas generadas

2. HERRAMIENTAS Y MARCO DE TRABAJO

aleatoriamente utilizando la escala de Saaty (1/9, 1/8, ..., 1, ..., 8, 9) [Aguarón and Moreno-Jimenez, 2003].

Tabla 2.5: Índice de Consistencia Aleatorio. Fuente: [Saaty, 1980].

| n (= número de elementos de la diagonal principal) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Índice de Consistencia Aleatorio (IR) | 0 | 0 | 0.52 | 0.89 | 1.11 | 1.25 | 1.35 | 1.40 | 1.45 | 1.49 |

El cálculo del índice de consistencia IC se obtiene como sigue:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (ec. 2.23)$$

donde λ_{\max} es el valor característico promedio.

n es el tamaño de la matriz.

Como se ve, cuanto más próximo esté el valor λ_{\max} a n, siendo n la dimensión de la matriz, mayor es la consistencia de los juicios. El resto de autovalores deben estar próximos a cero.

Para calcular λ_{\max} se realiza el producto del vector propio principal normalizado W por la matriz de comparación de factores A, obteniendo así un nuevo vector, en el cual se divide cada uno de sus componentes entre su correspondiente vector propio principal normalizado. Como consecuencia de estas operaciones, se obtiene un segundo nuevo vector, en el cual se suman sus componentes y se dividen posteriormente entre n, obteniendo así su valor promedio, que coincide con λ_{\max} , que se utiliza en la estimación de la consistencia como un reflejo de la proporcionalidad de las preferencias implícitas en los juicios de valor asignados.

Teniendo esta estimación se procede al cálculo del IC y la RC de acuerdo con la ecuación 2.22. Si la razón es considerablemente mayor a un 10%, se recomienda estudiar de nuevo el problema y revisar los juicios emitidos. Para n = 3 el umbral se fija en 0,05 y para n = 4 en 0,08. En la práctica, esto da lugar a un proceso de sucesivas correcciones.

Cuarta etapa. Evaluación y jerarquización de las alternativas («Síntesis»).

Una vez obtenida la ponderación de los criterios y subcriterios en los pasos anteriores, se procede a la valoración de las alternativas para así poder calcular las prioridades locales correspondientes. Para ello, con cada criterio o subcriterio del último nivel de la jerarquía se plantea la matriz R de juicios por comparación pareada entre alternativas. El procedimiento es el mismo que el explicado en la etapa anterior, pero esta vez se establece el nivel de prioridad de una alternativa sobre otra tomando como base de comparación el grado de cumplimiento o satisfacción de cada criterio o subcriterio. La escala a utilizar es la misma también.

Una vez planteada la matriz R de comparación entre alternativas, se procede como ya se ha comentado: se calcula el autovalor máximo de la matriz R, el vector propio asociado, y el índice de consistencia de los juicios. Una vez realizadas estas operaciones, si la razón de consistencia es aceptable, para cada criterio o subcriterio se obtiene un vector de pesos locales de las alternativas, que corresponde con el autovector calculado. Toda esta información, se puede presentar en la siguiente matriz, que recibe el nombre de matriz de valoración (figura 2.21).

$$R = \begin{array}{cccccc} & & & w_1 & w_2 & \dots & w_j & \dots & w_n \\ & & & C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_n \\ A_1 & \left(\begin{array}{cccccc} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} & \dots & r_{1n} \end{array} \right. \\ A_2 & \left. \begin{array}{cccccc} r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2j} & \dots & r_{2n} \end{array} \right. \\ \dots & \left. \begin{array}{cccccc} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{array} \right. \\ A_i & \left. \begin{array}{cccccc} r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} & \dots & r_{in} \end{array} \right. \\ \dots & \left. \begin{array}{cccccc} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{array} \right. \\ A_m & \left. \begin{array}{cccccc} r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mj} & \dots & r_{mn} \end{array} \right) \end{array}$$

Figura 2.21: Representación de una matriz de valoración de alternativas del AHP. Fuente: elaboración propia.

Una vez que se dispone de toda la información de la matriz de valoración, para finalizar el AHP y conocer qué alternativa es la más importante de acuerdo a los criterios establecidos solo resta aplicar cualquiera de los métodos de la bibliografía para calcular las

prioridades totales asociadas a cada alternativa, que representan la importancia de las alternativas con respecto a la meta. Saaty propone que el método a utilizar sea el método de la suma ponderada, que en este caso no es más que multiplicar cada una de las componentes de la matriz de pesos de los criterios por la correspondiente matriz de pesos de cada una de las matrices de las alternativas. Sin embargo, también se pueden emplear otros métodos, bien de la misma familia, como el TOPSIS, o incluso de sobreclasificación, como el ELECTRE.

Para terminar, suele realizarse un análisis de sensibilidad que confirme que realmente los resultados obtenidos son robustos y no son fruto del azar. Para ello, se examina el grado de sensibilidad del resultado obtenido en la decisión al realizar cambios en las prioridades de los criterios del problema. Lo que se lleva a cabo son variaciones en el valor de un peso (no mayores al 10%) manteniendo las proporciones de las prioridades de los otros criterios (de manera que todos ellos, incluido el criterio alterado, al modificarse sigan sumando la unidad), y se observa numérica y gráficamente cómo este cambio afecta al resto de pesos del problema y a la priorización de alternativas.

En la figura 2.22 se representa un **diagrama de flujo de aplicación del AHP**.

2.4.3. Ventajas e inconvenientes.

El AHP se ha convertido desde su origen en uno de los métodos multicriterio y de ponderación de criterios más utilizado, sobre todo para formalizar problemas de toma de decisión para un número limitado de alternativas u opciones, cada una con una cantidad también limitada de criterios, algunos de los cuales tenían problemas en ser formalizados [Saaty, 1980; Marques Martins, 2008].

Por esa razón, el AHP es muy utilizado en problemas reales, donde una de las ventajas principales radica en la facilidad que brinda para el manejo de criterios múltiples, además de su fácil comprensión [Hwang and Yoon, 1981; Mahmoodzadeh *et al.*, 2007]. Ha sido utilizado mundialmente para ayudar a los procesos de decisión considerando los

finés más diversos, desde el análisis del terrorismo hasta la disposición de recursos en cuestiones gubernamentales. De los resultados obtenidos en estas experiencias pueden deducirse algunas de sus ventajas e inconvenientes más importantes.

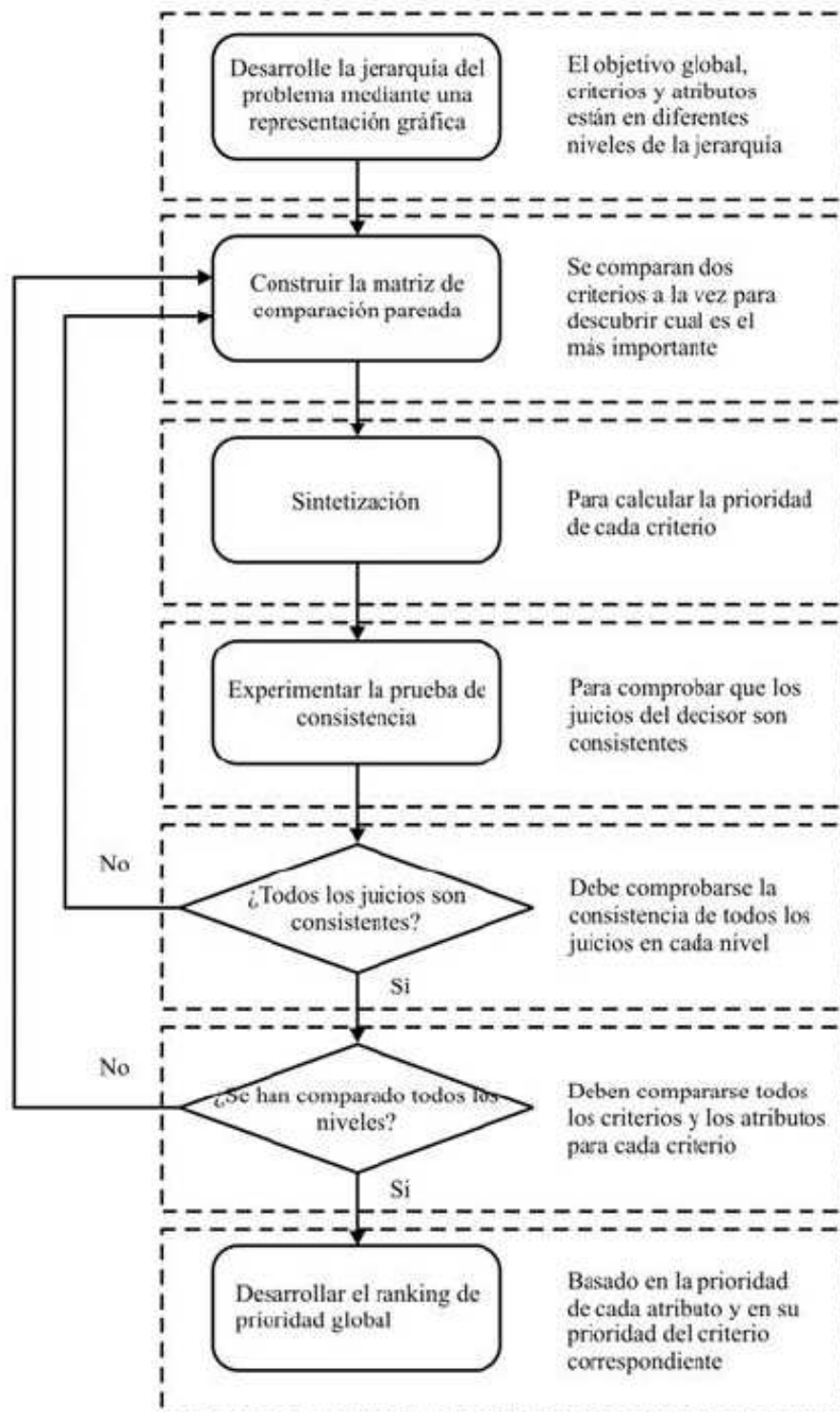


Figura 2.22. Diagrama de flujo del AHP. Fuente: [Ho et al., 2006].

Algunas de las áreas donde el AHP tiene **aplicaciones** son: economía y problemas administrativos (diseño, arquitectura, finanzas, formulación de estrategias de mercado, planificación estratégica, priorización de planes de proyectos, evaluación comparativa, selección de carteras de valores, previsión, localización de recursos, análisis de coste/beneficio, gestión ambiental, análisis de inversiones, etc.), problemas políticos (resolución de conflictos y negociaciones, juegos de guerra...), problemas sociales (educación, derecho, sector público, medicina, comportamiento en competición, contratación y evaluación de rendimiento de profesionales, etc.), problemas tecnológicos (selección de mercado, tecnología de transferencia, selección de proveedores, satisfacción del cliente, calidad...), etc. [Sánchez Guerrero, 2003; Marques Martins, 2008].

Además, el propio Saaty refiere que hasta 2008 se han realizado centenares de aplicaciones del AHP por parte de equipos de investigación y desarrollo pertenecientes a universidades, empresas y gobiernos [Saaty, 2008], entre ellas se puede citar su uso por IBM para seleccionar su estrategia de mejora de la calidad para diseñar el sistema AS/400. En 2001 fue utilizado para seleccionar el mejor lugar para reedificar la ciudad turca de Adapazari destruida por un terremoto. British Airways lo usó en 1998 para seleccionar el sistema de entrenamiento para su flota de aviones. En 1987 se utilizó para seleccionar el mejor tipo de plataforma de extracción petrolera que sería necesario construir en el Atlántico Norte. Xerox Corporation utilizó el AHP, en 1999, para seleccionar sus proyectos de investigación de forma que se ajustaran al presupuesto disponible. En ese mismo año, Ford Motor Company también empleó el AHP para establecer las prioridades a la hora de lograr una mayor satisfacción del cliente con sus productos y servicios.

Más recientemente también se encuentran aplicaciones del AHP, sin integración con otras técnicas, para resolver problemas de selección de proveedores, materiales, tecnología y maquinaria. Entre dichas aplicaciones se pueden mencionar: selección de proveedores para una empresa de construcción [Bayazit *et al.*, 2006], selección de una tecnología de red de acceso inalámbrica [Martín y Moreno, 2007], selección de sistemas automáticos para edificios inteligentes [Wong and Li, 2008], evaluación de alternativas tecnológicas y operativas para la recogida de aceite en la industria petrolera [Castillo *et al.*, 2009], selección de sistemas de limpieza para motores [García-Cascales and Lamata, 2009], selección de paquetes de software [Jadhav and Sonar, 2009], selección de

tecnologías nucleares [Lee and Hwang, 2010], valoración de técnicas de depuración de aguas residuales [Bottero *et al.*, 2011], evaluación de combustibles alternativos [Tsita and Pilavachi, 2012], entre muchas otras.

Por tanto, algunas de las **ventajas** del AHP frente a otros métodos de decisión multicriterio son [Harker and Vargas, 1987; Tung and Tang, 1998; Beynon, 2002; Condon, 2002; García-Cascales, 2009; Mellinas Fernández, 2012; Aruldoss *et al.*, 2013; Oltean-Dumbrava *et al.*, 2013]:

- Es una de las pocas técnicas multicriterio que ofrece una axiomática teórica.
- Es una de las técnicas multicriterio que mejor comportamiento práctico tiene, habiendo comparado con 5 modelos para determinar pesos y prioridades, encontró que el AHP produjo los resultados más fiables de todos los modelos probados.
- Presenta un sustento matemático.
- Proporciona un modelo único fácilmente comprensible, flexible, para una amplia gama de problemas estructurados y permite que su solución se pueda complementar con métodos matemáticos de optimización.
- El AHP, con su sistema de jerarquías, refleja la tendencia natural de la mente a clasificar elementos de un sistema en diferentes niveles y a agrupar elementos similares en cada nivel.
- Permite manejar problemas complejos de la vida real, integrando enfoques deductivos y de sistemas para desglosar y analizar los problemas por partes.
- Permite medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común.
- Incluye la participación de diferentes personas o grupos de interés y generar un consenso, al facilitar la comunicación entre ellos y sintetizar un resultado representativo de diversos juicios.
- Permite verificar el índice de consistencia y hacer las correcciones, si es el caso, con lo que permite que los expertos o decisores afinen su definición del problema y mejoren su juicio y comprensión mediante la repetición del proceso.

- Genera una síntesis y da la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad.
- Se obtienen pesos asignados a cada uno de los elementos, los cuales son usados como criterio de decisión y para establecer.
- Con su síntesis el AHP conduce a una estimación completa de la conveniencia de cada alternativa al tomar en consideración las prioridades relativas de los factores en el sistema. Como resultado, permite seleccionar la mejor alternativa en virtud del objetivo marcado.
- El uso de ordenadores permite obtener el análisis de sensibilidad en los resultados.

Por todas estas ventajas que el AHP presenta frente a otros métodos de decisión multicriterio, especialmente por su potencia para el establecimiento de los pesos de los criterios y su fácil e intuitiva implementación, se ha elegido este método para resolver el problema de las ponderaciones que deben ser encontradas en esta tesis. No obstante, el método AHP, como les sucede a todas las aproximaciones multicriterio discretas, también presenta una serie de **inconvenientes** o controversias en su metodología que todavía permanecen abiertas en la literatura, pero que en el caso en que va a ser empleado en esta tesis no invalidan su utilización, como se comenta en cada uno de ellos. Las más destacables se citan a continuación [Sánchez Guerrero, 2003; García-Cascales, 2009; Mellinas Fernández, 2012; Aruldoss *et al.*, 2013; Oltean-Dumbrava *et al.*, 2013]:

- En primer lugar, cabe decir que, al igual que las demás técnicas de decisión multicriterio, el AHP es solo un apoyo a la toma de decisiones, por lo que además de combinarse con otros instrumentos similares, deberán seguir un proceso metodológico de toma de decisiones. Es decir, la metodología elegida no elimina al decisor, sino que lo ayuda, circunstancia que es perfectamente lógica en un proceso de toma de decisiones en ingeniería y planificación, donde finalmente el parecer último y primordial de la persona no puede ser excluido. Además, como se verá, en esta tesis el AHP va a ser empleado solo como método de ponderación de criterios, dejando la ordenación de alternativas para otros métodos multicriterio, con la idea de generar una metodología genérica.

- En algunos escenarios es complicado alcanzar la justificación de la dependencia exigida en la modelización jerárquica. Sin embargo, en el problema abordado aquí existen objetivos claramente marcados, derivados de las deficiencias que se han detectado de la experiencia práctica y de la literatura especializada en la materia, de donde se extraerán los criterios y subcriterios de una forma razonada, precisamente a partir del análisis de la relación entre dichos objetivos y las alternativas técnicas contra el ruido en carreteras. Obviamente, la jerarquía de criterios y subcriterios será ampliamente discutida con el fin de poder presentar la mejor posible a la luz de los conocimientos adquiridos durante la investigación.
- La transitividad supuesta en el procedimiento para asignar una calificación a partir de la escala de importancia relativa (si A es preferible a B y B es preferible a C, entonces A es preferible a C) puede ser un factor limitante en algunos casos, pero para el análisis del problema objetivo de esta investigación no lo es, ya que en la realidad que involucra este hecho debe darse.
- La escala fundamental empleada para expresar los juicios relativos en las comparaciones pareadas puede que no se adapte a la intensidad de preferencia proporcionada por las respuestas. Por esta razón, la escala de importancia relativa puede ser modificada de acuerdo a los intereses y necesidades del decisor y a las circunstancias particulares durante su aplicación. Un estudio concreto de este hecho será presentado durante la aplicación de la técnica al desarrollo de la metodología perseguida.
- Los procedimientos de priorización de los elementos mediante el cálculo del autovector son aproximados, circunstancia que es asumida por el proceso, al estar dentro de valoraciones imprecisas y de un campo estrictamente no exacto ni rígido, por lo que dichas aproximaciones son aceptables, toda vez, que como se verá en el subapartado siguiente, se utilizará la teoría de los conjuntos difusos para su representación.
- La forma de evaluar la consistencia de los juicios emitidos. De hecho, deben vigilarse especialmente los resultados cuando únicamente se comparan dos elementos en total, ya que se produce una gran inconsistencia. Este problema

radica en el principal inconveniente del proceso, la subjetividad de los juicios emitidos en las comparaciones pareadas, que obviamente siempre estará presente en un estudio de este tipo, pero en el abordaje que se plantea en la presente tesis doctoral se intentará minimizar mediante la técnica del panel de expertos, que se trata más adelante.

- La interpretación de las prioridades totales obtenidas en el procedimiento puede resultar confusa en determinados casos, aunque en este trabajo no llegará a presentarse, al no llegar a ese nivel de la jerarquía de priorización mediante esta técnica.
- El problema del cambio de rango, es decir, la introducción de una nueva alternativa puede hacer variar la estructura de preferencias del decisor, o poner de manifiesto alguna inconsistencia en los juicios. Esta es la otra desventaja principal del método, sobre la que atacan igualmente sus detractores, y que de cualquier forma estará presente, aunque cuando se utiliza solo como técnica de ponderación de criterios no se presenta.

Cabe destacar, finalmente, que diversos autores han realizado estudios comparativos, en los cuales se busca comparar el AHP con otros métodos de decisión multicriterio discretos (Teoría del Valor Multiatributo, ELECTRE, PROMETHEE, etc.). En este contexto, Brugha muestra que el AHP requiere un mayor esfuerzo cognitivo y ofrece mayores ventajas para visualizar, ordenar y escoger la mejor solución entre diversas alternativas [Brugha, 2004]; esto último lo ratifica el análisis de Cho que realiza la comparación detallada de los datos por parejas, concluyendo que el AHP presenta la mejor selección de alternativas [Cho, 2003]. Ambos estudios ratifican la superioridad del AHP sobre otros métodos para resolver problemas que implican una decisión multicriterio.

Por todo lo anterior, se puede concluir que el AHP se caracteriza por ser muy apropiado en problemas de decisión en que se requiere gran fiabilidad y flexibilidad, aunque se trata de un método complejo y con alta inversión en tiempo [Alarcón, 2005]. Sin embargo, ordenar muchos criterios puede ser una tarea muy complicada para el decisor y por eso el AHP puede ser una técnica para la asignación de pesos que supere estas dificultades consiguiendo mejores fiabilidades [Romero, 1996], hecho que también queda

patente por el hecho de que este método se haya extendido al ambiente de la decisión difusa [Banai, 1993; Siddiqui *et al.*, 1996] o a la programación matemática.

Tabla 2.6. Comparación de métodos para asignación de pesos. Fuente: adaptado de [Alarcón, 2005].

| Método | Complejidad de cálculo | Inversión de tiempo | Fiabilidad | Alcance |
|------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------------------|
| Análisis multicriterio | Sencilla | Mínima | Baja | Pequeños proyectos |
| Utilidad multiatributo | Compleja | Máxima | Media | Pequeños y medianos proyectos |
| ELECTRE III | Compleja | Máxima | Media | Medianos y grandes proyectos |
| AHP | Compleja | Máxima | Alta | Medianos y grandes proyectos |

Así, a continuación se estudiará la variante difusa de este método, que será la utilizada para realizar la ponderación de criterios en los problemas analizados en la presente tesis.

2.4.4. Método de jerarquías analíticas difuso.

Como se ha visto, el AHP es muy utilizado como modelo de decisión, por la forma en que trata los criterios múltiples, por su fácil comprensión y operatoria con datos cualitativos y cuantitativos.

Sin embargo, independientemente de las ventajas que posee este método, no refleja la forma del pensamiento humano [Kahraman *et al.*, 2003; García-Cascales and Lamata, 2008; Cables Pérez, 2011], puesto que el modelo de evaluación humano es incierto e impreciso, por lo que los expertos pueden mostrarse reacios o incapaces de atribuir valores numéricos exactos a los juicios de comparación [Mikhailov, 2003]. Por ejemplo, a la hora de evaluar la importancia relativa de diferentes criterios, los expertos pueden demostrar

inseguridad en sus evaluaciones, debido a que los datos e informaciones con que cuentan sobre las variables sean vagos y ambiguos.

Así, aunque el AHP haya sido objeto de numerosas investigaciones y el consenso general sea de que no solo es válido, sino también útil en términos prácticos, existen críticas en cuanto a su capacidad de tratar la incertidumbre inherente a los juicios humanos que se realizan durante el proceso. Estas críticas generalmente argumentan que las evaluaciones obtenidas solo representan alguna precisión aritmética y no reflejan el juicio real, que, a pesar de que la escala discreta de Saaty tiene las ventajas de simplicidad y facilidad de uso, ella no tiene en cuenta la incertidumbre asociada con el modelo de percepción humana sobre un número [Marques Martins, 2008].

Este aspecto es exactamente el que torna interesante asociar el AHP con la teoría de los sistemas difusos [Buckley, 1985; Cheng, 1996; Van Laarhoven and Pedrycz, 1983] y realizar una extensión del método con el empleo de la lógica difusa, registrándose en la literatura como **Proceso Jerárquico Analítico Difuso** (FAHP según sus siglas en inglés, *Fuzzy Analytical Hierarchy Process*) o proceso analítico jerárquico extendido con lógica difusa, y así resolver problemas jerárquicos difusos [Kahraman *et al.*, 2003; García-Cascales and Lamata, 2008].

Por esta asociación es posible conferir mayor formalismo matemático al abordaje de la ambigüedad y la incertidumbre de las variables utilizadas en el método, ya que la concepción del FAHP permite la utilización de números difusos en la escala fundamental para conformar expresiones más próximas al lenguaje natural, lo cual se utilizará en la disposición de la matriz de juicios y comparación por pares, de modo que se reduce la imprecisión inherente a los juicios de los expertos [Marques Martins, 2008; Cables Pérez, 2011].

Por tanto, en el FAHP son utilizadas **etiquetas lingüísticas** convenientemente escogidas para evaluar la importancia relativa de atributos, factores, condiciones y/o criterios en comparación con otros del mismo nivel de jerarquía. Es decir, el experto solo tiene que realizar una valoración sobre la importancia del elemento verbalizada en términos cualitativos y después el decisor puede acudir a una escala, que previamente ha

sido definida, para obtener los valores numéricos difusos que se corresponden con su valoración. Por tanto, como paso previo a la resolución del problema de asignación de pesos, el decisor debe definir la correspondencia entre la valoración cualitativa del experto y la asignación difusa. Lo más habitual, como en el método tradicional, es el uso de correspondencias establecidas, dado que la construcción de una función de utilidad propia supone un coste de trabajo muy alto y podría resultar incluso ineficiente en determinadas decisiones [Von Neumann and Morgenstern, 1944; García-Cascales, 2009].

Al efectuar el procedimiento de cálculo de las matrices de juicios, se obtienen los correspondientes vectores de pesos, donde la aritmética con estos números difusos se fundamenta en los principios de la teoría de los conjuntos difusos [Mahmoodzadeh *et al.*, 2007; García-Cascales and Lamata, 2008], puesto que las valoraciones empleadas en la formulación matemática dejan de ser datos *crisp* [Chen and Hwang, 1992]. De este modo, la variante difusa consiste en que si un experto consideraba, por ejemplo, que la variable V_1 es más importante que la variable V_2 en una proporción de 3 a 1 (3/1), ahora este juicio suaviza su valor al de una expresión lingüística como «Aproximadamente de 3 a 1» o «con una importancia entre 2/1 y 4/1», expresiones que son representadas por números difusos triangulares.

A partir de ahí, la metodología del proceso es similar a la del método tradicional, con la salvedad de las herramientas matemáticas empleadas, que deben tener en cuenta que ahora se estará actuando sobre números difusos triangulares. Así, según los creadores del FAHP, una vez creada la matriz de valoraciones constituida por números difusos triangulares, se encuentra un método de media geométrica que sopesa los valores difusos para cada opción, con la conexión jerárquica establecida, y finalmente, una función de pertenencia para cada opción desarrolla el ranking de las prioridades. A partir del vector de pesos difusos debe conseguirse un vector de pesos *crisp*, para lo cual es necesario emplear una de las técnicas de *defuzzificación* existentes (descritas en el apartado 2.1.5), siendo la más común la del centroide difuso. Sin embargo, como se puede observar en la bibliografía de aplicación del FAHP, también está extensamente difundida la utilización del denominado método de **análisis extendido del FAHP**, propuesto por Chang y que se basa en la *defuzzificación* por la medida de la posibilidad, tal y como se describe a continuación [Chang, 1992; Chang, 1996].

Sea $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ un conjunto de objetos, y $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ un conjunto de objetivos. De acuerdo al método de análisis extendido, se tiene cada objeto y se desarrolla el análisis extendido para cada uno de ellos. Por consiguiente, es posible obtener los valores del análisis extendido m para cada objeto, con la siguiente notación: $M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m, i = 1, 2, \dots, n$, donde todos los $M_{g_i}^j$ son números difusos triangulares de la forma (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) . Los pasos clave del modelo extendido propuesto por Chang se resumen como sigue [Büyüközkan *et al.*, 2004; Erensal *et al.*, 2006; Chan *et al.*, 2013]:

Paso 1. El valor del i -ésimo objeto del análisis extendido es definido como:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \cdot \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} \quad (ec. 2.24)$$

Para obtener $\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j$, se debe desarrollar la operación de adición de números difusos de los valores del análisis extendido m para una matriz particular, tal que:

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{j=1}^m l_{ij}, \sum_{j=1}^m m_{ij}, \sum_{j=1}^m u_{ij} \right) \quad (ec. 2.25)$$

Para obtener $\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1}$ se debe desarrollar la operación de adición de números difusos, tal que

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{i=1}^n l_{ij}, \sum_{i=1}^n m_{ij}, \sum_{i=1}^n u_{ij} \right) \quad (ec. 2.26)$$

La matriz inversa de la ecuación anterior se calcula como:

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_{ij}} \right) \quad (ec. 2.27)$$

Paso 2. Se calcula el grado de posibilidad de que $M_2 \geq M_1$, que como se recordará es definido como:

$$V(M_2 \geq M_1) = \sup_{y \geq x} \left[\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y)) \right] \quad (ec. 2.28)$$

Donde existe un par (x, y) de tal forma que $y \geq x$ y $\mu_{M_1}(x) = \mu_{M_2}(y)$, luego se tiene $V(M_2 \geq M_1) = 1$. Dado que $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ y $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ son números difusos convexos, se puede calcular $V(M_2 \geq M_1)$ mediante la ecuación 2.18, que se recuerda que es:

$$V(M_2 \geq M_1) = \begin{cases} 1, & \text{si } m_2 \geq m_1 \\ 0, & \text{si } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (\text{ec. 2.18})$$

Paso 3. El grado de posibilidad para que un número difuso convexo sea mayor que k números convexos M_i , $i = 1, 2, \dots, k$, es definido como $V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \text{ y } (M \geq M_2) \text{ y } \dots \text{ y } (M \geq M_k)] = \min V((M \geq M_i))$, $i = 1, 2, \dots, k$.

Luego, al asumir que $d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k)$, para $k = 1, 2, \dots, n$; $k \neq i$; el vector de pesos está dado por $W = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T$, donde A_i , $i = 1, 2, \dots, n$, son n elementos.

Paso 4. Vía normalización, el vector de pesos normalizado es $W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T$. Donde W no es un número difuso, sino el conjunto de los pesos ponderados de cada matriz.

Posteriormente, una vez alcanzado el vector de pesos, el cálculo del valor característico promedio se realiza de forma similar al método tradicional, pero para obtener la razón de inconsistencia será necesario *defuzzificar* primero el valores de λ_{\max} , para lo cual se utiliza tradicionalmente escogiendo el valor central del número difuso, como ya se estudió anteriormente.

Las investigaciones asociando la lógica difusa con la técnica de jerarquías analíticas son relativamente recientes. En 1978, el propio Saaty exploró interfaces entre jerarquías, objetivos múltiples y conjuntos difusos, estableciendo sobre el asunto, probablemente, las bases para la exploración de otros modelos de AHP difuso [Saaty, 1978].

Sin embargo, uno de los primeros artículos explorando esta asociación de forma más práctica parece haber sido el de [Van Laarhoven and Pedrycz, 1983]. En ese artículo,

titulado “*A fuzzy extension of Saaty's priority theory*”, los autores presentan un método difuso para apoyar la decisión de elección de una entre varias alternativas a partir de varios criterios en conflicto, es decir, una versión difusa del método de comparación por pares de Saaty [Saaty, 1980]. En esta versión, se solicitaba a los decisores que expresaran sus juicios en números difusos triangulares. En un artículo publicado en 1985, Buckley extiende el análisis jerárquico al caso en que los participantes emplean números difusos, en vez de números exactos, en estas comparaciones por pares de criterios. La comparación produjo matrices recíprocas positivas difusas y utilizaron el método de la media geométrica para calcular los pesos difusos de cada matriz difusa, combinando estas de la forma habitual para determinar los pesos finales difusos para las alternativas. Estos pesos finales difusos son usados para priorizar las alternativas [Buckley, 1985].

Ejemplos de utilización de este método jerárquico difuso se encuentran abundantemente en la literatura [Marques Martins, 2008], pero se pueden destacar, entre otros, los siguientes:

- [Mon *et al.*, 1994] desarrollaron un método para evaluar sistemas de armamento usando un FAHP basado en cálculos entrópicos de pesos.
- [Chen, 1996], para el mismo problema, propuso un método modificado, usando operaciones aritméticas simplificadas de números difusos, en lugar de los cálculos entrópicos de Mon.
- [Weck *et al.*, 1997] desarrollaron un método para evaluar diferentes ciclos alternativos de producción, integrando la matemática de la lógica difusa con el clásico proceso AHP. Cualquier ciclo de producción evaluado de esta manera genera un conjunto difuso. El resultado puede ser finalmente *defuzzificado* por la formación del centroide de cualquiera de los conjuntos difusos encontrados y los círculos alternativos de producción investigados pueden ordenarse jerárquicamente en términos de los objetivos generales del problema.
- [Kuo *et al.*, 1999] desarrollaron un sistema de soporte a la decisión para seleccionar localizaciones de nuevas tiendas de conveniencia por medio de un modelo FAHP. El sistema propuesto consiste en cuatro componentes: (1)

desarrolla una estructura jerárquica para un FAHP, (2) determina las ponderaciones, (3) reúne los datos y (4) toma la decisión.

- Por su parte, [Chen, 2001] propone un nuevo método de decisión multicriterio para solucionar el problema de seleccionar la localización de un centro de distribución bajo ambiente difuso. En este método propuesto, la clasificación de cada alternativa y el peso de cada criterio son descritos mediante variables lingüísticas que pueden ser expresadas a su vez mediante números difusos triangulares. El valor de evaluación final de cada localización del centro de distribución es también expresado a través de números difusos triangulares. Al calcular la diferencia del valor de evaluación final entre cada par de localizaciones para el centro de distribución, el autor construye una matriz de relación de preferencia difusa para representar la intensidad de la preferencia de la localización de una planta sobre otra. Entonces, es propuesto un procedimiento de clasificación paso a paso para determinar el orden de clasificación de todas las localizaciones candidatas.
- [Celik *et al.*, 2009] utiliza el FAHP para la toma de decisiones en el sistema de registro de buques, aplicado al caso de la industria marítima turca, dotando así a la gestión naviera de un enfoque multicriterio para evaluar las alternativas.
- [Chan *et al.*, 2013] propuso una evaluación para la planificación del desarrollo de nuevos productos respetuosos con el medio ambiente mediante un método FAHP en conjunción con análisis de ciclo de vida, del cual el nuevo método permitió simplificar sus cálculos matemáticos a la vez que incorporar incertidumbre en sus valoraciones.

2.5. MÉTODO DE LA SUMA PONDERADA.

2.5.1. Conceptos básicos y metodología.

El método de la suma ponderada, también llamado de ponderación lineal, es el más clásico y utilizado de los métodos de análisis multicriterio discreto, pues es muy sencillo e

intuitivo de aplicar [Sinha and Labi, 2007]. Asume que la función valor buscada se puede descomponer y asimilar a un modelo aditivo, es decir, presentarse de la forma $v = \lambda_1 \cdot v_1 + \lambda_2 \cdot v_2 + \dots + \lambda_n \cdot v_n$.

Los datos de partida del método son los expresados en la matriz de valoración (r_{ij}) de forma que se valora, para cada alternativa, el grado de cumplimiento de cada uno de los criterios. Se supone que los juicios que evalúan cada alternativa según cada criterio admiten representaciones numéricas sobre una escala de valores reales.

Una vez obtenida la matriz de valoración, esta debe ser normalizada, de forma que los valores de los criterios, generalmente expresados en escalas distintas, se puedan comparar y no se produzcan sesgos [Howard and Matherson, 1984; Barba-Romero y Pomerol, 1997; Vallin and Vanderpooten, 2002]. Con los valores normalizados r_{ij} para cada alternativa A_i , y conocidos los pesos w_j asociados a cada uno de los criterios que se consideran, el método de la suma ponderada construye la función valor como sigue:

$$v(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^n w_j \cdot r_{ij}}{\sum_{j=1}^n (w_j)}, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (\text{ec. 2.29})$$

Donde $v(A_i)$ es un valor promedio ponderado para cada alternativa A_i , que refleja el valor que cada alternativa tiene para el decisor. Así pues, con la ordenación de las alternativas en base a los valores $v(A_1)$, $v(A_2)$, ..., $v(A_m)$ es posible resolver el problema de decisión y determinar la mejor alternativa de entre las posibles, que será la de suma ponderada mayor/menor, así como establecer una ordenación por prioridad de todas las alternativas.

2.5.2. Ventajas e inconvenientes.

En Slovic y Lichstentein se argumentan fuertes razones de tipo psicológico como justificación de este modelo. Aceptada esta formulación lineal, con todo lo que ella implica

de independencia y *compensatoriedad* de criterios, así como la posibilidad de adicionar unos con otros, el problema se traslada directamente a una adecuada estimación de los pesos w_i en escala cardinal [Slovic and Lichstentein, 1971; Barba-Romero y Pomerol, 1997]. Gracias a ello su **principal ventaja** es su utilidad para simplificar situaciones complejas, puesto que se ha comprobado que, más allá de determinados criterios, la mayoría de los decisores no son capaces de integrar la totalidad de la información en su valoración, por lo que, descomponiendo y estructurando el estudio, este método de análisis multicriterio permite avanzar paso a paso hacia la búsqueda de una solución objetiva y razonada [Voogd, 1983; Oltean-Dumbrava *et al.*, 2013].

Sin embargo, a veces es utilizado incorrectamente si no se cuidan los aspectos de normalización y ponderación y presenta ciertas **limitaciones** que se analizan a continuación [Vallin and Vanderpooten, 1992; Barba-Romero y Pomerol, 1997; Oltean-Dumbrava *et al.*, 2013]:

- No hay una correspondencia intuitiva entre los valores de los pesos y la alternativa óptima propuesta. Por ejemplo, en un caso en que los pesos sean iguales para los criterios utilizados, esto podría hacer pensar al decisor, que se va a dar preferencia a una alternativa bien proporcionada en los criterios, y puede ocurrir que salga privilegiada, y por tanto elegida, una alternativa muy desequilibrada.
- Existe una extrema sensibilidad del resultado a variaciones ínfimas de los valores de los pesos.
- Ciertas acciones no dominadas fuera de una combinación convexa, no pueden ser obtenidas como soluciones óptimas.
- El método de la suma ponderada supone la existencia de una función de utilidad cardinal aditiva para los criterios, lo que a su vez presupone independencia entre los criterios, y posibilidad de que los criterios de los valores de las acciones sean comparables entre sí.

2.6. MÉTODO ELECTRE.

2.6.1. Conceptos básicos.

El método ELECTRE (*EL*imination *ET* Choix *TR*aduisant *RE*alité) es el representante más conocido de la familia de métodos multicriterio de agregación parcial y utiliza las relaciones de superación o **sobreclasificación** aplicando índices de concordancia y de discordancia en forma simultánea para decidir acerca de la determinación de una solución, que sin ser óptima pueda considerarse satisfactoria; además de obtener una jerarquización de las acciones o alternativas bajo análisis [Roy, 1985; Roy and Vanderpooten, 1997].

De hecho, es el primer método de superación que se publicó, propuesto en un principio por Bernard Roy y su grupo de colegas en la empresa de consultoría SEMA en Francia, aunque el método se hizo más conocido cuando fue publicado en la revista francesa de investigación de operaciones. Desde entonces el método ha evolucionado, se ha venido aplicando y se han hecho desarrollos teóricos sobre su base. En la actualidad existe una gran cantidad de versiones del método ELECTRE implementadas en software que han ido enriqueciendo el método original al ampliar las aplicaciones en diferentes ámbitos [Romero, 1996], de ahí que al método original se le denomine ELECTRE I [Roy, 1968].

Como otras técnicas de decisión multicriterio, este método tiene la finalidad de facilitar la selección de una alternativa cuando los criterios son múltiples y no agregables. Es un método que admite tratar al mismo tiempo varios elementos sin perder integridad entre ellos, permitiendo jerarquizarlos y seleccionar los que reúnen los criterios de aceptabilidad, es decir, reducir el tamaño del conjunto de soluciones eficientes. Para ello, divide el conjunto A de las m alternativas potenciales, en un subconjunto (**núcleo N**) de alternativas incomparables entre sí (subconjunto más favorable para el centro decisor) y en otro subconjunto, que contiene alternativas menos favorables al ser superadas por al menos una alternativa del núcleo N. Para ello, se basa en la ponderación y agregación de valores otorgados a cada criterio y la relación de superación o sobreclasificación se construye a partir de la noción de índices de concordancia y discordancia, ya explicados anteriormente,

que servirán para determinar si el indicador cumple o no con dichos criterios de aceptabilidad [Roy, 1968; Romero, 1996].

Para que la alternativa A_i sobreclasifique a la alternativa A_k , y por lo tanto forme parte del núcleo N o subconjunto de alternativas más favorables, es necesario que la concordancia entre A_i y A_k supere un umbral mínimo establecido y que asimismo, la discordancia entre A_i y A_k no supere otro umbral también establecido. Cuando esto ocurre, puede decirse que la alternativa A_i es preferible a la alternativa A_k desde casi cualquier punto de vista, aunque ello no implique que A_i domine, desde un punto de vista paretiano, a A_k [Romero, 1996].

No hay que olvidar que una de las ventajas que ofrece la utilización de la sobreclasificación es que no necesariamente se tiene transitividad entre las alternativas al compararlas o para preferirlas como en el caso de los enfoques basados en funciones de utilidad. De este modo, considerando a A_1 , A_2 y A_3 como alternativas, si A_1 sobreclasifica A_2 y A_2 sobreclasifica A_3 , no necesariamente A_1 sobreclasifica A_3 , lo que representa una gran ventaja pues considera que pueden ser distintas las razones del decisor por las que A_1 sea mejor que A_2 y A_2 mejor que A_3 .

Así, el método ELECTRE parte de una **matriz de valoraciones** donde se introducen las evaluaciones de cada una de las alternativas bajo cada uno de los respectivos criterios, así como de un **vector de pesos** o factores de importancia relativa de los criterios (ELECTRE no propone realmente un enfoque sistemático para reducir la notoria inconsistencia de los seres humanos cuando establecen tales pesos). El método entonces comienza con una comparación por pares de las alternativas bajo cada uno de los criterios por separado. Después se realiza la agregación: para cada par de alternativas A_i y A_k se calcula un denominado **índice de concordancia**, que se define *grosso modo* como la cantidad total de evidencia de la conclusión de que A_i sobreclasifica globalmente a A_k , así como un **índice de discordancia**, la cantidad total de contra-evidencia. El índice de concordancia incluye, por ejemplo, el peso total de los criterios bajo los cuales A_i sobreclasifica a A_k ; en el índice de discordancia intervienen los pesos en los que la alternativa A_i está superada por la A_k . Del estudio de los dos índices ELECTRE deduce

finalmente si A_i sobreclasifica a A_k , o A_k sobreclasifica a A_i o si no hay una relación de preferencia global entre las dos alternativas.

Por medio de las relaciones de sobreclasificación se forma un grafo en el que cada uno de sus vértices representa una alternativa no dominada del problema, y de este grafo se obtiene un subgrafo que representa el núcleo del conjunto de alternativas favorables. El núcleo del **grafo ELECTRE** está formado por aquellas alternativas que no se dominan (sobreclasifican) entre sí (esto es, no existen arcos de llegada en los correspondientes vértices), quedando además las restantes alternativas dominadas (sobreclasificadas) por alguna alternativa del núcleo (es decir, existe al menos algún vértice del núcleo del que sale un arco a los vértices que no forman parte del núcleo). Consecuentemente con el análisis efectuado, las alternativas que no forman parte del núcleo se eliminan del proceso de elección [Romero, 1996].

Debido a que el sistema no es necesariamente completo, ELECTRE es a veces incapaz de identificar la alternativa preferida. Más aún, ELECTRE no siempre puede ordenar completamente las alternativas en un orden subjetivo de preferencias, de ahí que este método sea más usado para ocuparse de la problemática P_α , o **problemática de selección**, como ya se definió anteriormente.

Sobre la base del método ELECTRE, se desarrollaron otras **variantes** tales como [Cables Pérez, 2011]:

- ELECTRE II [Roy and Bertier, 1973], donde se distinguen dos tipos de sobreclasificación, la fuerte y la débil, conformando los grafos correspondientes.
- ELECTRE III [Roy, 1978] mantiene como finalidad ordenar las alternativas, e introduce conceptos de los conjuntos difusos; en este caso para cada criterio utilizado en el proceso establece el umbral difuso de indiferencia, umbral difuso de preferencia y umbral difuso de veto. Por su parte, Siskos y compañeros también presentan sus propuestas que aunque son similares a la de Roy, varían en las fórmulas empleadas. Ambos construyen relaciones de dominancia y no

dominancia difusa para obtener finalmente una relación de mejor rango difusa [Siskos *et al.*, 1984].

- ELECTRE IV [Roy and Hugonnard, 1984] mantiene como finalidad ordenar las alternativas, pero en este caso no asocia pesos a los criterios, pues utiliza una secuencia de relaciones de superación anidadas que se construyen de forma paramétrica.
- ELECTRE IS [Roy and Skalka, 1984] es una adaptación del ELECTRE I a los principios de la teoría de la lógica difusa, donde su finalidad es la selección de la mejor alternativa.
- La última variante registrada en la literatura ELECTRE TRI [Roy and Bouyssou, 1993; Yu, 1992], que fundamenta su concepción también bajo los principios de la lógica difusa.

2.6.2. Metodología.

Este método organiza su proceso de la forma siguiente [Roy, 1968; Romero, 1996]:

Paso 1. Se parte de un conjunto de m alternativas $A = \{A_i\}$ y un conjunto de n criterios $C = \{C_j\}$, que conforman una matriz de evaluaciones $R = \{r_{ij}\} = \{C_j(A_i)\}$, de la alternativa A_i bajo el criterio C_j , así como de un vector de pesos $W = \{w_i\}$, cuyos valores deben pertenecer al intervalo unitario y su suma ser igual a 1.

Paso 2. A partir de la matriz de evaluaciones R y del vector de pesos W se calcula la matriz de índices de concordancia. La misma es una matriz de orden $m \times m$ donde sus elementos expresan la cuantificación de los criterios con que una alternativa es preferida sobre otra, al realizar una comparación por pares. Luego el índice de concordancia $c(i,k)$ en el proceso de comparación entre las alternativas A_i y A_k se obtiene sumando los pesos asociados a los criterios en los que la alternativa i es mejor que la alternativa k ; en caso de empate se asigna la mitad del peso a cada una de las alternativas.

$$c(i,k) = \sum_{j / C_j(A_i) > C_j(A_k)} w_j + \frac{1}{2} \cdot \sum_{j / C_j(A_i) = C_j(A_k)} w_j; 0 \quad \forall \text{ otra alternativa} \quad (\text{ec. 2.30})$$

Paso 3. Se procede a normalizar los elementos de la matriz R inicial hasta conseguir la matriz de decisión normalizada R*. La matriz normalizada puede calcularse de los diferentes modos de normalización presentados anteriormente.

Paso 4. Se pondera la matriz de decisión normalizada con los pesos w_j , $j = 1, \dots, n$, obteniéndose una matriz con la influencia de los pesos definidos. Esta operación consiste en que cada columna de la matriz R se multiplica por su correspondiente peso, resultando la matriz decisional normalizada y ponderada $R_p^* = R \cdot W$.

Paso 5. Se calcula la matriz de índices de discordancia. Al igual que la matriz de índices de concordancia, es una matriz de orden $m \times m$, que se obtiene a partir de la matriz R_p^* y los elementos de la misma expresan la cuantificación de los criterios con que una alternativa es dominada sobre otra, al realizar una comparación por pares. Luego el índice de discordancia $d(i,k)$ en el proceso de comparación entre las alternativas A_i y A_k se calcula como la diferencia mayor entre los criterios para los que la alternativa i está dominada por la k, dividiendo seguidamente dicha cantidad por la mayor diferencia en valor absoluto entre los resultados alcanzados por la alternativa i y la k.

$$d(i,k) = \frac{\max_{j / C_j(A_i) < C_j(A_k)} |C_j(A_i) - C_j(A_k)|}{\max_j |C_j(A_i) - C_j(A_k)|} \quad (\text{ec. 2.31})$$

Paso 6. Se fija un umbral mínimo c para el índice de concordancia, así como un umbral máximo d para el índice de discordancia. Habitualmente se utilizan como valores iniciales tanto para c como para d, los valores medios.

Paso 7. Se calcula la matriz de dominancia concordante. Para obtener dicha matriz, se parte de la matriz de índices de concordancia y se compara cada elemento de la misma con el umbral mínimo definido c para efectuar la asignación del valor correspondiente de los elementos de la matriz de la siguiente manera:

Cuando un elemento de la matriz de índices de concordancia (paso 2) es mayor que el valor umbral c (paso 6), en la matriz de dominancia concordante se escribe un uno, en caso contrario, se escribe un cero. O sea, denominando u_{ik} a los elementos de la matriz de dominancia concordante cada uno de sus elementos se obtiene utilizando la regla siguiente:

$$u_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{si } c(i,k) > c \\ 0, & \text{si } c(i,k) \leq c \end{cases} \quad (\text{ec. 2.32})$$

Paso 8. Se determina la matriz de dominancia discordante. Para obtener dicha matriz, se parte de la matriz de índice de discordancia y se compara cada elemento de la misma con el umbral máximo definido d para efectuar la asignación del valor correspondiente de los elementos de la matriz de la siguiente manera:

Cuando un elemento de la matriz de índices de discordancia (paso 5) es menor que el valor umbral d (paso 6) en la matriz de dominancia discordante se escribe un uno, en caso contrario, se escribe un cero. O sea, denominando v_{ik} a los elementos de la matriz de dominancia discordante cada uno de sus elementos utilizando ahora la regla siguiente:

$$v_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{si } d(i,k) < d \\ 0, & \text{si } d(i,k) \geq d \end{cases} \quad (\text{ec. 2.33})$$

Paso 9. Se determina la matriz de dominancia agregada (concordante-discordante), donde los elementos de la misma se obtienen multiplicando los términos homólogos de las matrices de dominancia concordante y de dominancia discordante calculados en los pasos 7 y 8 del algoritmo. Es decir, $x_{ik} = u_{ik} \cdot v_{ik}$.

La interpretación analítica de los elementos de esta matriz es muy intuitiva. Así, si el elemento ik toma el valor uno, esto significa que la alternativa i -ésima es mejor que la k -ésima para un número importante de criterios (concordancia) y no es claramente peor para ningún criterio (discordancia). Consecuentemente la alternativa i -ésima sobreclasifica a la k -ésima y de esta forma se conforma el núcleo del conjunto de alternativas. Por el contrario, si el elemento ik toma el valor cero, esto significa que la alternativa i -ésima no es mejor que la k -ésima para un número importante de criterio y/o es claramente peor para algún criterio. Consecuentemente la alternativa i -ésima no sobreclasifica a la k -ésima.

Paso 10. Se determina el grafo ELECTRE, que constituye una representación gráfica de la ordenación parcial de preferencias de las alternativas consideradas. Para ello se opera de la siguiente manera a partir de los valores de la matriz de dominancia agregada DA:

Cada alternativa representa un vértice del grafo. Del vértice i al vértice k se traza un arco si y solo si el correspondiente elemento de la matriz de dominancia agregada es uno. El núcleo del grafo ELECTRE está formado por aquellas alternativas que no se dominan (sobreclasifican) entre sí (esto es, no existen arcos de llegada en los correspondientes vértices), quedando además las restantes alternativas dominadas (sobreclasificadas) por alguna alternativa del núcleo (esto es, existe al menos algún vértice del núcleo del que sale un arco a los vértices que no forman parte del núcleo).

Consecuentemente con el análisis efectuado, las alternativas que no forman parte del núcleo se eliminan del proceso de elección.

Para terminar, puede resultar conveniente realizar un análisis de robustez sobre los resultados obtenidos y el proceso seguido. El análisis de robustez busca elaborar recomendaciones tan sintéticas como sea posible, aceptables para una vasta gama de valores de los parámetros. Es efectuando un análisis tal que es posible vencer las reticencias, tanto del decisor como del hombre de estudio, en cuanto a los valores iniciales de los parámetros. Si, haciendo variar los parámetros en torno a su valor inicial, los resultados no son modificados de manera importante, la recomendación se dirá robusta. Los parámetros susceptibles a variaciones debidas bien a la incertidumbre de los datos de base, bien a la subjetividad de los parámetros escogidos son:

- Amplitudes de las escalas de los criterios.
- Pesos de los criterios.
- Umbral de concordancia.
- Umbral de discordancia.
- E incluso las evaluaciones de las alternativas.

2.6.3. Ventajas e inconvenientes.

Las principales **ventajas** del método ELECTRE son [Oltean-Dumbrava *et al.*, 2013]:

- La más destacada es que la comparación de las alternativas puede alcanzarse incluso si no hay una preferencia clara de una de ellas, y comparado con otros métodos que son sensibles a las opiniones del decisor, es más fiable.
- Tiene capacidad de manejar juicios cuantitativos y cualitativos.
- Se basa en el establecimiento de una relación de superioridad.
- Crea relaciones de comparación entre fuerte y débil.
- Crea condiciones de concordancia y discordancia diferentes.
- Admite la existencia de umbrales de indiferencia y umbrales de preferencia.

Sus **inconvenientes** son [Oltean-Dumbrava *et al.*, 2013]:

- Es un método de decisión complejo y requiere muchos datos de entrada.
- Modelización insuficiente del veto.
- No se considera la intensidad de las preferencias.
- Pueden resultar alternativas incomparables y de esta forma no se puede llegar al orden de las mismas.

2.7. MÉTODO TOPSIS.

2.7.1. Conceptos básicos.

El Método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), también llamado método de Programación por Compromiso, se basa en el cálculo de la distancia de una alternativa a las soluciones ideal positiva (I^+) e ideal negativa (antiideal) (I^-) previamente establecidas [Hwang and Yoon, 1981]. El método está fundado

en el axioma de Zeleny: es racional elegir una alternativa lo más próxima a la ideal o lo más alejada de la antiideal, denominada **solución de compromiso** [Zeleny, 1982].

TOPSIS es una técnica de programación matemática utilizada originalmente en contextos continuos y que ha sido modificada para el análisis de problemas multicriterio de tipo discretos. Fue propuesto por [Hwang and Yoon, 1981], recibiendo posteriormente aportes de Zeleny [Zeleny, 1982]. Fue mejorada por los propios autores en 1987 y más tarde por Lai y compañeros [Lai *et al.*, 1994] y García-Cascales y Lamata [García-Cascales y Lamata, 2010], entre otros muchos.

El concepto de **alternativa ideal** tiene una larga tradición en diversos campos científicos, especialmente en la literatura psicométrica, en donde se maneja una noción absoluta de ideal [Coombs, 1958; Zeleny, 1973; Zeleny, 1982]. De este modo, una solución ideal se define como una colección de niveles ideales (o de valoraciones) en todos los criterios considerados, pudiendo suceder que tal solución normalmente sea inalcanzable o que sea no factible. Esta noción se basa en la idea de que el logro de tal meta se encuentra en la racionalidad de la elección humana. El vector compuesto por los mejores valores del *j*-ésimo criterio respecto a todas las alternativas posibles es el que recibe el nombre de solución ideal positiva. En contraposición, la solución ideal negativa estaría dada por el vector que contiene las peores valoraciones alcanzables en los criterios [Hwang and Yoon, 1981]

De este modo puede ocurrir que una alternativa seleccionada desde el punto de vista de su distancia más corta respecto de la solución ideal positiva deba competir con otra alternativa que se encuentra lo más lejos posible de la solución ideal negativa. Por ello, y a fin de definir la solución ideal, el método TOPSIS se basa en una idea que Dasarathy aplicó en un contexto de análisis multivariante de datos [Dasarathy, 1976], definiendo un **ratio de similaridad** (o de proximidad relativa) que se construye combinando la proximidad ideal positiva y la lejanía respecto al ideal negativo mediante alguna noción de distancia métrica, según la ecuación de la función distancia [Hwang and Yoon, 1981; Barba-Romero y Pomerol, 1997]:

$$d_p^+(A_i) = \left[\sum_{j=1}^n w_j^p |r_{ij} - I_j^+|^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (ec. 2.34)$$

$$d_p^-(A_i) = \left[\sum_{j=1}^n w_j^p |r_{ij} - I_j^-|^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (ec. 2.35)$$

Siendo $\Gamma^+ = (I_1^+, I_2^+, \dots, I_j^+, \dots, I_n^+)$, donde $I_j^+ = \max r_{ij}$, para el caso de criterios de beneficio y $I_j^+ = \min r_{ij}$, para el caso de criterios de coste; e $\Gamma^- = (I_1^-, I_2^-, \dots, I_j^-, \dots, I_n^-)$, donde $I_j^- = \min r_{ij}$, para el caso de criterios de beneficio y $I_j^- = \max r_{ij}$, para el caso de criterios de coste.

Y el ratio de similaridad al ideal se define como:

$$D_p(A_i) = \frac{d_p^-(A_i)}{d_p^+(A_i) + d_p^-(A_i)} \quad (ec. 2.36)$$

Que varía desde $D_p(\Gamma) = 0$ para el antiideal, hasta $D_p(\Gamma^+) = 1$ para el ideal. En definitiva, $D_p(A_i)$ se utiliza para la ordenación final de las alternativas.

En el siguiente epígrafe se detallan las etapas de aplicación del método, que como se verá guarda un algoritmo sencillo de implementar.

2.7.2. Metodología.

El método se desarrolla en una serie de etapas o pasos [Hwang and Yoon, 1981; García-Cascales, 2009; Mellinas Fernández, 2012]:

Paso 1: Establecimiento de la matriz de decisión. El método TOPSIS, como el ELECTRE, parte de la evaluación de la matriz de decisión que se refiere a m alternativas A_i , $i = 1, \dots, m$, las cuales son evaluadas en función de n criterios C_j , $j = 1, \dots, n$, así como del correspondiente vector de pesos $W = \{w_1, \dots, w_n\}$.

Paso 2: Normalización del matriz de decisión. Lo primero es convertir las valoraciones asignadas a las diversas alternativas según los distintos criterios en valores no

dimensionales. Para ello puede utilizarse cualquiera de los métodos de normalización descritos anteriormente, aunque hay autores que consideran más apropiada la norma $r_{ij} = X_{ij}/X_{ijmax}$.

Paso 3: Construir la matriz de decisión normalizada ponderada. El valor normalizado ponderado r_{ij} de la matriz de decisión normalizada ponderada R se calcula multiplicando la matriz decisional por el vector de pesos.

Paso 4: Determinar la solución ideal positiva (I^+) y la solución ideal negativa (I^-), construida con las mejores alternativas de cada criterio y por las peores alternativas de cada criterio, respectivamente, como han sido definidas anteriormente.

Paso 5: Cálculo de las medidas de distancia. Para ello se emplean las ecuaciones 2.34 y 2.35. En este caso se utiliza la distancia Euclídea p -multidimensional. Lo más habitual es emplear la distancia Euclídea clásica, para $p=2$.

Paso 6: Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal. Finalmente se construyen las semejanzas a la solución ideal como índice respecto a la solución ideal negativa, lo que implica que dicho índice combina los dos aspectos o metas definidos al principio, mediante el ratio de *similaridad* al ideal (ecuación 2.36).

Paso 7: Ordenación de preferencias. Se ordenan las mejores alternativas de acuerdo con $D_p(A_i)$ en orden descendente, ya que cuanto más próximo es el valor de $D_p(A_i)$ a 1, aquella alternativa i -ésima se encuentra más cerca del ideal positivo en relación a la distancia respecto al ideal negativo y, por tanto, goza de mayor prioridad.

2.7.3. Ventajas e inconvenientes.

Entre las **ventajas** del método TOPSIS destacan que su lógica es racional y entendible, el proceso es sencillo y estructurado en un algoritmo, que posibilita su fácil programación, puesto que además el número de pasos del mismo se mantiene

independientemente del número de criterios. Como resultado, permite la búsqueda de las mejores alternativas para cada criterio con una fórmula matemática sencilla en cuyo proceso de cálculo se tienen en cuenta los valores de los pesos de cada criterio, así como si el criterio es un coste o un beneficio. Además, el método permite encontrar un orden de prioridad de las alternativas a partir de valores que aparentemente, y a primera vista, muestran alternativas equivalentes [Coombs, 1958; García-Cascales y Lamata, 2010; Oltean-Dumbrava *et al.*, 2013].

Por contra, entre sus principales **inconvenientes** se encuentran los derivados de la normalización de los datos, puesto que afecta a la elección de las alternativas, al mudar el resultado final en función del método de normalización que se utilice. De igual modo, también los resultados pueden variar según el concepto de métrica que se utilice para calcular las distancias a las alternativas ideal y antiideal, puesto que la distancia Euclídea no considera la correlación de los criterios. Incluso si se utilizan valores diferentes de la métrica p , en el cálculo de las distancias d_p , los resultados (ordenaciones) finales pueden ser distintos. Yoon midió la credibilidad de la función de distancias d_p , y concluye que la función distancias es menos creíble cuando el valor p aumenta, recomendando utilizar la métrica $p=1$ para obtener, desde un punto de vista matemático, la más creíble alternativa de compromiso. De otra parte, Yoon apunta que cuando se normalizan las acciones, el valor de la métrica p afecta al grado de mutua interdependencia entre las acciones de los diferentes criterios, de manera que cuando p decrece, la interdependencia mutua entre las acciones se incrementa [Yoon, 1987].

También es una desventaja la necesidad de contar con pesos como punto de partida, al igual que ELECTRE, con la dificultad que entraña la consistencia de los juicios derivados de ellos. Este inconveniente, sin embargo, será evitado en la metodología que se desarrolla en esta tesis, al partir con los pesos obtenidos mediante el FAHP, por lo que no será obligación del decisor escoger los pesos a su único parecer.

Sin embargo, la desventaja del método más frecuentemente citada en la bibliografía es la posibilidad de sufrir inversión del orden [Saaty and Vargas, 1984; Saaty, 1987; Dyer, 1990; Saaty and Vargas, 1993; Barzilai and Golany, 1994; Schenkerman, 1994; Milani *et al.*, 2004; Saaty and Sagir, 2009; Wang and Luo, 2009]. La inversión de orden es un

fenómeno asociado con los resultados de la ordenación de alternativas al añadir/eliminar alternativas en un proceso de toma de decisión. Es bien conocido que cuando las alternativas están muy próximas, el orden entre ellas depende del método de evaluación utilizado. Es común que se dé este fenómeno cuando un decisor, en el proceso de selección de una alternativa de un conjunto de selección, se encuentra con una nueva alternativa que no se tuvo en cuenta al principio de la selección, lo cual puede hacer que tenga que volverse a calcular la evaluación de todas las alternativas.

No parece razonable que la posición de la mejor alternativa dependa del número de alternativas en el proceso. En algunos casos, podría llegar a darse el orden inverso total, donde el orden de las preferencias es invertido totalmente, es decir, que la alternativa que se consideraba la mejor, con la inclusión o la eliminación de alguna alternativa, se convierte en la peor. Este fenómeno, en la mayoría de los planteamientos, no es aceptable (recuérdese el axioma 7 de Luce y Raiffa al respecto de la «independencia de alternativas irrelevantes» reseñado en el apartado 2.3.7) [Luce and Raiffa, 1985]. Wang y Luo ya estudiaron el orden inverso en TOPSIS [Wang and Luo, 2009], pero no aportaron ninguna solución al respecto.

2.7.4. Método TOPSIS difuso.

Como ya se comentó anteriormente, existe una variante difusa al método tradicional TOPSIS que concibe calificaciones difusas para las alternativas en los diferentes criterios, determinando las distancias de estas calificaciones a las ideales mediante fórmulas difusas y agregándolas en un solo valor de cercanía relativa al ideal que permite realizar el ordenamiento final de las alternativas [Negi, 1989; Chen and Hwang, 1992; Awasthi *et al.*, 2011; Bao *et al.*, 2012].

Esta nueva propuesta es llamada de método TOPSIS difuso, cuya metodología es similar al TOPSIS original, pero teniendo en cuenta las operaciones con números difusos y finalmente debiendo *defuzzificar* los resultados para obtener un orden en las alternativas y una medida numérica de sus distancias a las soluciones ideal y antiideal. Cuando sea más

adecuado establecer etiquetas lingüísticas o evaluaciones difusas a las valoraciones de las alternativas en función de los criterios puede resultar muy conveniente utilizar TOPSIS difuso. Sin embargo, en el caso que se va abordar en esta tesis, los criterios que se utilizarán, vinculados a características de las medidas de ingeniería contra el ruido, son en su mayor parte medibles de acuerdo con unas magnitudes y escalas conocidas, por lo que no se plantea para esta decisión multicriterio.

2.8. TÉCNICA DEL PANEL DE EXPERTOS COMO ENCUESTA ESTADÍSTICA.

2.8.1. Características generales de las encuestas estadísticas.

Como se ha comentado, para alcanzar los pesos de las variables y criterios utilizados en este trabajo mediante el FAHP es necesario establecer valoraciones por pares de los mismos. Con la intención de minimizar la subjetividad e incorrección de estas valoraciones, aun sabiendo la incertidumbre que las caracteriza y que motiva el empleo de técnicas difusas, se plantea la obtención de las mismas a partir de encuestas a expertos relacionados con la temática estudiada, cuyos resultados posteriormente necesitarán ser procesados.

Cabe por tanto acercarse a las características generales que deben reunir este tipo de encuestas, con la intención de garantizar la calidad de las respuestas encontradas en los cuestionarios que son presentados a los expertos.

La **encuesta** es quizás el instrumento más conocido y utilizado por los investigadores cuando se quiere lograr precisión y representatividad partiendo directamente de consideraciones individuales y no estructurales, para acceder a la conclusión sobre el tema tratado. Conceptualmente la encuesta puede considerarse como una técnica o una estrategia formada por el conjunto de procesos necesarios para obtener información de una población mediante entrevistas a una muestra representativa. La información se recoge de forma estructurada formulando las mismas preguntas y en el

mismo orden a cada uno de los encuestados [Ministerio de Administraciones Públicas, 2006]. Se aplican cuando no sea posible técnica o económicamente emplear métodos experimentales o de cálculo para evaluar las características propias del proceso [Shwartz, 1979; Ortega, 1987].

Para abordar su análisis debe partirse de una serie de consideraciones metodológicas generales que se refieren a las **fases básicas de la elaboración de la encuesta** [Cea D'ancona, 1998]:

- Lo primero que debe tenerse claro a la hora de formular una encuesta son los objetivos que se quieren alcanzar al analizar un fenómeno concreto. Se hace, por tanto, imprescindible el estudio de referencias bibliográficas extensas sobre el tema a partir de la revisión del estado del arte en la materia, como la que se está realizando en estos dos primeros capítulos de la tesis. De esta manera cuanto más claros se tengan los objetivos y los conceptos, más precisas serán las preguntas que se incluyan en el cuestionario.
- Posteriormente, y una vez determinados los recursos disponibles y el tiempo necesario para su aplicación, se procedería a decidir el tipo de encuesta que se vaya a utilizar ya que, como se verá, cada tipo de encuesta requiere distintos niveles de exigencia de recursos y de calendario.
- Una vez conocidos los antecedentes teóricos y empíricos sobre la materia y decidido el tipo de encuesta a utilizar podrá definirse la población objeto de estudio (diseño de la muestra).
- Seguidamente, es el momento de diseñar el cuestionario de manera que las preguntas se adecuen al objetivo previsto. No obstante, aunque no es imprescindible, resultaría muy útil haber realizado antes algún análisis cualitativo (grupo de discusión o entrevista en profundidad) sobre la realidad y el perfil de población sobre la que se va a encuestar cuyas conclusiones serían muy interesantes para acertar en el contenido de las preguntas.
- A partir de esta fase, los pasos a realizar son algo más mecánicos, pero no por ello menos importantes. Concretamente se continúa con la administración del cuestionario (trabajo de campo).

- Después se pasa a la codificación de las preguntas y la depuración de los cuestionarios.
- Sigue el procesamiento y análisis de los datos.
- Y finalmente se obtienen los resultados y se presentan en el formato que se exija o se prefiera.

En cuanto al **diseño del cuestionario**, es importante atender tanto a los formatos de preguntas más habituales y como a su organización y presentación. No hay que olvidar que la forma de la pregunta es tan importante como su contenido. Para ello es necesario seguir una serie de criterios básicos de formulación de preguntas, que no son otra cosa que aplicar el sentido común al entendimiento de un contenido, como son [Ortega, 1987; Cea D'ancona, 1998; Ministerio de Administraciones Públicas, 2006]:

- Utilizar un lenguaje sencillo.
- Emplear claridad en las preguntas.
- Servirse de los términos adecuados. Hay que evitar tanto el uso de vocablos extranjeros y de palabras ambiguas como mezclar dos atributos en una misma pregunta ya que con ello el entrevistado no podría separar una respuesta de otra. Por ejemplo, «¿cree usted que el envase y la calidad de este producto son buenos?».
- Facilitar la memoria con preguntas del pasado más inmediato.
- Evitar la realización de cálculos. En los casos en los que sea necesario es preferible recurrir a promedios más que a cifras muy concretas.
- Proporcionar respuestas flexibles y «cómodas» para el entrevistado. Sobre todo en las preguntas más comprometidas o susceptibles de ser contestadas con ciertas reservas conviene preguntar de forma indirecta o de forma aproximada.
- Evitar preguntas que puedan implicar respuestas condicionadas.
- Formular preguntas lo más cortas posibles.
- Evitar preguntas implícitas en otras. Si se hacen dos preguntas que conlleven una misma respuesta crea la sensación de desconfianza en el entrevistado.

Excepcionalmente pueden hacerse unas preguntas implícitas en otras si se trata de comprobar la veracidad de ciertas respuestas (preguntas de control) pero en estos casos deben estar muy bien disimuladas.

- No redactar preguntas en forma negativa.
- Emplear un orden lógico en las preguntas y que este no condicione las respuestas. Las preguntas deben ordenarse por grupos homogéneos procurando no mezclar preguntas sobre temas muy diferentes.
- El cuestionario no debe ser muy largo. Generalmente la amplitud máxima del cuestionario lo determina la duración media de la entrevista y no tanto el número de preguntas. Por lo general se aconseja que la entrevista no sobrepase la hora aunque es preferible que dure entre 30 y 45 minutos.

Del mismo modo, en los cuestionarios pueden aparecer diferentes **tipos de preguntas** según las características del tema a investigar. En general, pueden aparecer en los cuestionarios los tres tipos de preguntas siguientes [Ortega, 1987; Cea D'ancona, 1998]:

- Abiertas. Permiten responder en cualquier sentido de acuerdo con sus ideas, es decir, no circunscriben las respuestas a alternativas predeterminadas. Estas preguntas, además del inconveniente de que exigen más tiempo al entrevistador y más esfuerzo para el entrevistado, son de difícil codificación (la asignación de un número o código a cada respuesta para su tratamiento informático). No obstante, también tienen sus ventajas. Además de la libertad que ofrecen estas preguntas al entrevistado resultan muy útiles cuando el investigador no prevé todas las posibles respuestas a una determinada pregunta o cuando se quiere conocer un valor numérico exacto
- Cerradas. Permiten responder con una («sí / no») o varias de las alternativas existentes («mucho / poco / nada»). A pesar del inconveniente de su compleja redacción y limitada riqueza expositiva son preguntas muy fáciles de responder y codificar y, además de favorecer la comparabilidad con otras respuestas, reduce la ambigüedad de estas.

- Semicerradas o semiabiertas. Contienen una serie de posibles respuestas previamente establecidas y una respuesta abierta tipo «otros» para incorporar respuestas de opinión.

Además de estos tipos fundamentales, pueden citarse otros tipos de preguntas que responden más a un objetivo concreto como relajar la encuesta, introducir al entrevistado, filtrar posibles respuestas... y su formato puede ser abierto, cerrado o semiabierto o semicerrado. Destacan las siguientes [Ortega, 1987; Cea D'ancona, 1998]:

- Introdutivas. Se realizan al principio del cuestionario para despertar el interés de la persona entrevistada y crear confianza. Normalmente no suelen tenerse en cuenta en la tabulación y son de tipo abierto.
- De relajación. Para establecer una pausa en la entrevista cuando el cuestionario es muy largo y pueda aburrir al entrevistado. Al igual que la anterior suelen ser preguntas de formato abierto que no suelen tenerse en cuenta en la tabulación.
- En batería. Son preguntas de una misma área temática realizadas a continuación de otras como consecuencia de la respuesta dada por el entrevistado.
- Filtro. Su objetivo es seleccionar una serie de personas que reúnen unas determinadas características. Si cumplen estas características se les somete a otra serie de preguntas. En el caso contrario se excluye al encuestado de la siguiente pregunta o de la propia encuesta.
- De evaluación. Tratan de obtener del entrevistado una respuesta jerarquizada subjetiva sobre las distintas escalas numéricas o verbales que se le indican en la pregunta.
- De recuerdo. Tiene por objeto obtener del entrevistado una información basada en el recuerdo de algún hecho pasado.
- De tarjetas. Consisten en mostrar al entrevistado una tarjeta en la que aparecen las diferentes opciones que tiene la pregunta formulada. Suelen utilizarse en las encuestas personales y cuando el número de alternativas es muy grande. Los entrevistadores deberán leer las respuestas en voz alta aunque los entrevistados las estén viendo.

- De control. Se realizan en ocasiones para comprobar respuestas veraces y coherentes. Puede ser una pregunta específica (por ejemplo, preguntar en qué revista vio anunciado un producto cuando en realidad ese producto no se publicó en tal revista) o comparar varias preguntas cuyas respuestas podrían ser incompatibles.

La organización de la encuesta suele guardar un orden lógico, por lo que para la secuencia u **orden de las preguntas** en el cuestionario hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones [Cea D'ancona, 1998; Ministerio de Administraciones Públicas, 2006]:

- Introducción: clara y precisa para lograr los objetivos. El cuestionario suele comenzar con un mensaje de presentación donde se garantice el anonimato y se agradezca la colaboración y se especifique la entidad encargada del estudio, el objetivo de la encuesta y cómo se ha seleccionado al encuestado. Es habitual también reservarse un espacio para los datos de control.
- Inicio: preguntas generales, sencillas y fáciles de responder. Las preguntas iniciales deben «enganchar» al entrevistado y ser fáciles de responder. Resulta útil comenzar con preguntas abiertas y genéricas cuando la encuesta es personal, no así en las encuestas postales.
- Núcleo central: preguntas relacionadas con el objetivo central del trabajo.
- Conclusión: preguntas delicadas y de características más individualizadas.

La significatividad de la información proporcionada dependerá de la existencia de los siguientes **tipos de errores** [Ministerio de Administraciones Públicas, 2006]:

- Errores de muestreo. Suelen relacionarse con el tamaño de la muestra, el tipo de muestreo y la heterogeneidad de la población. Cuanto mayor sea más precisos serán los estimadores obtenidos. Los estimadores se aproximan a los valores reales de la población porque pueden representar fácilmente los distintos subgrupos que existen en la población general. Si la muestra es muy pequeña no es posible generalizar de manera precisa sobre la población general.

- Errores de no observación. Algunos miembros no están en el marco muestral por diversas razones:
 - Errores de cobertura: no aparecen por no disponer del medio adecuado (por ejemplo: no tener teléfono si la encuesta es telefónica).
 - Errores de no respuesta: cuando algunos miembros rechazan participar o no es posible contactarlos.
- Errores de medición. Debidos fundamentalmente a:
 - Influencia del entrevistador.
 - La actuación del entrevistado (esconder información, errores de memoria, tratar de agradar, mala comunicación...).
 - La naturaleza de las preguntas (mala formulación, orden incorrecto...).
 - El modo de recoger la información.
- Errores de postmedición. Relacionados con su procesamiento: grabación, depuración (detectar inconsistencias en las respuestas) y transformación incorrecta de los datos.

A partir de estas consideraciones se pueden analizar los distintos **tipos de encuestas** con sus respectivas ventajas e inconvenientes. Así, según la metodología utilizada, las encuestas estadísticas pueden agruparse en tres grandes familias [Schwartz, 1979; Cea D'ancona, 1998; Ministerio de Administraciones Públicas, 2006]:

- La encuesta personal, o sea, realizada directamente y cara a cara por un entrevistador al encuestado. Son muy conocidas las encuestas domiciliarias (puerta a puerta) o bien realizadas en la calle a los ciudadanos, así como las realizadas en un ambiente preestablecido para la encuesta, que en este caso permite restringir más la población consultada al reunir a los encuestados en un lugar concreto. Sus principales ventajas son: el elevado índice de respuestas; la presencia del entrevistador, que permite resolver dudas y evitar influencia de otras personas; la posibilidad de realizar entrevistas largas; la opción de mostrar materiales; y la facilidad para obtener datos secundarios. Sin embargo, también presenta algunas limitaciones, como son: es un proceso caro y lento; el

entrevistador puede ejercer influencia; la necesidad de controlar a los entrevistadores; y el difícil acceso a ciertas poblaciones.

- La encuesta postal, realizada mediante carta tradicional o bien mediante el empleo de las nuevas posibilidades de Internet y el correo electrónico, en la que se hace llegar al encuestado el cuestionario para que responda las preguntas, cuyas respuestas bien son recibidas por el responsable del estudio directamente a través de una plataforma web o bien son devueltas al remitente por parte de cada encuestado. Suelen contar con una carta de presentación de corta extensión (una cara máximo), en la que se explica la utilidad del estudio, se resalta la importancia de la respuesta del encuestado, se promete confidencialidad y finalmente se agradece la colaboración prestada. Exigen un correcto seguimiento del proceso, incluyendo una notificación previa, así como en algunos casos puede ser necesario aplicar incentivos a los encuestados para lograr una mayor participación, tomando especial cuidado con las preguntas inculradoras y de tipo filtro. En relación con el tipo anterior, presenta algunas ventajas muy interesantes, pues es más económico, precisa poco personal, es muy accesible, juega con la flexibilidad de tiempo y favorece el anonimato. Por contra, se enfrenta a algunos inconvenientes que deben ser tenidos en cuenta a la hora de implantar la técnica, como los bajos índices de respuesta, los errores en la cumplimentación, el factor impersonal y la posible influencia incontrolada de otras personas, aparte de que no sea adecuado cuando se persiguen respuestas inmediatas y generalidad, ya que ciertos grupos pueden quedar excluidos.
- La encuesta telefónica, o sea, la realizada a través del teléfono por parte de un entrevistador o grupo de ellos a una población seleccionada según algún criterio o bien aleatoriamente. Se suele elaborar un cuestionario, que debe seguir un formato cómodo para ser oído con facilidad y que incluso puede ser grabado, en el que se incluyen mayoritariamente preguntas cerradas y preguntas de elección forzada con la intención de evitar respuestas neutrales. Posteriormente, una vez se realiza la encuesta, hay que tener muy claro que se trata de mantener «una conversación» y no un interrogatorio. Para ello, suele ser muy adecuado realizar una prueba de la encuesta para valorar que el diseño, la duración y orden. Entre

sus principales ventajas se encuentran las siguientes: en principio, es más económico, aunque con reservas; la rapidez; permite entrevistar a colectivos inaccesibles; mejor inclinación a responder por teléfono; y se necesitan menos entrevistadores. Como desventajas se pueden citar las que siguen: en el caso de realizar entrevistas a números telefónicos escogidos al azar, existe un nivel de no respuesta muy elevado; no pueden exhibirse materiales; la brevedad de la entrevista; no es apropiado para tratar temas delicados ni preguntas complejas; y los problemas implícitos que exige la técnica en relación con los entrevistadores (deben seleccionarse adecuadamente, con ciertos requisitos de fluidez verbal, memoria a corto plazo, buena dicción y conocimientos adecuados para resolver dudas), con la propia llamada (de hecho, el 80 % de los rechazos se dan en el momento inicial por lo que una buena presentación es fundamental) y con el tono conversacional (es imprescindible evitar brusquedades e improperios).

Aparte de estos tipos fundamentales, existen otros más sofisticados, como los que utilizan paneles complejos como técnica cuantitativa de estudios de mercado que se realiza de manera periódica a una misma muestra representativa de un universo determinado, o bien procedimientos de comunicación grupal tipo Delphi, que siguen un proceso iterativo basado en la retroalimentación controlada de las opiniones de los componentes del grupo hasta alcanzar un consenso estadístico, como ya se vio anteriormente.

Por ser el más adecuado en relación con el objetivo que se persigue en la presente investigación, se plantea como técnica el denominado panel de expertos o cuestionarios dirigidos a especialistas relacionados con el tema de estudio, utilizando la tipología de encuesta postal, puesto que las ventajas descritas la hacen aun más atractiva en la búsqueda de las respuestas que son necesarias para su tratamiento posterior. Además, se intentará que los condicionantes generales representen el menor inconveniente posible, al no ser preciso obtener respuestas inmediatas y mediante una correcta selección de los encuestados y un estricto seguimiento del proceso. Se profundiza más en esta técnica seguidamente.

2.8.2. Paneles de expertos.

El método del panel de expertos es un conjunto de pasos en los que aplica y participa un grupo de expertos con un adecuado conocimiento de las particularidades de un problema específico. Su empleo persigue la selección y evaluación de todas o algunas características de un proceso. Está considerado como un de los métodos subjetivos de pronósticos más confiables para establecer un cuadro de la evolución estadística de las opiniones de expertos en un tema, fundamentadas en su análisis lógico y experiencia intuitiva [Linstone and Turoff, 1975; Schwertz, 1979].

Los pasos o etapas del panel son conducidos mediante unos cuestionarios estructurados que permiten obtener la información específica de los expertos determinante para el tema de estudio y que luego son tratados por parte del **coordinador** o grupo coordinador de la encuesta, al que le corresponden las siguientes funciones [Landeta, 1999]:

- Estudiar y aprobar el protocolo de trabajo (criterios de selección de los participantes; calendario previsto, medios humanos y técnicos a utilizar).
- Estudiar y aprobar la lista de expertos participantes.
- Confecionar los cuestionarios.
- Analizar las respuestas.
- Interpretar los resultados.
- Supervisar la correcta marcha de la investigación.

Pero lo primero que cabe preguntarse a la hora de preparar un panel de expertos es quién es realmente un **experto** y, por tanto, cómo deben ser seleccionados. *A priori*, un experto es un individuo cuya situación y recursos personales le posibiliten contribuir positivamente a la consecución del fin que motiva el trabajo al ser capaz de emitir un juicio sobre el tema en cuestión. En síntesis, el experto debe poseer las siguientes cualidades fundamentales:

- Poseer un conocimiento adecuado y avalado sobre el tema.

- Tener la capacidad a causa de su experiencia y de una integración de conocimientos variados de expresar juicios que se estiman pertinentes (sagacidad).
- Creatividad o bien grado de afectación por la consecuencias de la investigación.
- Capacidad de análisis y de pensamiento.
- Revelarse apto para comunicar y para participar en la investigación.
- Disposición a participar en la encuesta.
- Sentido de cooperación solidaria y sincera.

En el contexto de la investigación científica moderna un experto debe ser capaz no solo de evaluar sino, también, de aportar sus experiencias al investigador en el momento solicitado. Pueden diferenciarse tres tipos básicos de expertos según el problema a analizar [Landeta, 1999]:

- **Especialistas:** coincide con el concepto de experto clásico. Son aquellos expertos caracterizados por sus conocimientos, experiencia y objetividad sobre el objeto de estudio. Su presencia en el panel es preponderante cuando se necesita información sobre cómo actuar o sobre la evolución futura de hechos.
- **Afectados:** no se distinguen por tener conocimientos superiores a lo normal en el área objeto de estudio (aunque la conocen), sino porque están implicados de alguna forma con ella. La selección de este tipo de experto es preponderante cuando hay conflicto de intereses sobre la dirección que deben tomar las acciones.
- **Facilitadores:** son individuos con capacidad para sintetizar, clarificar y organizar, que no tienen porqué pertenecer a ninguna de las dos categorías anteriores. Son decisivos cuando los hechos o las relaciones no están claros.

A la hora de contactar con los expertos es importante informarles primeramente sobre los objetivos del estudio, los criterios seguidos para su selección, el número de cuestionarios y la duración aproximada del proceso, el potencial uso de la información y los beneficios que conseguirán con su participación .

Una vez seleccionados los expertos y diseñados los cuestionarios, el siguiente paso es la obtención y transmisión de la información buscada, o sea, la **formulación de las preguntas**, ya sea mediante la entrevista personal, la encuesta telefónica o el procedimiento postal, según se ha visto anteriormente. Los tipos de preguntas pueden ser también según los vistos más arriba, aunque suele ser habitual empezar con preguntas abiertas formuladas para poder ser procesadas y evitando narraciones de opiniones (por ejemplo, preguntando por ventajas e inconvenientes, o razones, o enumerar impactos, etc.). Otras formas muy comunes que se suelen encontrar en los cuestionarios son las preguntas jerarquizadas (por ejemplo, para pedir una ordenación de las posiciones de determinados ítems), valorativas (dando puntuaciones con arreglo a una escala definida), comparativas (de ítems en forma de pares alternativamente) y de estimaciones cuantitativas (ya sea mediante puntuaciones absolutas, relativas o incluso probabilísticas).

Una vez recibidas las respuestas de los expertos, la información recabada debe ser procesada. Aparte de evaluar posibles errores o incorrecciones en el proceso, una fase muy importante es la **agregación de la información**, entendida esta como la operación consistente en transformar un conjunto de elementos amplio en un único elemento representativo del mismo. La forma de integrar las valoraciones de cada experto para obtener la solución única se puede realizar mediante diferentes técnicas, apoyadas en diversas herramientas estadísticas o de evaluación, según el caso que se trate.

En los problemas de decisión como el que se aborda en esta tesis, la agregación de las preferencias individuales que los expertos proporcionan sobre las distintas alternativas se agregan en una única preferencia global y en cuanto a las opiniones sobre los criterios se agregan las valoraciones para un mismo criterio dando una valoración global para el mismo. Se ha comprobado que hacer la media geométrica de las valoraciones es un procedimiento aceptable, sencillo y rápido. Además, la media geométrica cumple las condiciones de simetría (la valoración global no varía si dos valoraciones individuales se intercambian), de acuerdo (si todos los individuos están de acuerdo, la opinión global también) y de homogeneidad lineal (si cada miembro del grupo multiplica su valoración por una constante, la preferencia del grupo también se multiplica por dicha constante). La media aritmética también podría emplearse porque satisface dichas condiciones, pero no cumple la reciprocidad y separabilidad que sí posee la media geométrica [García-Cascales,

2009], que además fue la propuesta por Saaty para agregar las valoraciones por pares cuando eran realizadas por varios expertos o decisores, como fue citado anteriormente [Saaty, 1990]. De ahí que ese sea el método elegido.

Finalmente, es importante hacer notar que con esta técnica no se busca en la investigación en curso una representatividad estadística, sino una representatividad de los datos obtenidos. En este sentido, las principales razones que fundamentan la utilización de esta metodología son las siguientes:

- El conocimiento del grupo siempre será mayor que el conocimiento del participante mejor preparado, ya que entre los participantes complementan sus conocimientos.
- En el grupo se pueden contrastar las opiniones de cada uno de sus miembros.
- El número de factores que es considerado por un grupo es mayor que el que podría ser tenido en cuenta por una sola persona.

2.8.3. Aplicaciones.

Las aplicaciones de las encuestas estadísticas en investigación y más concretamente los paneles de expertos son extensísimas en la bibliografía especializada. Así, aparte de sus lógicas aplicaciones en sociología y psicología, también han sido muy utilizados en estudios de mercado y análisis de preferencias del consumidor. Por supuesto, un campo de utilización de estas técnicas son los propios estudios estadísticos públicos, como los conocidos ejemplos de las investigaciones de organismos oficiales sobre demografía, economía, sociedad, censo, etc., así como aquellos usos particulares, como encuestas de intención de voto, de opinión, de valoración, publicitarios, etc.

En el ámbito científico y académico de investigación, los paneles de expertos cuentan con ejemplos de uso para estudios médicos, farmacéuticos, medioambientales, sociológicos, políticos, de diseño, de gestión, docentes, de marketing, puramente matemáticos y estadísticos, económicos, deportivos, de ingeniería y un largo etcétera. Por

supuesto, en el contexto de la toma de decisión también es muy utilizada esta técnica, con la intención de recabar las opiniones o valoraciones de expertos sobre un determinado problema de toma de decisiones, ya sea al nivel de alternativas, criterios o consecuencias de las decisiones.

De hecho, en las técnicas de toma de decisiones que quieren constituir una ayuda al decisor, aparte de facilitar el tratamiento multicriterio o multiobjetivo, también permiten generar un cierto proceso de toma de decisión en grupo, bien porque realmente la unidad decisora esté constituida por diferentes actores simultánea o secuencialmente, bien porque exista un único decisor que quiera apoyarse en las valoraciones de un conjunto de individuos interesados o intervinientes en el proceso de decisión, como es el caso de esta tesis.

CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

3.1. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

En proyectos de ingeniería la toma de decisión es una actividad intelectual esencial, que forma parte fundamental de la fase creativa de la planificación y el proyecto. Durante el desarrollo de un proyecto en todas sus partes, desde su concepción a la concreción definitiva, se toman decisiones complejas; esta complejidad viene marcada tanto por el entorno de incertidumbre en el que se desarrollan como por la trascendencia que muchas de estas decisiones tienen para el proyecto, debido a las responsabilidades que ello implica para los proyectistas o directores de proyecto, por los agentes involucrados o afectados por la decisión adoptada y por los diferentes criterios o puntos de vista que hay que tener en cuenta y que a menudo están en conflicto y no claramente definidos [García-Cascales, 2009].

El marco en el que tiene lugar esta toma de decisiones se ajusta a la normativa técnica y sectorial de aplicación al ámbito concreto de planificación, así como a los planteamientos actuales de lo que ha venido a llamarse «**Desarrollo Sostenible**». Ello es así puesto que en general, y particularmente en el ámbito que se está tratando, parece existir un amplio acuerdo en que el desarrollo sostenible debe gobernar las pautas de crecimiento, y tanto es así que se apela a la sostenibilidad de cualquier actividad como reclamo para favorecer su implantación o como un calificativo positivo.

De hecho, desde su formalización, tanto el «desarrollo sostenible» como la «sostenibilidad» han sido conceptos que han recibido una amplia aceptación [Ortiz *et al.*, 2007], si bien aún se observa una cierta dispersión en la acepción del término y una cierta saturación basada en la ambigüedad y falta de concreción o de métodos de valoración de la sostenibilidad [Manoj, 2003].

En cuanto a su concepción, dígase «oficial», la Comisión Mundial para el Medio Ambiente en el año de 1987 adoptó el término de «Desarrollo Sostenible» para definir el desarrollo de las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de que las

generaciones futuras resuelvan sus propias necesidades [Brundtland, 1987]. No obstante, de una forma simplificada se puede decir que el objetivo esencial del desarrollo sostenible es optimizar la utilización de todo tipo de recursos en cualquier decisión o actividad, evitando en un sentido general, cualquier gasto superfluo o injustificado.

Como ya se ha apuntado, de esta tendencia no es ajeno el sector de la construcción y la ingeniería, en el cual se ha hecho un esfuerzo para concebir los proyectos bajo estos nuevos planteamientos [Pacios y Martos, 2008]. En este marco, y durante todo el ciclo de vida del proyecto, la sostenibilidad está relacionada principalmente con aquellos factores que afectan al medio ambiente, pero también tiene en cuenta otras perspectivas como son los aspectos económicos, funcionales y sociales. Esto da lugar a que cualquier estudio que quiera cumplir con esta premisa deba fundamentarse a partir de estos pilares principales de sostenibilidad, de forma más importante si cabe en estos tiempos de restricciones presupuestarias y continuo control por parte de la opinión pública hacia las decisiones de la Administración en lo que afecta a la eficiencia del gasto público y los impactos sobre el medio ambiente de las infraestructuras y otras acciones que afectan al territorio.

En el ámbito de carreteras, campo de actuación de esta tesis doctoral, tradicionalmente el objetivo fundamental de las Administraciones a nivel mundial ha sido desarrollar una red viaria que conecte dos puntos de un territorio, con suficiente capacidad para servir la demanda de transporte manteniendo un adecuado estado de conservación [Bull, 1986; Águeda, 2000]. Sin embargo, en los últimos años se está produciendo un importante cambio en este planteamiento en los países desarrollados [Tochtermann, 2001] debido a que los usuarios, y en definitiva la sociedad, está comenzando a exigir que las carreteras, además de proporcionar una vía de conexión entre los destinos, proporcionen un alto nivel de calidad de servicio [Pardillo, 2005]. Esta demanda, cada vez mayor, ha llevado a un importante desarrollo de las carreteras, tanto en longitud como en características de trazado y de materiales de construcción, lo cual provoca consecuencias en el medio ambiente. Entre estas afecciones destaca el ruido, considerado como una de las principales causas del deterioro ambiental que padecemos en nuestras ciudades y del que es fuente principal el producido por el tráfico.

Por ello, **el ruido del tráfico** debe ser tenido en cuenta como un factor importante en la planificación del transporte y sus infraestructuras con la intención, en primer lugar, de que no se genere el problema, pero, debido a la realidad imperante de grandes zonas pobladas ya expuestas al ruido del tráfico rodado, también se hace preciso el uso de la ingeniería para reducirlo. En este contexto es importante que las premisas de planificación sostenible sean aplicadas al igual que se están imponiendo en los modelos generales de gestión y proyección para carreteras mediante la incorporación de criterios económicos, sociales y funcionales con este propósito [Herbsman *et al.*, 1995; Cafiso *et al.*, 2001; Chan, 2002; Choocharukul, 2004; Delgado *et al.*, 2007]. Claros ejemplos de ello es la aplicación de los modelos multicriterio, los estudios de impacto ambiental y los nuevos diseños para construcción de carreteras [Arena *et al.*, 2001; Cafiso *et al.*, 2001; Chan, 2002].

Sin embargo, y a pesar de todo ello, siguen existiendo problemas en las etapas de planificación, diseño, construcción y de gestión, motivados por la falta de estudios fiables y completos [Díaz, 2000; Battikha, 2003], así como por las lagunas o inconcreciones halladas en la normativa sectorial implicada, carencias que luego reflejan las disfunciones de la vía durante su etapa operativa [El-Rayes, 2005; Del Val Melus, 2007]. Este es el caso de las acciones contra el ruido debido al tráfico de las carreteras, puesto que el técnico de la Administración competente y el proyectista no cuentan con criterios claros en relación con las prioridades que deben tomarse.

De hecho, son numerosas las variables que toman parte en el problema, tanto desde el punto de vista de la generación y propagación del ruido, como de las características de la infraestructura y el entorno que afectan al mismo, así como de la atenuación sonora. En este último aspecto entran en juego las diferentes medidas contra el ruido, que son igualmente variadas, y que abordan el problema desde determinados procesos, en los que de nuevo intervienen diversas variables. La medición de estos aspectos en las obras viarias es una tarea ardua y técnicamente compleja, aunque abordable con criterios científicamente rigurosos, pero la cuestión crucial es, en todos los casos, la asociación de esos factores en el problema del ruido del tráfico de la carretera y, sobre todo, el proceso de toma de decisiones vinculado al mismo.

De acuerdo con todo lo anterior, se hace evidente que los agentes implicados en el proceso necesitan desarrollar mejores métodos e instrumentos para evaluar la actuación de sus proyectos o alternativas dentro del ambiente de incertidumbre o imprecisión relativa que caracteriza al problema analizado. De ahí que se hace más preciso, si cabe, desarrollar una **metodología objetiva y razonada que sirva de herramienta para tomar decisiones acerca de las necesidades de lucha contra el ruido** en este contexto.

Por tanto, la necesidad de esta investigación se articula en torno a cuatro factores:

- La estructuración de los problemas de decisión, con el establecimiento final de la matriz de decisión que será objeto de estudio.
- El análisis del problema de decisión mediante la aplicación de la metodología de toma de decisiones.
- El ambiente donde se desarrollan los problemas de decisión, que como se ha comentado cada vez son más complejos y cambiantes, lo que los sitúa en el campo de la incertidumbre e imprecisión.
- Finalmente, la ordenación final de las alternativas que serán objeto de estudio.

3.2. **OBJETIVO GENERAL DE LA TESIS.**

El objetivo general de la tesis es el desarrollo de una metodología que ayude en la toma de decisiones sobre las actuaciones contra el ruido debido al tráfico de las carreteras, puesto que la normativa sectorial de referencia no determina los criterios que deben tenerse en cuenta al respecto de las prioridades de intervención ni sobre las medidas de atenuación del ruido.

La metodología aborda el proceso de planificación de un plan de actuación contra el ruido en un conjunto determinado de carreteras en dos fases, ordenando en primer lugar los tramos con problemas conforme a la prioridad de acción sobre los mismos, y proponiendo en segundo lugar las alternativas idóneas según un orden basado en criterios previamente establecidos.

3.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Como objetivos específicos que dan apoyo al objetivo principal de la tesis se encuentran los siguientes:

- Determinación de un índice ponderado que permita ordenar los diferentes tramos de carretera que presentan problemas de ruido, basado en criterios objetivos y que adicionalmente posibilite la elección justificada de las mejores opciones de actuación ante los ciudadanos, como establece la normativa.
- Análisis de las variables implicadas en el problema de toma de decisiones mediante la descripción de las mismas, su influencia en el proceso y la valoración de su importancia relativa.
- Análisis y selección de las alternativas técnicas para resolver el problema, mediante un estudio pormenorizado en relación con su funcionalidad, propiedades de implantación, durabilidad, eficacia, coste de inversión y de mantenimiento, impacto social y ambiental, etc.
- Análisis de la influencia mutua entre las variables y las alternativas para la definición de los criterios de decisión sobre la idoneidad de las soluciones.
- Desarrollo de una metodología de asignación de prioridades sobre las diferentes alternativas técnicas posibles para cada tramo de carretera estudiado, de una manera justificada y objetiva y desde los puntos de vista funcional, ambiental, económico y de eficiencia acústica mediante un análisis multicriterio ponderado.
- Aplicación práctica de la metodología a casos reales de carreteras con la intención de mostrar su proceso y validarlo, a la par que desarrollar una comparativa respecto de los publicados o puestos en marcha por la Administración competente sobre los propios tramos, con el fin de apuntar posibles mejoras para el mismo.

3.4. PLAN DE TRABAJO.

Para la consecución de los objetivos planteados, la presente tesis doctoral sigue un plan de trabajo basado en un proceso lógico de desarrollo de la investigación. Ello tiene su reflejo en la propia estructura del documento presente con la intención de mostrar al lector dicho proceso.

Así, en primer lugar, y a la luz de los objetivos definidos, cabe realizar una **extensa búsqueda bibliográfica** hasta alcanzar un adecuado conocimiento del estado del arte en los diferentes aspectos que marcan la investigación, con especial énfasis en primer lugar en la situación de las carreteras y los problemas de ruido que presentan y posteriormente en las herramientas metodológicas de toma de decisiones.

Se realiza, por tanto, un acercamiento a las carreteras como infraestructura viaria que luego es analizada como fuente de ruido, concretando los aspectos históricos, técnicos y socioeconómicos de las carreteras españolas y más explícitamente las andaluzas, pues son el marco de desarrollo de la metodología y de elección de los casos de estudio de la misma, respectivamente, aunque por supuesto su aplicabilidad es universal a cualquier red de carreteras bajo las premisas de la normativa de referencia. En cuanto al ruido, se hace especial hincapié en el estudio de los diferentes aspectos en que debe ser abordado para comprender el problema que se analiza y se pretende resolver. Como relación fundamental entre estos dos pilares de la tesis se encuentra la normativa sectorial de aplicación al problema del ruido en carreteras, que se analiza en sus diferentes ámbitos, partiendo del europeo del cual emanan todas las demás, así como se estudian los condicionantes que ofrece y las herramientas descritas en la misma, como son los MER y los PAR.

Por otro lado, es esencial acometer un estudio del ámbito de trabajo en que se ubica la tesis, fundamentalmente la toma de decisiones, analizando sus conceptos básicos, fases y tipología de técnicas, y centrándose en los métodos multicriterio y las técnicas difusas y su particular modelado lingüístico, que constituirán el marco metodológico de la investigación. Precisan ser estudiados, con profundidad, los fundamentos teóricos y las herramientas metodológicas que se utilizan y de los que se parten para alcanzar los objetivos planteados, de ahí que sean objeto de mayor extensión los métodos utilizados en

la tesis: el proceso analítico jerárquico (AHP) y su variante difusa (FAHP), la suma ponderada, el ELECTRE y el TOPSIS, aparte de la técnica del panel de expertos como caso particular de encuesta estadística utilizada en el proceso de toma de datos necesario para la confección de la información de campo.

Con todo este conocimiento, a continuación se procede a la obtención de resultados, es decir, a la **formulación de la metodología** de toma de decisiones, que se desarrolla fraccionadamente en sus dos fases, y se discuten sus aportaciones al conocimiento. Para ello es importante realizar previamente un correcto planteamiento del problema, que en ambos casos se acomete mediante el apoyo del proceso analítico jerárquico, estructurándolo desde el objetivo principal hacia las alternativas de solución pasando por los factores que lo definen o influyen en él. Puesto que la metodología desarrollada consiste en un análisis multicriterio del problema, se utilizará el gran potencial del FAHP para alcanzar una adecuada ponderación de las variables o criterios que sirven de atributos para la decisión.

Así, en el caso de la primera fase de la metodología, inicialmente el proceso se centra en describir las variables que concurren en el problema de la toma de decisiones sobre la prioridad de actuación en los tramos de carretera con afección acústica, partiendo del estudio de los parámetros y factores que intervienen en el problema analizado para alcanzar una preselección de los que servirán de entrada al sistema de toma de decisión. Sobre estas variables elegidas se hace necesario establecer la correspondiente ponderación, que vendrá dada a partir de las comparaciones pareadas de la técnica de jerarquías analíticas difusa. Como se ha comentado, se opta por obtener dichas comparaciones a partir del método de panel de expertos, así que en este punto procede la elaboración de los cuestionarios en cuanto a preguntas y respuestas posibles se refiere, la selección de los expertos que participarán en esta primera fase y la generación de una adecuada base de datos a partir de sus aportaciones. Por supuesto, las respuestas recibidas serán tratadas como variables difusas mediante un adecuado modelado lingüístico, por lo que precisan una correcta agregación y tratamiento matemático. Como resultado se obtienen finalmente los pesos que pueden ser empleados en el análisis multicriterio. Para facilitar la comprensión de la metodología se define el Índice de Prioridad de Tramo mediante la

aplicación de la técnica de la suma ponderada y se presenta un diagrama de flujo con los pasos a seguir hasta su obtención, así como de nexos hacia la siguiente parte.

En cuanto a la segunda fase, se sigue un procedimiento similar, por lo que para comenzar se plantea el sistema de jerarquías, lo cual precisa definir sus elementos, de los que inicialmente está claro el nivel de objetivo. Sin embargo, las alternativas, objeto principal de esta fase de análisis multicriterio de soluciones contra el ruido debido al tráfico de carreteras, exigen que sea realizada una especial revisión bibliográfica de las técnicas de atenuación de dicho ruido que ofrece actualmente la ingeniería. A partir de este conocimiento y de lo tratado anteriormente, se relacionan las alternativas posibles del análisis, preseleccionadas de entre las soluciones técnicas más factibles para la realidad actual de las carreteras. Del mismo modo, son definidos los criterios utilizados en el proceso, preseleccionados de entre las variables influyentes en el problema y para los que se especifican los indicadores mediante los que son evaluados y comparados. Sobre este sistema de jerarquía, aplicando el método FAHP sobre los resultados arrojados de un nuevo panel de expertos, del que son definidos igualmente sus cuestionarios y población encuestada, son agregadas unas ponderaciones para los criterios. A partir de estos pesos, se presentan al decisor las diferentes propuestas multicriterio para el apoyo de su decisión.

Una vez mostrada la metodología, se acomete el estudio de su aplicabilidad a casos existentes con el objetivo de validarla y compararla con la realidad del problema. Para ello, en primera instancia se presentan los **casos de estudio**, extraídos de la Red de Carreteras Autonómicas de la provincia de Almería, en Andalucía (España), para lo cual se describe brevemente la misma, así como los MER y los PAR realizados por la Administración competente. De entre esta información se extraen los tramos estudiados, que constituyen el campo de aplicación de los casos de estudio.

La metodología es probada en sus dos etapas desarrolladas. Así, se comienza con la aplicación de la primera fase de la metodología para asignar prioridades de actuación a los tramos seleccionados, siguiendo los pasos precisos del método desarrollado: concretar las variables y sus valores a los casos, calcular el Índice de Prioridad de Tramo y acabar con el análisis de los resultados obtenidos. Y, seguidamente, la segunda fase, en la que se realiza el análisis multicriterio para la selección de las alternativas necesarias para resolver el

problema de ruido de los casos prácticos seleccionados. Para ello se eligen las alternativas posibles, se concretan los criterios y sus indicadores para el análisis, se calculan los valores de los atributos para cada alternativa, se normalizan y se aplican los métodos propuestos apoyándonos en la ponderación de criterios alcanzada. A partir de los resultados obtenidos, se procede a una conveniente discusión de los mismos para acrecentar las conclusiones alcanzadas con la investigación y verificar su conveniencia.

De hecho, finalmente se presentan las **principales conclusiones** obtenidas en la tesis, abarcando todos los pasos del presente plan de trabajo, así como las **líneas futuras** que se abren a partir de la investigación desarrollada, como posibles vías de continuación de la misma y con recomendaciones hacia los posteriores avances en los terrenos metodológicos relacionados que puedan producirse.

CAPÍTULO 4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO.

4.1. MATERIAL Y MÉTODOS.

4.1.1. Planteamiento del problema.

Como se ha expuesto en los capítulos anteriores, debido al desarrollo de las carreteras y los sistemas de transporte viario en la actualidad, así como la propia distribución de la población y sus actividades en el territorio, el ruido producido por el tráfico rodado debe ser tenido en cuenta como un factor importante en el conjunto de impactos medioambientales generados por las carreteras y debe ser tenido en cuenta en la planificación del transporte y sus infraestructuras. Para ello, se hace preciso el uso de la ingeniería para reducirlo, tomando como referencia la legislación sectorial, que en nuestro país, así como en toda la Unión Europea, emana de la Directiva Europea de Evaluación y Gestión del Ruido Ambiental analizada anteriormente.

De acuerdo con dicha normativa, a partir de los MER las autoridades competentes de las infraestructuras viarias pueden detectar aquellos tramos donde debe centrarse el PAR correspondiente, los llamados «puntos calientes» (*“hot spots”*), y definir las prioridades de intervención que deben tomarse [Licitra *et al.*, 2011]. Sin embargo, **la Directiva Europea de Ruido Ambiental no define los criterios para encontrar estos «puntos calientes»**, pero es de gran importancia identificarlos correctamente, porque esta tarea afecta significativamente la precisión de los MER y, consecuentemente, de los PAR. Por tanto, queda en manos de las autoridades responsables de cada red de carreteras establecer estos criterios y su importancia a la hora de priorizar la actuación sobre dichos tramos, así como cuáles pueden ser las correspondientes medidas de atenuación del ruido y cómo deben implantarse [WG-AEN, 2007; Silence project, 2009].

Además, estos planes deben ser sometidos a información pública y contar con un plan de financiación para su período de vigencia, lo cual, en el contexto actual de

limitación presupuestaria y de acuerdo con la siempre obligada eficiencia en el gasto público, hace que sea preciso solventar esta debilidad del proceso y poder realizar una identificación razonada de los «puntos calientes» citados anteriormente, así como una planificación razonada y objetiva de las actuaciones de los PAR que permita dotar de mayor eficiencia a las mismas y además pueda mostrarse a la opinión pública de una forma justificada y coherente [Licitra *et al.*, 2011].

De hecho, como se ha visto, de la aplicación de la Directiva Europea de Ruido Ambiental no se deduce un procedimiento reglado que establezca prioridades de actuación entre los diferentes tramos de carreteras incluidos en los correspondientes PAR. Este hecho provoca que en el proceso de toma de decisiones que se plantea para la determinación de estas prioridades exista gran cantidad de elementos de incertidumbre e indefinición, que, al ser tratados de manera subjetiva e injustificada por el decisor o por parte de los responsables de dichos planes, da como resultado una planificación deficiente en muchos aspectos. De hecho, del estudio realizado sobre **los planes publicados en España** hasta la actualidad se puede concluir que **adolecen de grandes carencias en su formulación y justificación**.

Por tanto, se plantea el **problema de establecer una metodología que ayude a las autoridades competentes en la elaboración de los PAR en la toma de decisiones sobre las prioridades de actuación** que deben aparecer en los mismos, es decir, en qué tramos con presencia de problema de ruido debido al tráfico rodado es más conveniente actuar antes que en otros y por qué. Ante este objetivo, lo primero que cabe estudiar es la existencia en la bibliografía especializada en el tema de propuestas de metodología de aplicación de la Directiva Europea de Ruido Ambiental que pudieran constituir una base para este apoyo a la decisión, pero de dicha búsqueda se ha podido concluir la falta de un modelo completo que guíe el proceso de implantación de estas medidas por parte de las administraciones titulares de las carreteras.

Partiendo, por tanto, de esta premisa, procede un análisis detallado de los factores que intervienen en el problema y de las técnicas que sirvan de base para la metodología de toma de decisiones buscada. Es decir, puesto que en el proceso de elección de soluciones al problema del ruido ambiental debido al tráfico de las carreteras intervienen muchos

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

factores, para poder desarrollar un adecuado y eficiente Plan de Acción como exige la normativa, es necesario conocer todos estos parámetros y sus características en relación con el ruido de forma pormenorizada.

De este modo, y una vez conocidas las particularidades del fenómeno del ruido y su relación con las carreteras en la actualidad, así como las prescripciones más importantes de la normativa de referencia, es necesario continuar esta revisión bibliográfica extensa con el fin de obtener un adecuado «estado del arte» al respecto del ruido generado por el tráfico rodado. Ello permitirá obtener un listado muy completo de los factores que afectan al nivel sonoro sufrido por los ciudadanos debido al tráfico de las carreteras, así como extraer de cada una de estas variables la información necesaria para conocer su influencia y su importancia en relación con el tema estudiado.

Queda claro, por tanto, que **el problema de decisión planteado es del tipo multicriterio y discreto** y que las variables que intervienen en él, a modo de criterios, presentan un distinto grado de importancia, con lo que será imprescindible aplicar una ponderación adecuada a las variables seleccionadas y posteriormente un proceso de ordenación de los tramos. Para ello serán empleadas las herramientas metodológicas previamente presentadas, pero sin perder de vista que el objetivo buscado es el de desarrollar un sistema de ayuda para la toma de decisiones en relación con la priorización de los tramos de carreteras contenidos en cualquier PAR, es decir, se plantea una metodología genérica que pueda ser aplicada a cualesquiera alternativas existentes (que en este caso serían cada uno de dichos tramos) y ordenarlas según su prioridad de actuación.

Por tanto, es necesario usar, en primer lugar, una **técnica de ponderación** y, seguidamente, un **método de agregación multicriterio**, puesto que, como resultado final, y con la intención de ofrecer al decisor un instrumento intuitivo y fácil de usar para realizar esta priorización, se pretende definir un **índice ponderado** que permita ordenar los tramos objeto de análisis en el correspondiente PAR, para que así sirva de apoyo en la justificación de la planificación propuesta hacia los ciudadanos [Licitra *et al.*, 2011].

A continuación se explicitan las técnicas utilizadas para alcanzar la propuesta de la metodología así como los pasos seguidos hasta la consecución de la misma, de acuerdo con los objetivos marcados y el plan de trabajo descrito anteriormente.

4.1.2. Presentación del método.

De acuerdo con todo lo anterior, cuando ya se tienen disponibles los MER y se han localizado los tramos conflictivos o «puntos calientes», la primera disyuntiva ante la que se enfrenta la Administración cuando ha de diseñar los PAR correspondientes a su red de carreteras es la de planificar las actuaciones en el tiempo, ya que la normativa exige que el Plan incluya las previsiones económicas que den soporte a las acciones proyectadas.

Se parte, como se ha dicho, de un problema de decisión multicriterio discreto en el que intervienen varias variables de diferente importancia. Sin embargo, no solo es así, ya que, como se ha evidenciado, las decisiones que deben tomarse durante la fase de elaboración de una planificación estratégica en el ámbito de la ingeniería civil, y más concretamente en el campo de las carreteras, hoy en día constituyen un proceso delicado y lleno de interrogantes y dificultades. Muchas de estas decisiones, que deben ser argumentadas y justificadas, se basan en factores cualitativos, incompletos e imprecisos. De esta forma **los métodos tradicionales para evaluar la factibilidad técnica y económica de estos planes son reconocidamente inapropiados** para tales decisiones. En los últimos años diversos métodos de decisión multicriterio han sido incorporados a estos procesos de decisión pero, lamentablemente, como ha sido analizado en el estudio realizado sobre los mismos, estos métodos aún fallan al tratar de utilizar informaciones precisas y totalmente cuantificables. Procede, por tanto, la elección de métodos difusos, que se han transformado en técnicas adecuadas para poder potenciar las decisiones tomadas en ese ámbito a partir de información de tipo cualitativo y con incertidumbre [Turban and Aronson, 1998; Kahraman, 2008b].

Así, la metodología propuesta se basa en la **aplicación del proceso analítico jerárquico difuso (FAHP)** para acceder a la ponderación de las variables seleccionadas

para la metodología, a partir de los juicios realizados por especialistas mediante un panel de expertos.

De hecho, realizada la revisión de literatura sobre las principales técnicas de análisis multicriterio difuso que se emplean a nivel mundial como alternativa para el manejo de la imprecisión en la información, se construye esta propuesta metodológica con base en el análisis realizado a las ventajas y limitaciones que presentan los diferentes métodos y retomando de ellos los aspectos útiles que hacen de esta una propuesta práctica, comprensible y fácil de emplear por los decisores expertos y no expertos. Es importante resaltar que esta elección es producto de un análisis exhaustivo de las propuestas de los diferentes autores, de ahí que se seleccione como método de ponderación de criterios o variables el FAHP, una vez se evaluaron sus posibilidades, desventajas, ventajas e inconvenientes prácticos.

Previamente, es necesario obtener los datos necesarios para tener en cuenta en la metodología, a partir del análisis bibliográfico del tema. Una vez definidas las variables que actuarán como criterios del modelo, que son denominadas «**Variables de Prioridad de Tramo**» (“*Road Stretch Priority Variables*”, RSPV) [Ruiz-Padillo *et al.*, 2014], debe establecerse el sistema de jerarquía para la aplicación del FAHP y así comenzar con los pasos del algoritmo descritos anteriormente. Así, en la etapa de valoración de los criterios, se utiliza la técnica del panel de expertos para conseguir las comparaciones pareadas de la importancia relativa entre las variables. Por tanto, es requisito previo definir la escala de valoración difusa utilizada y las etiquetas lingüísticas relacionadas y con ello preparar los cuestionarios. La información suministrada por los expertos a partir de los cuestionarios debe ser debidamente codificada, representada y agregada hasta obtener la matriz de valoración de criterios, compuesta obviamente por números difusos triangulares.

A partir de ahí, se aplica el FAHP hasta dar con el vector de pesos, oportunamente *defuzzificado*, y se verifica la consistencia del resultado obtenido. Pero antes de eso, las RSPV que intervienen en el proceso deben ser comparables entre sí, por lo que es imprescindible establecer una adecuada normalización de los valores discretos que presenta cada variable dentro de su rango correspondiente [Naish, 2010]. Como ya se comentó en el capítulo 2, el procedimiento escogido para realizar la normalización es el

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

lineal respecto de la suma de los elementos, que es el utilizado en la técnica de jerarquías analíticas:

$$v_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad i=1, \dots, n \quad (\text{ec. 4.1})$$

siendo V_i los valores de las n variables y v_i sus respectivos valores normalizados.

Con la ponderación conseguida, que define la importancia de cada una de las RSPV dentro del escenario analizado, ya es posible definir el índice ponderado buscado, denominado «**Índice de Prioridad de Tramo**» (“*Road Stretch Priority Index*”, RSPI), a partir de la técnica de la suma ponderada, que es la más intuitiva y conocida en el ambiente de la ingeniería civil y más fácilmente comprensible por destinatarios no expertos ni familiarizados con los métodos multicriterio [Ruiz-Padillo *et al.*, 2014]. Obsérvese que el FAHP no se culmina con el último paso de la técnica, la de evaluación y jerarquización de las alternativas, ya que se utiliza el proceso jerárquico como método de ponderación y no estrictamente como de decisión multicriterio, para lo cual se emplea la agregación lineal ponderada. Así, del enorme potencial que presenta el FAHP para realizar la síntesis completa del problema de toma de decisiones, en el problema planteado se aprovecha su característica más interesante, las comparaciones pareadas en versión difusa para alcanzar la información más valiosa que precisa el decisor a la hora de generar el PAR: las variables que intervienen y su importancia relativa, todo lo cual queda englobado en el RSPI.

De hecho, el resultado que arroja el cálculo de este índice aplicado a un caso concreto se presenta muy útil para que la Administración o autoridad competente en afrontar el problema presentado por el ruido del tráfico rodado pueda establecer el orden de prioridad de actuación por tramos afectados, así como poder justificar esta decisión ante la opinión pública en su correspondiente PAR, como marca la normativa europea.

Como puede observarse, la presente propuesta metodológica está construida con la selección y ensamble de las técnicas más desarrolladas, pertinentes y eficientes aplicadas al caso de estudio. Además, es de **carácter general** y tiene aplicación en los procesos de toma de decisiones en presencia de imprecisión en la información, que es lo habitual en la etapa de planificación estratégica en que se desarrolla la elaboración de un PAR.

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

Adicionalmente la metodología propuesta es flexible, dado que permite la manipulación de todo tipo de información, esto es: datos del tipo *crisp*, variables que se valoran de forma lingüística y datos del tipo *fuzzy* que aunque podrían valorarse cuantitativamente, la información al respecto está incompleta y no puede obtenerse.

No obstante, y como ya se comentó, la metodología propuesta no quiere sustituir al decisor en su papel de planificador implicado en el proceso, sino que quiere constituir una **ayuda a la toma de decisiones**, de modo que la ponderación conseguida puede ser alterada por el responsable del plan, pero el RSPI que se presenta puede servir de indicador objetivo y razonado para el establecimiento de prioridades dada su importante base teórica y práctica emanada de la literatura analizada, el empleo de las técnicas seleccionadas y la comprobación de su conveniencia al problema.

Finalmente, para una mayor sencillez y eficiencia de aplicación de la metodología se presenta un diagrama de flujo, mediante el cual se van extrayendo ordenadamente las RSPV y permite establecer un orden claro de actuación en el método hasta la culminación de esta primera fase.

4.2. VARIABLES DE LA METODOLOGÍA.

4.2.1. Identificación de parámetros y factores.

Las variables estudiadas para cada receptor cerca de una carretera, las características de la infraestructura existente, la existencia de medidas contra el ruido o la posibilidad de instalar nuevas, el entorno construido existente revisado a través de fotografías aéreas y, por supuesto, los MER, todo ello en conjunto y por separado contribuye a la identificación de los tramos que precisan medidas de acción contra el ruido y sobre los que definir la estrategia de gestión, las posibilidades de planificación y el alcance de una evaluación lo más detallada posible [Naish, 2010; Ausejo *et al.*, 2011].

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

Como resultado del estudio realizado sobre la bibliografía especializada en el tema y que ha sido sintetizado en los capítulos 1 y 2 de la presente tesis, ha sido posible determinar que las **variables que intervienen en la generación, propagación, atenuación e inmisión del ruido debido al tráfico de las carreteras** y que, por tanto, deben ser tenidas en cuenta en la elaboración de los PAR son [Imagine Project, 2004; De Coensel *et al.*, 2005; Naish, 2010; Torija *et al.*, 2010; Ausejo *et al.*, 2011]:

- IMD, distribución horaria del tráfico y porcentaje de vehículos pesados.
- Velocidad media de los vehículos ligeros y pesados y su distribución horaria.
- Valores de $L_{\text{día}}$, L_{tarde} , L_{noche} y L_{den} , su representación en el espacio y datos de superficie expuesta y población afectada en las fachadas más expuestas (mapas de ruido).
- Usos del suelo.
- Existencia de infraestructuras docentes, sanitarias y culturales junto a la carretera.
- Datos de población absoluta, densidad de población y medias de unidad familiar.
- Tipos de edificaciones y número de viviendas por edificación.
- Quejas de la población en relación con el ruido.
- Humedad del aire.
- Temperatura del aire.
- Precipitación media anual.
- Datos de viento.
- Definición geométrica de los tramos de carretera.
- Tipo de pavimento de la carretera.
- Velocidad específica del tramo.
- Topografía del entorno y la carretera.
- Descripción de los elementos accesorios a la vía.

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

- Situación de la infraestructura en el planeamiento.

A continuación son descritas estas variables agrupadas según categoría, analizando aquellas características que intervienen en el problema estudiado y cómo influyen a la hora de establecer prioridades de actuación.

Datos de tráfico.

Como se deduce de la normativa, el primer factor al que debe atenderse al estudiar las carreteras en relación con el ruido, antes incluso de pasar a determinar el nivel sonoro que soporta su entorno, es precisamente el tráfico que presenta [Ausejo *et al.*, 2011], puesto que los horizontes temporales para la generación de los MER y la formulación de los planes de acción vienen definidos por la normativa europea y nacional en función del volumen de tráfico anual de los ejes viarios, como ya se ha visto [Directiva 2002/49/CE, 2002; Ley 37/2003 de España, 2003]. De hecho, son utilizados por todos los programas de predicción de ruido para construir los MER [WG-AEN 2007; Ausejo *et al.*, 2011].

Habitualmente, los datos de tráfico de las carreteras obtenidos de los planes de aforos arrojan datos de IMD, de ahí que (teniendo en cuenta que seis millones de vehículos al año representa una intensidad media diaria de vehículos mayor a 16.438 veh/día y que tres millones de vehículos al año suponen una IMD de más de 8.219 veh/día) se distinguen claramente tres grupos de carreteras según su obligatoriedad de estudio en relación con el ruido:

- Grupo I: carreteras con $IMD > 16.438$ veh/día, con obligación de predecir el nivel sonoro en 2007 y definir el PAR en 2008.
- Grupo II: carreteras con $16.438 \text{ veh/día} \geq IMD > 8.219$ veh/día, en las que el mapa sonoro debía estar listo para 2012, así como el PAR correspondiente en 2013.
- Grupo III: carreteras con $IMD \leq 8.219$ veh/día, para las que no es necesario generar los mapas estratégicos de ruido y, por tanto, no existe obligación de incluirlas, a priori, en los PAR.

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

Por otro lado, también hay que tener en cuenta que la intensidad de tráfico, así como el porcentaje de vehículos pesados, en ambos casos en su distribución horaria, así como la de las velocidades de vehículos ligeros y pesados son datos fundamentales para la generación de los mapas de ruido y la obtención de los valores de los índices de ruido definidos.

Sin embargo, aparte de con este fin, los datos que facilitan los planes de aforo de las carreteras e influyen en la metodología son la IMD, la fracción de vehículos pesados y el promedio de velocidad del parque de vehículos que pasa por cada tramo de vía, ya que son importantes para la elección de las alternativas así como para asignar mayor prioridad a aquellos receptores cerca de las carreteras con mayor volumen de tráfico y mayor número de vehículos comerciales [Ouis, 2001; Naish, 2010], puesto que, como se ha visto, los vehículos pesados suelen ser responsables en un alta proporción del ruido generado por el tráfico de las carreteras.

Finalmente, indicar que en aquellos casos en que no se disponga de los datos actualizados de velocidad media se puede tomar como dato en cada segmento de la vía la velocidad específica o máxima permitida en el mismo.

Quejas de los ciudadanos respecto al ruido.

Ha quedado claro que, es posible que, para carreteras de bajo tráfico, no sea necesario proceder siquiera al estudio del ruido generado por ellas. Sin embargo, se estima importante identificar grupos potenciales de vecinos que hayan presentado quejas al respecto del ruido, pero es importante filtrarlos previamente según la fuente del ruido y considerar únicamente aquellas relacionadas con el ruido del tráfico rodado [Naish, 2010; Licitra *et al.*, 2011]. Es decir, se seleccionarán solo aquellas quejas sobre el ruido del tráfico de las carreteras, puesto que a menudo los ciudadanos se quejan sobre situaciones ruidosas a través de las autoridades locales, proporcionando así una información muy útil incluso sin ser preguntados por ello, pero en la inmensa mayoría las quejas recibidas se deben a otras fuentes de ruido (en la comunidad o de otras viviendas o locales, de actividades de ocio, etc.) que no están cubiertas por la Directiva Europea de Ruido Ambiental para ser incluidas en los MER [Silence project, 2009].

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

Por tanto, si existen datos concretos de problemas con el ruido ambiental es recomendable, aunque no venga obligado por la normativa, estudiar los niveles sonoros que soporta un determinado tramo de carretera conflictivo y así discernir si es preciso o no adoptar medidas contra el ruido.

Por tanto, esta circunstancia introduce una variable adicional, como es la existencia de quejas registradas en relación con el ruido de una carretera.

Índices de ruido.

Como es obvio, el nivel de presión sonora generado por el tráfico rodado es la variable de capital importancia [Naish, 2010; Torija *et al.*, 2012] no solo a la hora de valorar unas u otras actuaciones, sino también como punto de inicio de este estudio, ya que, por supuesto, la metodología para establecer prioridades de acción contra el ruido se utiliza para aquellos tramos en que se rebasan los límites establecidos por la normativa («puntos calientes») [Silence project, 2009].

Por tanto, una vez que se determina la obligatoriedad o necesidad de estudiar las carreteras en este sentido, se procede a la elaboración de los correspondientes MER y así determinar los niveles sonoros debido al tráfico de la infraestructura en su zona de afección acústica. Con ello se obtienen los valores de los índices de ruido $L_{\text{día}}$, L_{tarde} , L_{noche} y L_{den} ya definidos en el apartado 1.2.2, que deberán compararse con los límites legales establecidos para ver no solo si es necesario adoptar medidas paliativas, sino también el grado de incumplimiento de la normativa al determinar en qué medida rebasan los niveles alcanzados los valores límite, porque ello va en redundancia de la prioridad de actuación que haya que establecer para los tramos de carreteras así como en la elección, según su eficacia, de entre las diferentes soluciones técnicas posibles.

Para ello es indispensable combinar estos datos con los obtenidos de las variables siguientes, que son los que dan verdadero valor a los resultados de los índices de ruido, pues su importancia radica en el grado de superación de los valores límite prescritos por la normativa.

Usos del suelo y zonificación acústica.

Así, otro dato importante que hay que definir en relación con el tramo o tramos de carretera que se estudien es el de los usos del suelo adyacentes a la misma. Para ello es necesario acudir a los instrumentos de planeamiento existentes en el municipio por el que discurre la infraestructura y determinar cuáles son los usos actuales de las parcelas vecinas de la carretera además de las expectativas futuras que caben dentro de la planificación urbanística aprobada.

Fundamentalmente hay que distinguir los usos para encuadrarlos dentro de las zonas acústicas establecidas por la normativa, que son las que más adelante darán los valores límites de ruido para las mismas.

Así, tanto la Ley 37/2003 como el Decreto 6/2012 de la Junta de Andalucía dividen el territorio en diferentes zonas de acuerdo con los usos principales que se desarrollan en ellas, llamadas áreas acústicas, definidas como aquellos ámbitos territoriales donde se pretende que exista una calidad acústica homogénea. Son los siguientes:

- Clase A: sectores con predominio de suelo de uso residencial.
- Clase B: sectores con predominio de suelo de uso industrial.
- Clase C: sectores con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos.
- Clase D: sectores con predominio de suelo de uso terciario distinto del contemplado en la clase C. En esta clase el decreto andaluz especifica el uso turístico, de especial relevancia en Andalucía.
- Clase E: sectores con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera una especial protección contra la contaminación acústica.
- Clase F: sectores del territorio afectados a sistemas generales de infraestructuras de transporte u otros equipamientos públicos que los reclamen.
- Clase G: espacios naturales que requieran una especial protección contra la contaminación acústica.

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

Dichas áreas serán determinadas por cada Ayuntamiento, dentro de su correspondiente término municipal, en atención a los usos predominantes del suelo, actuales o previstos. Igualmente, debe determinarse el número de colegios, institutos, universidades y otros centros de ámbito docente o cultural, así como el número de hospitales y otros centros sanitarios que puedan verse afectados por el ruido de la carretera, ya que, además de influir en la zonificación acústica, suele asignarse mayor prioridad a los tramos que presentan afección a estos edificios [Ministerio de Fomento, 2010].

Objetivos de calidad acústica.

Como ya se ha dicho, una vez determinado el nivel de ruido que soporta una infraestructura y realizada la zonificación acústica de su entorno, procede diagnosticar el cumplimiento o no de la normativa. Para ello, el Real Decreto 1367/2007 y el Decreto 6/2012 andaluz establecen unos objetivos de calidad acústica para áreas urbanizadas existentes en función de las áreas acústicas y que son los recogidos en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: *Objetivos de calidad acústica para ruido aplicables a áreas urbanizadas existentes. Fuentes: [Real Decreto 1367/2007, 2007; Decreto 6/2012 de la Junta de Andalucía, 2012].*

| Clase | Usos principales | Objetivo de calidad acústica | | |
|-------|--|------------------------------|--------------------|--------------------|
| | | L _{día} | L _{tarde} | L _{noche} |
| A | Predominio residencial | 65 | 65 | 55 |
| B | Predominio industrial | 75 | 75 | 65 |
| C | Predominio recreativo y espectáculos | 73 | 73 | 63 |
| D | Predominio terciario (salvo anterior) | 70 | 70 | 60 |
| E | Predominio sanitario, docente y cultural | 60 | 60 | 50 |
| F | Infraestructuras de transportes y equipamientos públicos | Sin determinar | | |
| G | Espacios naturales que requieran protección | Sin determinar | | |

Estos valores de ambas normativas, muy actuales, son bastante cercanos a los que, en el ámbito de carreteras, ya fueron adoptados en el XVI Congreso Mundial de la Carretera (Viena, septiembre de 1979) para el conjunto de los países participantes y que se pueden resumir de la siguiente manera [Cegarra Plane, 1982]:

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

- para el día, los umbrales se situaban entre 55 dB(A) y un máximo absoluto de 75 dB(A), y excepcionalmente 80 dB(A) para el 15% como máximo de los edificios expuestos al ruido.
- para la noche, se reducían los umbrales en 10 dB(A).

Tanto la Ley estatal 37/2003 como la Ley andaluza 7/2007 contemplan la creación de zonas de servidumbre acústica, que son aquellos sectores del territorio situados en las cercanías de grandes infraestructuras de transporte viario, ferroviario o aéreo, así como otros equipamientos públicos, con el objetivo de conseguir la compatibilidad del funcionamiento o desarrollo de las mismas con los usos del suelo, actividades, instalaciones o edificaciones implantadas, o que puedan implantarse, en la zona de afección por el ruido originado en dichas infraestructuras. Es importante destacar que el reglamento establece que en los sectores del territorio gravados por servidumbres acústicas las inmisiones podrán superar los objetivos de calidad acústica aplicables a las correspondientes áreas acústicas y donde se podrán establecer restricciones para determinados usos del suelo, actividades, instalaciones o edificaciones, con la finalidad de, al menos, cumplir los valores límites de inmisión establecidos para aquellos [Ley 37/2003 de España, 2003; Ley 7/2007 de Andalucía, 2007].

Como ya se ha dicho, la zonificación acústica y la determinación de áreas de sensibilidad acústica corresponden a los Ayuntamientos, por lo que es muy frecuente encontrarse con que esta diferenciación del territorio aún no haya tenido lugar de manera exhaustiva. De ahí que habitualmente se tomen los límites de las zonas residenciales en el caso general (tipo A), y que se adopten límites más restrictivos para las áreas de mayor sensibilidad o de especial protección, determinadas por el tipo E.

La diferencia entre los valores de los índices de ruido, calculados o arrojados por los mapas de ruido, y los objetivos de calidad acústica da lugar a un factor importante que determina el grado de incumplimiento de la norma y, por tanto, la atenuación que es necesaria alcanzar con las medidas antirruído, obtenida según la siguiente expresión:

$$\Delta L = L_{\text{exist}} - L_{\text{obj}}, \quad (\text{ec. 4.2})$$

donde: ΔL es la atenuación necesaria.

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

L_{exist} es el índice de ruido existente obtenido del mapa de ruido.

L_{obj} es el índice de ruido del objetivo de calidad acústica buscado, obtenido a partir de la zonificación acústica derivada de los usos del suelo adyacentes.

Superficie, viviendas y población expuestas.

Para detectar los «puntos calientes» o tramos donde se centra el PAR, y sobre los que deben establecerse prioridades de actuación, otros de los parámetros más determinantes y que, por tanto, es necesario identificar, son la superficie y el número de personas que se encuentran en una situación de ruido excediendo los límites prescritos por la normativa [Ausejo *et al.*, 2011]. Además, la Directiva Europea de Ruido Ambiental exige que los PAR informen sobre el número de personas afectadas tanto en la situación inicial como después de implantar las medidas de atenuación seleccionadas [Silence project, 2009]. Con este propósito, se extraen de los mapas estratégicos detallados de ruido en primer lugar los datos de superficie, viviendas y población expuestas, de modo que cuanto mayores sean la extensión y el número de habitantes que estén sufriendo niveles sonoros de ruido ambiental debido a la carretera, mayor prioridad podrá asignarse a las medidas necesarias para paliar el problema.

Como es sabido, para la estimación de la población expuesta y del número de viviendas afectadas, es necesario conocer los datos de edificación de la zona (densidad de población, unidades residenciales para cada edificio y media de tamaño familiar) y la extensión dentro cada intervalo de niveles sonoros determinados por los mapas estratégicos.

Y aparte de los datos de población expuesta también son importantes en el método el número de viviendas y su tipología, de modo que se suelen diferenciar las siguientes clases de edificaciones [COPT, 2007]:

- Vivienda adosada o pareada: vivienda unifamiliar unida por los tabiques derecho e izquierdo de su fachada principal a otras viviendas unifamiliares. Puede ser de una o varias plantas, tener o no anejos y estar dentro de una parcela de terreno igual o mayor que el edificio.

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

- Vivienda aislada: viviendas unifamiliares construidas con todos sus muros independientes. Al igual que las anteriores, pueden ser de una o varias plantas, tener o no anejos y estar dentro de una parcela de terreno igual o mayor que el edificio.
- Multifamiliares verticales: viviendas multifamiliares, construidas de forma aislada, que presentan un desarrollo vertical y que están integradas por unidades de viviendas.
- Nave industrial: cada uno de los espacios que se extienden entre muros para formar una fábrica, almacén u otra construcción de tipo industrial.
- Vivienda rústica: construcción utilizada para vivienda, fuera del casco urbano.
- Edificio agrario rústico: construcción utilizada para servicios agrarios, como silos, granjas, explotaciones ganaderas, etc.
- Explotación agrícola: superficie rústica dedicada a la labranza o cultivo de la tierra o la ganadería. Puede incluir o no viviendas, naves u otras edificaciones, como los típicos cortijos.

Datos meteorológicos.

Como se ha visto, L_{den} es un indicador de ruido anual que describe el nivel de presión sonora equivalente promedio entre el día, la tarde y la noche durante un año completo. En el transcurso de un año las variaciones de las condiciones meteorológicas pueden tener un impacto significativo en los niveles de ruido y, como tal, la forma en que las condiciones meteorológicas son incorporadas en el modelo de cálculo para la generación de los mapas de ruido influirá en los resultados finales [Murphy and King, 2010].

Por tanto, en la generación de los MER se suelen introducir los datos de temperatura y humedad, puesto que son los que afectan en mayor medida a la atenuación que produce la atmósfera en la propagación del ruido a través del aire.

Otra variable meteorológica que interviene también en la propagación del ruido es el viento, como se ha visto en el capítulo 1, pero además puede afectar al comportamiento de las barreras acústicas en función de su velocidad y dirección [Watts, 1996(a)], como se estudiará en el siguiente capítulo. Finalmente, otros parámetros meteorológicos que influyen en el problema son la precipitación y la nieve, pero su influencia, aun escasa como igualmente se verá más adelante, recae fundamentalmente sobre la eficiencia de determinadas soluciones contra el ruido [WG-AEN, 2007], es decir, sobre las alternativas, por lo que no se considera necesario profundizar más al respecto en esta fase de la metodología.

Caracterización técnica de la infraestructura y el entorno.

Se presenta en este apartado un conjunto grande de parámetros que permiten definir la infraestructura propiamente dicha, es decir, la carretera en sí, y que, además, influyen en el problema del ruido y sus posibles soluciones. De este modo, se puede hacer referencia a las siguientes variables:

- Número de calzadas.
- Número de carriles y su anchura.
- Existencia de arcenes y su anchura.
- Existencia de mediana.
- Tipo de pavimento existente.
- Perfil longitudinal.
- Trazado en planta.
- Velocidad específica.
- Situación (cotas) respecto del terreno circundante.
- Si se trata de un tramo urbano o interurbano, de una travesía o de una vía urbana (de acuerdo con las definiciones de las leyes de carreteras) [Ley 25/88 de España, 1988; Ley 8/2001 de Andalucía, 2001].
- Existencia de accesos o no.

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

- Existencia de intersecciones o enlaces.
- Existencia de medidas de control del tráfico o de la velocidad (semáforos, radares, elementos reductores de velocidad...).
- Elementos de protección o balizamiento.
- Existencia previa de medidas de protección acústica.
- Tránsito permitido o no a los peatones.

Y aparte de algún otro dato que pueda considerarse de interés, hay que añadir los datos topográficos de la zona adyacente, incluyendo los terrenos y las edificaciones. Para ello, habitualmente, y con el objetivo de poder realizar la simulación acústica que genere de forma adecuada los mapas de ruido, se forma un modelo en tres dimensiones a partir de vuelos fotogramétricos georreferenciados, lo cual permite también obtener una cartografía de la zona.

Por otro lado, los datos puramente geométricos de la carretera, aparte de caracterizar la infraestructura para la simulación acústica que da lugar a los MER, pueden influir en las posibilidades de establecer una u otra medida antirruído, por lo que se profundizará igualmente en este aspecto en el siguiente capítulo. Además, la predicción de niveles de ruido en tramos fuertemente encajados entre edificaciones o muy apantallados en zonas urbanas debe incluir muchos caminos de propagación del ruido debido a las múltiples reflexiones, difracciones y dispersiones, además de la exposición directa [De Coensel *et al.*, 2005; Thorsson and Ögren, 2005].

No obstante, sí es importante tener en cuenta en esta primera fase de la metodología la existencia de alguna medida de atenuación acústica bien ya implantada previamente al estudio, bien planificada con anterioridad al estudio o bien decidida en un tramo adyacente al que se esté tratando en ese momento, pues todo ello condiciona la asignación de prioridades.

De este modo, por ejemplo, el hecho de que la carretera cuente con pavimentos de tipos de emisión de ruido relativamente altos permite asignar mayor prioridad a la solución

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

del firme fonoabsorbente, mientras que si ya cuenta con este tipo de pavimentos descarta utilizar esta opción. En otro caso, se puede valorar más la posibilidad de instalar barreras acústicas en aquellas zonas donde aún no existan otras barreras, mientras que es lógico asignar menor prioridad a un tramo si existen barreras instaladas previamente o que ya estén planificadas [Naish, 2010].

Sin embargo, el resto de estos datos de caracterización de la infraestructura no son determinantes a la hora de establecer prioridades sobre los «puntos calientes», aunque son esenciales para la elaboración de los MER.

Ordenación del territorio y planificación viaria.

En este apartado se engloban las posibilidades de que existan nuevas infraestructuras planificadas que sirvan de alternativa al tramo de carretera conflictivo, así como otras redes adyacentes que también pudieran serlo en la actualidad. Puede ser el caso de una variante de población o una modificación importante del trazado de la carretera que afecte al tramo estudiado.

Por otro lado, los condicionantes que impongan los parámetros de ordenación del territorio o planificación urbanística de la zona pueden ser factores limitantes para la asignación de las prioridades correspondientes a los tramos del PAR e, incluso, afectar a determinadas soluciones técnicas de las posibles.

Finalmente, aparte de para el establecimiento de los límites de niveles sonoros según la zonificación acústica del entorno de las carreteras, los datos de ordenación del territorio permiten discernir si ya existen actuaciones acometidas planificadas en relación con la atenuación del ruido y si estas corresponden a promotores privados [Naish, 2010; Ausejo *et al.*, 2011]. Así, la existencia de condiciones de planificación ya establecidas permite dar mayor prioridad a aquellos tramos de carretera cuyas parcelas vecinas no tengan ya prevista y definida alguna acción contra el ruido.

4.2.2. Preselección de variables.

Como resultado del estudio realizado sobre los factores que intervienen en el problema y que han sido relacionados en el apartado anterior, queda patente en primer lugar el elevado número de variables que influyen en la percepción del ruido procedente del tráfico de las carreteras. Este hecho podría repercutir negativamente en la aplicación del FAHP tanto en el establecimiento de prioridades a los tramos de estudio como en la posterior elección de la mejor solución para un caso concreto, puesto que, como se vio en el capítulo 2, el número recomendado para los problemas de decisión multicriterio discretos en general y para las jerarquías analíticas en particular es inferior a 10. Por tanto, cabe realizar una preselección de entre todas las variables implicadas de aquellas verdaderamente significativas en el proceso de toma de decisiones y así introducir en la metodología de establecimiento de prioridades solo aquellas que son más representativas y destacables [Naish, 2010], evitando la inclusión de «ruido» en el sistema.

Por tanto, procede realizar determinadas simplificaciones que permitirán reducir el número de variables que intervienen en el proceso de elección, así como descartar aquellas que presentan escasa influencia en el método o bien generar variables compendio de varias relacionadas íntimamente entre sí [Ruiz-Padillo *et al.*, 2014].

Así, al contar con los datos de IMD, porcentaje de pesados y velocidad media (en su defecto, velocidad máxima permitida) de cada tramo, no es preciso contar para la metodología con los valores de tráfico y velocidad desglosados por franjas horarias ni distinguir entre velocidades de vehículos ligeros y pesados, puesto que los datos que ofrecen los mapas de ruido ya los han tenido en cuenta y no son determinantes para la asignación de prioridades. Se toman, por tanto, las variables IMD, porcentaje de vehículos pesados y velocidad media del tramo, que se denotarán como «IMD», «%vp» y «v», respectivamente.

Continuando con la relación de parámetros, sí se tendrá en cuenta, caso de que existan, la existencia de quejas o reclamaciones en relación con el ruido debido al tráfico producidas en un tramo concreto de carretera. Este dato quedará englobado en la variable

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

«E_Q» (que adopta un carácter binario, es decir, su universo de referencia es «sí» o «no», que se asimilan a valores de 1 y 0 respectivamente).

Al hilo de lo anterior, se considerarán los valores de $L_{\text{día}}$, L_{tarde} y L_{noche} que ofrecen los mapas de ruido, es decir, distribuidos gráficamente según las franjas establecidas, que suelen tomar los intervalos siguientes: entre 55 y 65 dB(A), entre 65 y 75 dB(A) y valores superiores a 75 dB(A). A partir de los usos del suelo y la correspondiente zonificación acústica, se deducen los objetivos de calidad acústica, que al combinarlos con los valores de los índices de ruido anteriores, permitirán calcular la atenuación mínima necesaria, ΔL . Pero es evidente que no debe darse la misma importancia los niveles diurnos y nocturnos, ya que el grado de molestia es superior durante la noche incluso a niveles de ruido inferiores. Por tanto, la variable « ΔL » puede dividirse en dos subvariables, según la franja horaria: la atenuación mínima en período diurno, « ΔL_d », y la atenuación mínima en período nocturno, « ΔL_n »; obtenidas a partir de los valores de $L_{\text{día}}$ y L_{noche} y de los objetivos de calidad acústica para las mismas franjas horarias según la clase de zonificación acústica en que se encuentre el tramo. Es decir, su cálculo es como sigue:

$$\Delta L_d = L_{\text{exist,día}} - L_{\text{obj,día}}, \quad (\text{ec. 4.3})$$

$$\Delta L_n = L_{\text{exist,noche}} - L_{\text{obj,noche}}, \quad (\text{ec. 4.4})$$

de acuerdo con los parámetros anteriormente citados.

En relación con la superficie, número de viviendas y población expuestas, también se extraen de los MER, en los cuales se encuentran estos datos repartidos también por intervalos de niveles sonoros. Estas variables pueden simplificarse a dos, superficie y población expuestas (que se denominarán « S_{exp} » y « P_{exp} », respectivamente), puesto que el dato del número de viviendas es utilizado para calcular la población afectada, combinándolo, aparte de la información gráfica de los mapas, con las referencias de densidad de población, tipos de edificaciones y tamaño familiar medio por vivienda y zona. Por su parte, nuevamente es lógico pensar que no debe darse la misma importancia a superficie o personas que estén expuestas a niveles de ruido más cercanos al nivel del objetivo de calidad acústica, que los que están afectados por niveles de ruido muy superiores. Con base en la información por intervalos de L_{den} que arrojan los mapas, pueden dividirse los criterios anteriores en tres subvariables para cada uno, según esos

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

intervalos, es decir, superficie y población expuestas a niveles entre 55 y 65 dB(A), entre 65 y 75 dB(A) y a más de 75 dB(A). Se denotarán como sigue: «S_{exp,55}», «S_{exp,65}» y «S_{exp,75}», y «P_{exp,55}», «P_{exp,65}» y «P_{exp,75}».

Del conjunto de datos que pueden alcanzarse a partir de los usos del suelo, aparte de su importancia para definir la zonificación acústica que influye en el objetivo de calidad acústica como se ha visto, destaca la existencia de centros sensibles al ruido, cuyo número suele venir explicitado en los mapas, por lo que también es posible diferenciar en cuál de las franjas de niveles de exposición al ruido se encuentran. Así, estos datos, englobados en la variable que se llamará «CS_{exp}», pueden desglosarse en tres subvariables al igual que las anteriores, cuyas denominaciones serán «CS_{exp,55}», «CS_{exp,65}» y «CS_{exp,75}».

Los siguientes parámetros que han sido estudiados son los datos meteorológicos, cuya influencia se ha visto que es escasa, fuera de valores extremos o muy concretos, que frecuentemente se dan en carreteras de más bajo tráfico (al menos en España), por lo que, con la idea de simplificar la metodología, se estima que no deben introducirse en la misma, puesto que, además, el proceso de generación de los MER ya los ha tenido en cuenta y pueden considerarse implícitos en los resultados de las variables anteriores.

Por lo que respecta a los parámetros geométricos y descriptivos de la carretera, a la luz de la información recogida de los mismos, la inmensa mayoría de ellos o bien son necesarios para caracterizar la infraestructura a la hora de modelizar el terreno y la carretera y generar la simulación acústica que da como resultado los MER, o bien tienen mayor influencia sobre las alternativas técnicas concretas contra el ruido, es decir, afectan en mayor medida a la selección de las soluciones del PAR que más adelante serán analizadas. Por tanto, en esta primera fase de la metodología también se dejarán fuera estos parámetros, dada su escasa relevancia en la asignación de prioridades a los tramos.

Similar circunstancia ocurre con las previsiones de planificación existentes, ya que, en primer lugar, suelen ser muy raros los casos en que existan condiciones en relación con la atenuación del ruido de infraestructuras cargadas a promotores privados, y, en segundo lugar, la posibilidad de que una modificación sustancial de la carretera que permitiera eliminar el problema de ruido de una carretera se ponga en marcha antes de implantar otras

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

medidas entra en terrenos donde la elección escapa en gran medida de los criterios técnicos, condicionados más bien a las previsiones presupuestarias y políticas. Por tanto, y salvo que se trate de ejemplos muy puntuales y claros, en el caso general al que la metodología se aproxima se estima que estas eventualidades no deben tenerse en cuenta, puesto que, de darse, merecerían un estudio más detallado y concreto que modificaría, sin duda, la importancia de las demás variables a la hora de asignar su prioridad correspondiente. Sin embargo, dentro de esta familia de parámetros sí se ha visto que puede afectar a la determinación de prioridades la existencia de medidas antirruído bien implantadas o bien previamente planificadas, circunstancia que quedará englobada en la variable « E_{MAR} » (de carácter también binario entre «sí» y «no»). Los valores que puede tomar esta variable se pueden deducir fácilmente de la siguiente tabla:

Tabla 4.2: Obtención del valor de la RSPV E_{MAR} . Fuente: adaptada de [Ruiz-Padillo et al., 2014].

| E_{MAR} (¿existen medidas antirruído?) | Valor | | |
|--|--|----|---|
| Sí | 0 | | |
| No | ¿Hay medidas antirruído ya planificadas? | Sí | 0 |
| | | No | 1 |

Por tanto, y a modo de resumen, a la hora de establecer prioridades entre los distintos tramos que precisen actuación en materia de protección acústica **las principales variables que deben ser tenidas en cuenta son** [Ruiz-Padillo et al., 2014]:

- La IMD, el porcentaje de vehículos pesados (%vp) y la velocidad media (v).
- La atenuación necesaria (ΔL), diferenciada entre los períodos diurno y nocturno (ΔL_d y ΔL_n).
- La existencia de quejas relacionadas con el ruido del tráfico (E_Q).
- La superficie expuesta (S_{exp}) y población expuesta (P_{exp}), divididas según intervalos de niveles de L_{den} ($S_{exp,55}$, $S_{exp,65}$ y $S_{exp,75}$, y $P_{exp,55}$, $P_{exp,65}$ y $P_{exp,75}$).
- El número de centros sensibles al ruido afectados (CS_{exp}), con la misma distribución anterior ($CS_{exp,55}$, $CS_{exp,65}$ y $CS_{exp,75}$).
- La existencia o planificación de otras medidas contra el ruido (E_{MAR}).

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

Todas estas variables preseleccionadas, que alcanzan un número total de 9 y cuatro de ellas poseen 2 o 3 subvariables dependientes de ellas (dentro de las recomendaciones del FAHP, por tanto), son las denominadas **Variables de Prioridad de Tramo (RSPV)** y serán las que se introducirán en la metodología seguidamente. Se presentan en la tabla siguiente, 4.3:

Tabla 4.3: Relación de variables y subvariables de prioridad de tramo. Fuente: elaboración propia a partir de [Ruiz-Padillo et al., 2014]

| N. Variables de Prioridad de Tramo (RSPV) | | | | |
|--|------------|---|---------------|---|
| 1 | ΔL | Atenuación necesaria | ΔL_d | Atenuación necesaria en período diurno |
| | | | ΔL_n | Atenuación necesaria en período nocturno |
| 2 | P_{exp} | Población expuesta | $P_{exp,75}$ | Población expuesta a $L_{den} > 75$ dB(A) |
| | | | $P_{exp,65}$ | Población expuesta a $L_{den} \in [65, 75[$ dB(A) |
| | | | $P_{exp,55}$ | Población expuesta a $L_{den} \in [55, 65[$ dB(A) |
| 3 | S_{exp} | Superficie expuesta | $S_{exp,75}$ | Superficie expuesta a $L_{den} > 75$ dB(A) |
| | | | $S_{exp,65}$ | Superficie expuesta a $L_{den} \in]65, 75]$ dB(A) |
| | | | $S_{exp,55}$ | Superficie expuesta a $L_{den} \in]55, 65]$ dB(A) |
| 4 | IMD | Intensidad media diaria de vehículos | | |
| 5 | %vp | Porcentaje de vehículos pesados | | |
| 6 | v | Velocidad media del tráfico | | |
| 7 | E_Q | Existencia de quejas de ciudadanos en relación al ruido del tráfico de la carretera | | |
| 8 | CS_{exp} | Número de centros sensibles al ruido expuestos | $CS_{exp,75}$ | Número de centros sensibles al ruido expuestos a $L_{den} > 75$ dB(A) |
| | | | $CS_{exp,65}$ | Número de centros sensibles al ruido expuestos a $L_{den} \in]65, 75]$ dB(A) |
| | | | $CS_{exp,55}$ | Número de centros sensibles al ruido expuestos a $L_{den} \in]55, 65]$ dB(A) |
| 9 | E_{MAR} | Existencia o planificación previa de medidas de atenuación acústica | | |

Estas variables y subvariables son las que forman parte de la definición del RSPI, como más adelante se verá, pero previamente precisan ser ponderadas, información que se conseguirá a partir del FAHP y el panel de expertos, como se desarrolla en el siguiente apartado.

4.3. PONDERACIÓN DE VARIABLES.

4.3.1. Planteamiento del sistema de jerarquía

Una vez determinadas las variables (RSPV) que van a actuar como criterios y subcriterios dentro de la técnica de jerarquías analíticas para alcanzar una ponderación de las mismas, y por supuesto partiendo del objetivo marcado, que no es sino la asignación de prioridades a los tramos de carretera de un PAR, es posible comenzar la aplicación del FAHP de acuerdo con las etapas descritas en el capítulo 2. Como se ve, la metodología que se persigue supone que las alternativas serán definidas para cada caso concreto, de modo que lo que se busca es el establecimiento de ponderaciones sobre las RSPV para definir el RSPI, que será aplicado sobre cada caso. Por tanto, **no es necesario establecer el tercer nivel de jerarquía, referente a las alternativas**, puesto que estas serían cada uno de los tramos del PAR.

Esta inexistencia del tercer nivel, aparte de ser innecesario para alcanzar la ponderación de los criterios, queda clara al analizar el paso del FAHP que afecta al mismo, puesto que la etapa de evaluación y jerarquización de alternativas exige realizar comparaciones pareadas de las alternativas entre sí respecto del nivel superior de la jerarquía, es decir, de los criterios y subcriterios. Sin embargo, al ser el objetivo marcado el planteamiento de una metodología general y válida para cualesquiera tramos de un PAR, es decir, sin tener tramos (alternativas) previamente definidos, no es posible definir tales juicios.

Por supuesto, si un decisor quisiera, a partir de las variables y subvariables ponderadas que se alcanzarán en este apartado, continuar con la técnica de jerarquías analíticas para el PAR concreto que estuviera elaborando, solo tendría que proceder a esta cuarta etapa del método y así conseguir un ordenamiento de los tramos. No obstante, puesto que las variables escogidas son todas de carácter cuantitativo y, como luego se verá, pueden ser medidas sobre cada uno de los tramos que se esté estudiando dentro del PAR (fundamentalmente a partir de los MER y los planes de aforos), al disponer de esta información también se ha visto más conveniente combinar las ponderaciones obtenidas a partir del FAHP para las RSPV con los valores de las mismas mediante la técnica de la

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

suma ponderada. Además, este proceso ofrece una mayor potencia a la metodología, aparte de mayor corrección y ser más intuitivo tanto para el responsable del plan como para los miembros de la Administración implicada que puedan intervenir y los propios ciudadanos que accedan a la publicación del PAR.

Por tanto, como primer paso de aplicación del FAHP («modelización») se configura el **sistema de jerarquía** para el problema planteado, mostrado en la figura 4.1.

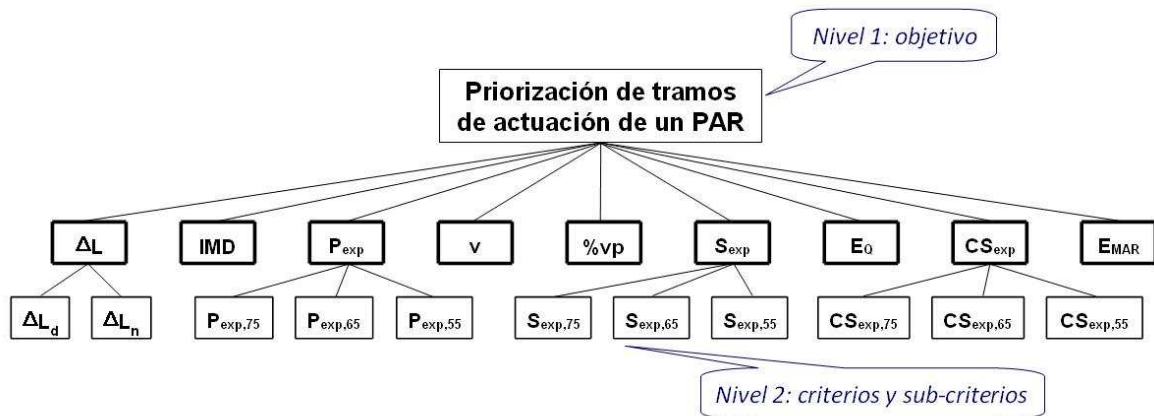


Figura 4.1. Sistema de jerarquía para ponderación de variables y subvariables de la primera fase de la metodología. Fuente: elaboración propia.

Para la siguiente etapa, la de evaluación de los criterios de valoración, que en este caso son las RSPV y sus subvariables, es preciso construir la matriz de criterios de comparaciones pareadas entre los elementos de cada nivel de jerarquía respecto del superior, es decir, serán necesarias, por un lado, una matriz de dimensión 9×9 para las RSPV, otra matriz de dimensión 2×2 para las subvariables de la atenuación necesaria y otras tres matrices de dimensión 3×3 para las subvariables de la población expuesta, superficie expuesta y número de centros sensibles expuestos, todas ellas de comparaciones pareadas entre estas subvariables respecto de la RSPV de la que dependen jerárquicamente, de acuerdo con la figura 4.1. Obviamente, cada uno de los elementos de estas matrices es un número difuso triangular al estar empleando la técnica de jerarquías analíticas en su variante difusa.

Para encontrar todos estos juicios de comparación pareada, como se ha explicado, se plantea la aplicación de un panel de expertos mediante cuestionarios que permitan

extraer la información difusa de estas valoraciones para las matrices. Procede, por tanto, explicar ahora cómo ha sido concebido este panel y las encuestas realizadas.

4.3.2. Panel de expertos y encuestas.

Como se ha comentado, se ha escogido la técnica del panel de expertos para conseguir las comparaciones pareadas de las RSPV y sus subvariables entre sí de cara a rellenar la matriz de criterios y las matrices de subcriterios necesarias para la aplicación del FAHP. El tipo de encuesta seleccionada fue la postal, mediante correo electrónico, por las razones expuestas en el apartado 2.8.1.

Así, los cuestionarios fueron elaborados en un archivo de base de datos, en el cual se presentaban las diferentes preguntas en las sucesivas hojas del archivo, que era enviado como adjunto al correo electrónico de los expertos seleccionados. En el cuerpo del correo se explicaba la intención de la encuesta y se le solicitaba al receptor que, una vez realizada la misma al rellenar las respuestas en el archivo enviado, lo devolviera por la misma vía al emisor, agradeciéndole, por supuesto, la colaboración prestada.

En primer lugar, es esencial la **definición de la población de expertos** que va a ser receptora de las encuestas, pues condiciona su elaboración. De hecho, se trata de un punto importante con el objetivo de encontrar respuestas adecuadas que den resultados convenientes y consistentes una vez procesados. El punto de partida es pensar en el perfil que deben tener los expertos, ya que deben ser entendidos en la materia y además relacionados con el problema de toma de decisiones que se plantea, lo cual restringe de manera destacada los posibles colaboradores, que además se encuadran exclusivamente dentro de la categoría de especialistas. Así, en esta primera fase del problema, el establecimiento de prioridades de actuación sobre los tramos incluidos en el PAR, es obvio que la decisión al respecto corresponde a niveles elevados de la Administración responsable, es decir, no debe ser una decisión que pueda ser decidida exclusivamente por técnicos colaboradores en la redacción del Plan, ya sean pertenecientes a la propia Administración o incluso externos (integrantes de una empresa consultora o profesionales

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

independientes que intervengan en la redacción del PAR). Es decir, parece claro que el perfil del experto debe ser el del especialista técnico al frente del Departamento administrativo competente en la red de carreteras objeto del plan, pues son este tipo de directivos los responsables de redactar estos planes, revisarlos y ejecutarlos. Estos expertos, que serán precisamente los que deban tomar las decisiones para las que se diseña la presente metodología, pueden encontrarse a diferentes niveles del organismo correspondiente y en diferentes Administraciones con competencias sobre carreteras.

Por tanto, teniendo en cuenta la estructura administrativa de España y las competencias sobre las carreteras en el territorio nacional, es posible encontrar los especialistas que son necesarios a nivel del Estado, de las Autonomías y de las Diputaciones Provinciales. En el caso de esta tesis los expertos fueron seleccionados de entre los técnicos directivos pertenecientes a departamentos competentes en Andalucía a los tres niveles, es decir, servicios periféricos de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento (DGC MFOM) en Andalucía (Demarcaciones de Carreteras y Unidades de Carreteras), servicios centrales y periféricos de la Dirección General de Infraestructuras de la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía (DGI CFV) y áreas y delegaciones de las Diputaciones Provinciales (DDPP) andaluzas con competencia en carreteras provinciales. Es importante destacar el alto nivel jerárquico de los encuestados dentro de sus respectivos servicios administrativos de destino, que en la mayoría de los casos corresponde al máximo de cada unidad de las citadas y todos ellos con titulación de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Aparte, se consideró interesante incluir entre los expertos de este panel a personal directivo de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad Autónoma Andaluza (CMAOT), puesto que, de acuerdo con el artículo 4 del Decreto 6/2012, corresponde a la Consejería competente en materia de medio ambiente, entre otras funciones las de colaborar, coordinar, informar y transmitir al Ministerio competente la información prevista en la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en relación a los MER y a los PAR que sean competencia de las Administraciones Públicas andaluzas. Concretamente, la selección se realizó dentro de la Dirección General de Prevención y Calidad Ambiental, que es la que ejerce dichas competencias dentro de la citada Consejería [Decreto 6/2012 de la Junta de Andalucía, 2012].

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

Una vez concretados los expertos a quien se dirigirían las encuestas, procede la **definición de la configuración de los cuestionarios**, que como se ha dicho se elaboraron en formato de base de datos. Puede observarse un cuestionario modelo en el Apéndice 1 de este documento, presentado tal y como le llegaba a cada experto (téngase en cuenta que los campos entre comillas se actualizaban automáticamente una vez el encuestado rellenaba las celdas que previamente se le pedían). Sintéticamente se estructuraban de la siguiente manera:

- Una primera hoja de instrucciones, donde se explicaba al experto el modo de rellenar la encuesta y desplazarse por ella. Complementando al cuerpo del mensaje del correo electrónico que adjuntaba el archivo de la encuesta y cumpliendo con las exigencias habituales de este tipo de paneles mediante encuestas postales, se especificaba igualmente la duración estimada y el número de preguntas del cuestionario, así como se aseguraba el anonimato de las respuestas recabadas y se ofrecía la posibilidad de contar con la asistencia del autor del cuestionario en caso de necesidad de duda o aclaración.
- Seguidamente, se presentaban al experto las RSPV mediante una breve explicación de su sentido y la notación adoptada en el cuestionario (segunda hoja). Como se vio al tratar la etapa de evaluación de criterios dentro de las técnicas de jerarquías analíticas, se solicitaba una ordenación previa de las nueve RSPV en función de su importancia relativa, ya que así en las siguientes hojas podrían plantearse más fácilmente las comparaciones pareadas, como seguidamente queda claro. Para ello, se ofrecía al experto la posibilidad de ordenar del 1 al 9 las RSPV a partir de un listado en que debía introducir la notación relacionada con las variables.

Debido a la importancia capital de esta primera pregunta, circunstancia en la que se hacía hincapié en el texto del cuestionario, a continuación se exigía al experto que confirmara la ordenación realizada antes de continuar, ofreciéndole la posibilidad de volver atrás y modificar el orden.

De igual modo, se le preguntaba si consideraba que existía alguna variable más que no formara parte del listado presentado y que fuera importante en relación con el problema de establecimiento de prioridades de actuación entre los tramos de carreteras de un PAR. A partir de esta pregunta cerrada (del tipo

«sí / no»), se abría, en caso de respuesta afirmativa, una nueva pregunta en batería, esta de tipo abierto, en la cual se solicitaba al especialista que introdujese aquellas variables o parámetros adicionales que estimara oportunas.

- Una vez confirmado el listado de las RSPV ordenadas como resultado de la ordenación efectuada en la primera pregunta (hoja número 3), se pasaba al núcleo central del cuestionario, compuesto por las preguntas que solicitaban las comparaciones pareadas según su importancia relativa entre las RSPV. Estas preguntas se presentaban sucesivamente en varias hojas (de la cuarta a la undécima), partiendo de la comparación de la primera variable con las otras 8, después de la segunda variable con las 7 posteriores del listado y así hasta comparar la penúltima variable con la última en importancia.

Para ello fue necesario fijar las etiquetas lingüísticas que eran presentadas como respuestas posibles de todas estas preguntas cerradas y que luego serían codificadas como valores difusos. De este modo, se utilizó como modelo la escala de comparación de Saaty usando números difusos (tabla 2.3), adaptada a una comparación mediante nueve etiquetas lingüísticas (tabla 2.1) y a las preguntas realizadas al experto teniendo en cuenta que siempre iba a estar comparando una variable con otra menos importante. Por tanto, las etiquetas utilizadas fueron solo cinco: igualmente importante, moderadamente más importante, más importante, mucho más importante y extremadamente más importante.

- Tras realizar la comparación entre las dos variables menos importantes, se procedía a establecer los juicios a pares sobre las subvariables, es decir, las dependientes dentro de la jerarquía de las RSPV de atenuación necesaria, población expuesta, superficie expuesta y número de centros sensibles al ruido expuestos. En estos casos no fue necesario pedir al experto una ordenación previa por importancia de las subvariables, pues es evidente que la atenuación necesaria en período nocturno es más importante que la precisa en período diurno, así como que en la distribución de valores dentro de las otras tres RSPV está claro que tendrán mayor peso los valores localizados en la franja entre los 65 y los 75 dB(A) sobre los valores existentes entre los 55 y los 65 dB(A) y a su

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

vez sobre todos ellos los que estén expuestos a niveles superiores a los 75 dB(A).

Por tanto, teniendo en cuenta esta ordenación, las preguntas se formularon de manera similar a las anteriores (es decir, ΔL_n respecto de ΔL_d ; $P_{exp,75}$ en relación a $P_{exp,55}$ y $P_{exp,65}$, y $P_{exp,65}$ respecto de $P_{exp,55}$; $S_{exp,75}$ en relación a $S_{exp,55}$ y $S_{exp,65}$, y $S_{exp,65}$ sobre $S_{exp,55}$; y de igual modo $CS_{exp,75}$ en relación a $CS_{exp,55}$ y $CS_{exp,65}$, y $CS_{exp,65}$ respecto de $CS_{exp,55}$) y con las mismas etiquetas lingüísticas como opciones de respuesta. Ocupaban las hojas duodécima a décimo quinta.

- A continuación existía una parte del cuestionario más concreta en relación con la variable E_Q . Ello obedece a que la valoración del resto de RSPV es posible extraerla o bien calcularla a partir de los MER del tramo en cuestión (caso de los parámetros de atenuación necesaria, de existencia de medidas de atenuación acústica previas y de población, superficie y número de centros sensibles expuestos) y de los planes de aforo correspondientes (IMD, porcentaje de pesados y velocidad media), pero el dato de la existencia de estas quejas procede de las propias Administraciones responsables de la gestión de las carreteras en estudio.

Por tanto, y ante la previsión de la aplicación práctica de la metodología a un PAR concreto, centrado en una red de carreteras definida, era necesario conocer la hipotética existencia de quejas relacionadas con el ruido del tráfico de los tramos implicados. Así, en estas preguntas (localizadas en la hoja número dieciséis, de la cual es presentada en el Apéndice 1 la versión para el caso general de la Red Autonómica de toda Andalucía) era necesario particularizar la cuestión para cada experto, dependiendo del nivel administrativo del que formara parte (Estado, Comunidad Autónoma o Diputación Provincial) y de la localización geográfica de sus competencias (distinguiendo, por tanto, para cada una de las 8 provincias andaluzas o abarcando la totalidad de la región). Igualmente era preciso restringir el ámbito del PAR analizado, que el caso de estudio que se analizará, como será expuesto en el capítulo 6, eran los tramos incluidos en la primera fase de elaboración de los MER dictada por la Directiva Europea de Ruido Ambiental (con IMD superior a los 16.438 veh/día).

De acuerdo con todo lo anterior, en primer lugar se presentaban al experto los tramos que cumplían con dicho requisito de tráfico y se solicitaba respuesta afirmativa o negativa a la pregunta «¿Tiene constancia de la existencia de quejas de ciudadanos en relación con el ruido provocado por el tráfico de estos tramos de carreteras o partes de ellos?». A continuación, se realizaba otra pregunta cerrada del mismo tipo sobre si, aparte de esos tramos relacionados, existía en su ámbito geográfico de competencia algún otro tramo de carretera del que tuviera constancia de quejas de ciudadanos en relación con el ruido provocado por el tráfico. En caso afirmativo, se solicitaba al especialista que especificara el tramo o tramos con existencia de quejas, pese a tener un nivel de tráfico inferior al exigido por la normativa para la elaboración de los MER en esa primera fase. Esta información sería utilizada también en la aplicación práctica de la metodología, como luego se verá.

- Para terminar, y también con intención de recabar información útil de cara a los casos de estudio analizados, se pedía al experto que realizara, a su juicio y teniendo en cuenta las variables estudiadas y las comparaciones realizadas hasta entonces, una ordenación por prioridad de actuación de todos los tramos que serían incluidos en el PAR de su ámbito competencial. Esta ordenación se utilizaría para comparar el criterio del especialista con el resultado de la aplicación de la metodología. Como es obligado, la encuesta finalizaba agradeciendo la colaboración al experto (hoja número diecisiete).

Cabe añadir que en cada hoja del archivo de base de datos existía siempre la posibilidad de retornar a la anterior en caso de que el encuestado quisiera modificar alguno de sus juicios o elecciones, o, si estaba conforme con sus respuestas, continuar automáticamente a la siguiente hoja y proseguir con el cuestionario. Del mismo modo, si el experto rellenaba con caracteres prohibidos o incumpliendo las condiciones impuestas por el cuestionario, aparecía un mensaje de error y no se ofrecía la opción de continuar sin que antes modificara las respuestas hasta que todos los campos estuvieran rellenos correctamente. Finalmente, una vez contestadas todas las preguntas hasta la última hoja del archivo, el experto debía guardarlo y remitirlo por correo electrónico al autor del estudio.

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

De este modo, y tras las obligadas pruebas siguiendo las recomendaciones de las técnicas de encuestas estadísticas, los cuestionarios estaban listos para ser enviados a los expertos.

De acuerdo con los criterios de selección de los especialistas antes citados, fueron enviadas de la forma desarrollada con los cuestionarios 24 peticiones de colaboración. Tras el período ofrecido a los expertos para responder, que fue aproximadamente de 2 meses (puesto que tras un primer período fijado en 1 mes se consideró conveniente remitir un recordatorio a aquellos que aún no habían contestado para aumentar un poco más la población de respuesta), se recibieron un total de **19 cuestionarios respondidos**, todos ellos correctamente. En la siguiente tabla se resume la distribución de los participantes en este panel de expertos.

Tabla 4.4: Población de participantes en panel de expertos sobre las RSPV. Fuente: elaboración propia.

| Colectivo de expertos | | Nº de cuestionarios propuestos | Nº de cuestionarios contestados |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| DGI CFV | Servicios centrales | 10 | 8 |
| | Servicios periféricos | 8 | 6 |
| DGC MFOM | | 1 | 1 |
| DDPP | | 2 | 2 |
| CMAOT | | 3 | 2 |
| TOTAL | | 24 | 19 |

A continuación se analiza la información recibida con los cuestionarios. Del mismo modo, se relata la manipulación y tratamiento matemático realizados sobre ellos hasta alcanzar los resultados necesarios sobre los que continuar la aplicación del FAHP.

4.3.3. Agregación de la información recibida.

Una vez explicado el proceso del panel de expertos realizado, se prosigue el desarrollo de la metodología buscando los valores de los juicios para formar las matrices de criterios y subcriterios del FAHP. Es decir, una vez que se ha definido mediante conjuntos difusos la información recolectada sobre las variables a partir de los cuestionarios, el conjunto de términos lingüísticos empleados permite evaluar

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

cualitativamente la importancia relativa de una variable determinada respecto de las demás y por tanto establecer las comparaciones pareadas entre ellas. Se procede entonces a construir las matrices de decisión de los criterios aplicadas a las RSPV y sus subvariables, lo cual llevará a alcanzar el vector de ponderaciones de las variables. Para lograr esto se debe establecer una relación entre los valores estandarizados y las variables lingüísticas definidas. Por tanto, es necesario acometer previamente una **codificación de las respuestas obtenidas a números difusos** y agregar todos ellos hasta conseguir valores promedio que serán los que integren las matrices citadas.

Puesto que los juicios de los expertos han sido realizados sobre un conjunto de 5 variables lingüísticas, que tienen además sus correspondientes recíprocos, se ha utilizado una escala de valoración difusa simple, tomando como modelo la recogida en la tabla 2.4 pero adaptada a la escala de comparación difusa de Saaty y a las posibles respuestas ofrecidas a los expertos. La equivalencia entre las variables lingüísticas y los números difusos relacionados es la que se presenta en la tabla 4.5, en la que se ha añadido el término «exactamente igual», que se empleará para los elementos de la diagonal de las matrices, que representan como es sabido la comparación de un criterio respecto de él mismo.

Tabla 4.5: Escala triangular para conversión de variables lingüísticas a números difusos. Fuente: elaboración propia.

| Intensidad importancia | Variable lingüística | Escala triangular difusa | Escala triangular difusa recíproca |
|------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| | Exactamente igual | (1, 1, 1) | (1, 1, 1) |
| 1 | Igualmente importante | (1/2, 1, 2) | (1/2, 1, 2) |
| 2 | Moderadamente más importante | (1, 2, 3) | (1/3, 1/2, 1) |
| 3 | Más importante | (2, 3, 4) | (1/4, 1/3, 1/2) |
| 4 | Mucho más importante | (3, 4, 5) | (1/5, 1/4, 1/3) |
| 5 | Moderadamente más importante | (4, 5, 5) | (1/5, 1/5, 1/4) |

Como se ve, el número triangular vinculado al término «exactamente igual» no es sino la expresión difusa del número *crisp* 1, lo que significa que dicho elemento es, sin incertidumbre, la unidad, al estar comparando una variable consigo misma.

A partir de estas relaciones, cada una de las respuestas lingüísticas de los expertos pudo convertirse en números difusos triangulares y colocarse en forma de matriz. Se construyeron, por tanto, 5 matrices para cada experto, la matriz de criterios para los juicios

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

sobre las RSPV y otras cuatro de subcriterios para cada grupo de las subvariables dependientes.

Obsérvese que no todos los elementos de la matriz son directamente suministrados por los expertos, es decir, que si una matriz concreta es de tamaño $n \times n$, no se cuenta con los n^2 elementos, sino solo $n(n/2-1)$, puesto que todos los elementos de la diagonal son iguales a (1, 1, 1) y solo son necesarios los valores de la mitad de los elementos restantes, ya que, como es sabido, las matrices formadas son simétricas y recíprocas. De este modo, a partir de la propiedad recíproca de los juicios se completan las comparaciones que no hayan sido realizadas directamente por los expertos.

Partiendo de las cinco matrices de cada experto, se procede a la agregación de todos los datos mediante la aplicación de la media geométrica, como ya se vio en el capítulo 2. Se consigue así la matriz de criterios buscada, sobre la que se aplicará el siguiente paso del FAHP para conseguir la ponderación de las RSPV, así como otras cuatro matrices referentes a las medias de los juicios de los expertos sobre las comparaciones pareadas de las subvariables.

Aparte de esta información primordial, se dispone de otros datos suministrados por los expertos a través de los cuestionarios, a la que por supuesto se debe prestar atención:

- En primer lugar, se tiene una ordenación simple de las RSPV según la importancia relativa que consideraron los expertos, que sirvió para establecer el orden de las comparaciones pareadas. Ello también resultará útil para contrastar la ordenación media que resulta de todos los cuestionarios con la ordenación que resulta de listar las RSPV según los pesos calculados con el FAHP de forma descendente. Esta comparación dará una idea también de la bondad del resultado obtenido. Igualmente, de esta ordenación simple, sin tener en cuenta los juicios posteriores ni aplicar los principios de la lógica difusa ni la técnica de jerarquías analíticas, es posible realizar otra ponderación, en este caso mediante un método de asignación directa, que también permitirá sencillamente comparar resultados y observar la lógica que encierran. En este caso, se utilizará

el método de ordenación simple (ranking) de Kendall, también descrito en el apartado 2.3.3 [Kendall, 1970].

- La siguiente información adicional proviene de las respuestas sobre la existencia de otras variables que sean importantes en el proceso de toma de decisiones estudiado. Por un lado, con estos datos se pudo comprobar la exhaustividad del listado de las RSPV ofrecidas a los expertos, así como cuáles son aquellos criterios que los especialistas citaban, pues de haber encontrado alguno que era propuesto de forma recurrente, ello habría obligado a modificar el planteamiento e incluirlo en el estudio, puesto que, como se vio anteriormente, los elementos contenidos en los diferentes niveles de jerarquía deben ser completos y la técnica no permite la introducción de ninguno nuevo posteriormente. Así, analizando las respuestas al respecto de los expertos, queda claro, en primer lugar, que la gran mayoría (15 de los 19 que colaboraron) encontró el listado de RSPV ofrecido completo y no sugirió ninguna otra variable y, como luego se discutirá, las propuestas no hicieron necesario modificar el estudio.
- Finalmente, se encuentran los datos sobre existencia de quejas en los tramos presentados a los expertos y en los que conociera esta circunstancia además de aquellos, así como las propuestas de ordenación de todos los tramos realizadas. La utilidad de estos resultados se verá en el análisis de los casos de estudio, en el capítulo 6.

De acuerdo con todo lo anterior, puede seguirse el proceso para obtener ya los resultados buscados como objetivo mediante la culminación de la aplicación del FAHP en la ponderación de las RSPV.

4.3.4. Resultados.

Como se ha visto en el apartado anterior, para el desarrollo de esta primera fase de la metodología se han obtenido como resultado del panel de expertos, por un lado, las

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

matrices de comparaciones pareadas de variables y subvariables medias y, por otro, informaciones adicionales sobre la ordenación simple de las mismas así como otros posibles parámetros que podían considerarse en el estudio.

Antes de continuar con el FAHP por el siguiente paso, a continuación se analizan brevemente las **respuestas ofrecidas por los expertos sobre aquellas otras variables que podía haberse considerado dentro del listado de las RSPV**, que fueron un total de cuatro. A continuación se transcriben de forma literal sus respuestas y se analiza su conveniencia al respecto de modificar los cuestionarios para tenerlas en cuenta:

- «Existencia de lugares con fauna sensible al ruido». Al respecto de esta propuesta, relacionada también con una de las del experto que le sigue, al buscar referencias de su planteamiento en el problema, se observó que, por un lado, la normativa está esencialmente enfocada hacia los efectos del ruido en la población y las actividades humanas junto a las fuentes de ruido, pues de hecho en aquellas zonas de englobadas dentro de la zonificación acústica clase G («espacios naturales que requieran especial protección») no determina objetivos de calidad acústica.

Pero, por otro lado, del análisis de los PAR publicados, cuando en una zona de estas características se da un problema de nivel de ruido alto, los tramos implicados explícitamente son apartados del conjunto para realizar sobre ellos un estudio concreto, puesto que la prioridad que se les puede dar, así como las soluciones al respecto, son muy diferentes de los demás. Por estas razones, se ha entendido que posibles tramos con estas circunstancias de fauna sensible al ruido requieren un estudio muy particular, alejado de la metodología general que se está desarrollando, de ahí que no se estimara conveniente su consideración como RSPV.

- «Zonas de especial protección medioambiental». La discusión de esta propuesta es similar a la del punto anterior.
- «La concentración de población (la densidad), tipo de uso del suelo o clasificación de la zona y la distancia foco-receptor». Este experto apuntó varios parámetros cuya influencia está incluida de algún modo en las RSPV

propuestas, puesto que la densidad de población es necesaria para calcular el valor de población expuesta a partir de los datos de superficie expuesta derivados de los MER; el tipo de suelo afecta directamente a la zonificación acústica y, por tanto, a los objetivos de calidad acústica; y la distancia foco-receptor va a afectar al nivel de ruido alcanzado en la zona como resultado de su propagación desde la carretera. Por tanto, no eran variables significativas para ser incluidas independientemente.

- «Firme en mal estado». Finalmente, un experto citó este parámetro de calidad del firme existente en la carretera como posible criterio para establecer prioridad de actuación contra el ruido. Está claro que el estado del firme puede afectar al nivel de ruido alcanzado en el tramo, de forma que si el pavimento está defectuoso será más elevado.

No obstante, la posible influencia de este factor en la priorización de tramos puede no tener sentido si después la alternativa elegida para corregir el ruido (que es el fin último de los PAR) no actúa sobre el firme, puesto que de esta manera un parámetro utilizado para dar mayor prioridad no interviene finalmente en el proceso de toma de decisiones. Además, se trata de una variable difícilmente cuantificable que podría complementarse con defectos en otros elementos de la infraestructura y que desde el mismo punto de vista, podrían ser tenidos en cuenta (caso de falta de barrera de seguridad, de señalización horizontal o vertical, de tratamiento de márgenes, etc.).

Por todo ello, se concluyó que la introducción de una variable que caracterizara el estado del firme en la metodología podría ofrecer más problemas que beneficios y no fue incluida como RSPV.

De este modo, el listado de las RSPV y sus subvariables permaneció como fue presentado a los expertos y, así, tras recibir sus respuestas, fueron convenientemente tratadas hasta conseguir las **matrices de juicios para ser tratadas con el FAHP**, que se retoma tras su segundo paso, la evaluación de los criterios. A continuación se presentan dichas matrices medias para las RSPV y sus subvariables.

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

| | ΔL | P_{exp} | S_{exp} | IMD | %vp | |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----|
| ΔL | (1,000, 1,000, 1,000) | (0,420, 0,638, 1,053) | (1,935, 2,808, 3,692) | (0,876, 1,411, 2,086) | (1,441, 2,335, 3,228) | |
| P_{exp} | (0,950, 1,568, 2,383) | (1,000, 1,000, 1,000) | (2,670, 3,743, 4,468) | (1,458, 2,335, 3,277) | (2,273, 3,290, 4,222) | |
| S_{exp} | (0,271, 0,356, 0,517) | (0,224, 0,267, 0,374) | (1,000, 1,000, 1,000) | (0,333, 0,456, 0,684) | (0,502, 0,698, 1,034) | |
| IMD | (0,479, 0,709, 1,142) | (0,305, 0,428, 0,686) | (1,462, 2,194, 2,999) | (1,000, 1,000, 1,000) | (1,140, 1,988, 3,050) | |
| %vp | (0,310, 0,428, 0,694) | (0,237, 0,304, 0,440) | (0,967, 1,434, 1,991) | (0,328, 0,503, 0,877) | (1,000, 1,000, 1,000) | ... |
| v | (0,274, 0,378, 0,593) | (0,226, 0,286, 0,406) | (0,900, 1,294, 1,815) | (0,307, 0,454, 0,782) | (0,550, 0,950, 1,617) | |
| E_Q | (0,415, 0,634, 0,990) | (0,275, 0,377, 0,571) | (1,373, 1,868, 2,363) | (0,504, 0,760, 1,185) | (0,962, 1,569, 2,218) | |
| CS_{exp} | (0,836, 1,343, 2,006) | (0,528, 0,808, 1,334) | (2,467, 3,521, 4,258) | (1,245, 1,859, 2,674) | (2,113, 3,069, 4,010) | |
| E_{MAR} | (0,312, 0,429, 0,680) | (0,279, 0,381, 0,584) | (0,849, 1,243, 1,833) | (0,343, 0,479, 0,740) | (0,616, 0,985, 1,489) | |

| | v | E_Q | CS_{exp} | E_{MAR} | |
|-----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| | (1,687, 2,647, 3,656) | (1,010, 1,577, 2,409) | (0,499, 0,745, 1,196) | (1,471, 2,332, 3,208) | ΔL |
| | (2,460, 3,498, 4,431) | (1,750, 2,652, 3,641) | (0,749, 1,238, 1,894) | (1,713, 2,627, 3,586) | P_{exp} |
| | (0,551, 0,773, 1,111) | (0,423, 0,535, 0,728) | (0,235, 0,284, 0,405) | (0,456, 0,804, 1,178) | S_{exp} |
| | (1,279, 2,204, 3,259) | (0,844, 1,315, 1,982) | (0,374, 0,538, 0,803) | (1,352, 2,086, 2,919) | IMD |
| ... | (0,619, 1,053, 1,819) | (0,451, 0,638, 1,039) | (0,249, 0,326, 0,473) | (0,672, 1,015, 1,624) | %vp |
| | (1,000, 1,000, 1,000) | (0,439, 0,675, 1,099) | (0,249, 0,312, 0,452) | (0,650, 0,955, 1,500) | v |
| | (0,910, 1,480, 2,278) | (1,000, 1,000, 1,000) | (0,294, 0,414, 0,665) | (0,894, 1,414, 2,053) | E_Q |
| | (2,211, 3,210, 4,023) | (1,503, 2,414, 3,399) | (1,000, 1,000, 1,000) | (1,995, 3,040, 3,988) | CS_{exp} |
| | (0,667, 1,047, 1,539) | (0,487, 0,707, 1,118) | (0,251, 0,329, 0,501) | (1,000, 1,000, 1,000) | E_{MAR} |

$$\begin{matrix} & \Delta L_n & \Delta L_d \\ \Delta L_n & \left((1,000, 1,000, 1,000) \right) & \left(2,514, 3,517, 4,440 \right) \\ \Delta L_d & \left((0,236, 0,284, 0,398) \right) & \left(1,000, 1,000, 1,000 \right) \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} & S_{exp,75} & S_{exp,65} & S_{exp,55} \\ S_{exp,75} & \left((1,000, 1,000, 1,000) \right) & \left(1,724, 2,734, 3,687 \right) & \left(2,294, 3,318, 4,173 \right) \\ S_{exp,65} & \left((0,271, 0,366, 0,580) \right) & \left(1,000, 1,000, 1,000 \right) & \left(1,376, 2,459, 3,474 \right) \\ S_{exp,65} & \left((0,240, 0,301, 0,436) \right) & \left(0,288, 0,407, 0,727 \right) & \left(1,000, 1,000, 1,000 \right) \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} & P_{exp,75} & P_{exp,65} & P_{exp,55} \\ P_{exp,75} & \left((1,000, 1,000, 1,000) \right) & \left(1,713, 2,725, 3,699 \right) & \left(2,591, 3,616, 4,498 \right) \\ P_{exp,65} & \left((0,270, 0,367, 0,584) \right) & \left(1,000, 1,000, 1,000 \right) & \left(1,397, 2,386, 3,412 \right) \\ P_{exp,65} & \left((0,222, 0,277, 0,386) \right) & \left(0,293, 0,419, 0,716 \right) & \left(1,000, 1,000, 1,000 \right) \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} & CS_{exp,75} & CS_{exp,65} & CS_{exp,55} \\ CS_{exp,75} & \left((1,000, 1,000, 1,000) \right) & \left(1,815, 2,826, 3,800 \right) & \left(2,575, 3,623, 4,431 \right) \\ CS_{exp,65} & \left((0,263, 0,354, 0,551) \right) & \left(1,000, 1,000, 1,000 \right) & \left(1,458, 2,459, 3,494 \right) \\ CS_{exp,65} & \left((0,226, 0,276, 0,388) \right) & \left(0,286, 0,407, 0,686 \right) & \left(1,000, 1,000, 1,000 \right) \end{matrix}$$

El siguiente paso es propiamente el de priorización o determinación de los pesos de los criterios, es decir, las RSPV y las subvariables, como fue descrito en el apartado 2.4.2,

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

pero atendiendo a su versión difusa. De entre las dos variantes de cálculo del vector de pesos difusos, fueron testadas ambas (el original, que utiliza la media geométrica y una posterior *defuzzificación* mediante el centroide difuso, que por sencillez a partir de ahora se denominará «método original»; y el del análisis extendido de Chang, o simplemente «método extendido»), con la intención de comparar sus resultados y poder discutir razonadamente la elección de una de ellas. De igual modo, se procede al cálculo del autovalor correspondiente, también oportunamente *defuzzificado*, en este caso, como se trató en el apartado 2.4.4, mediante el valor modal. Así, los **vectores de pesos**, ya normalizados y en notación porcentual, que fueron deducidos para las RSPV fueron los siguientes:

$$\begin{array}{l}
 W_{VPT,original} = \begin{pmatrix} w_{\Delta L} \\ w_{P_{exp}} \\ w_{S_{exp}} \\ w_{IMD} \\ w_{\%vp} \\ w_v \\ w_{E_Q} \\ w_{CS_{exp}} \\ w_{E_{MAR}} \end{pmatrix}_{original} = \begin{pmatrix} 14,77\% \\ 21,00\% \\ 5,15\% \\ 11,60\% \\ 6,63\% \\ 6,21\% \\ 9,05\% \\ 18,97\% \\ 6,62\% \end{pmatrix} \\
 W_{VPT,extendido} = \begin{pmatrix} w_{\Delta L} \\ w_{P_{exp}} \\ w_{S_{exp}} \\ w_{IMD} \\ w_{\%vp} \\ w_v \\ w_{E_Q} \\ w_{CS_{exp}} \\ w_{E_{MAR}} \end{pmatrix}_{extendido} = \begin{pmatrix} 17,87\% \\ 23,59\% \\ 0,00\% \\ 14,39\% \\ 4,36\% \\ 4,49\% \\ 9,46\% \\ 22,23\% \\ 3,62\% \end{pmatrix}
 \end{array}$$

La **razón de consistencia** relacionada con estos resultados fue de 0,005 y de 0,003, respectivamente, que como se ve es muy inferior a 0,10, umbral estipulado por Saaty para la misma, de modo que puede concluirse que la ponderación encontrada es muy robusta, más aun para el caso del método original. En cuanto a propiamente los valores de los pesos, se observa que son muy parecidos tanto en el orden establecido como en sus índices numéricos. Sí llaman la atención dos principales diferencias: para el caso del análisis extendido, la variable S_{exp} es eliminada (peso nulo) y, como resultado del método original la variable de la velocidad, v , cambia del sexto lugar en importancia que presenta para el otro método al penúltimo puesto, solo por delante de la superficie expuesta.

Estas ordenaciones por prioridad de las RSPV y sus pesos alcanzados mediante el FAHP también pueden compararse con los mismos resultados, como se apuntó

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

anteriormente, aplicando solo el **método de asignación directa de Kendall** sobre la ordenación media efectuada de las RSPV. Para ello se contabiliza el número de veces en que aparece ordenada cada RSPV por cada experto y se calcula su posición media. A partir de ello se aplica la ordenación simple hasta obtener ponderaciones normalizadas. El resultado de estos cálculos aparece en la tabla 4.6 y el correspondiente vector de pesos a continuación:

Tabla 4.6: Cálculo de posición media de las RSPV según el panel de expertos. Fuente: elaboración propia.

| RSPV | Nº veces en cada posición | | | | | | | | | Posición media |
|------------|---------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| ΔL | 4 | 2 | 4 | 5 | 1 | 2 | | 1 | | 3,4213 |
| P_{exp} | 9 | 6 | 2 | 2 | | | | | | 1,8425 |
| S_{exp} | | | | 4 | 2 | 1 | | 3 | 9 | 7,2116 |
| IMD | 2 | 2 | 4 | 1 | 6 | 2 | 2 | | | 4,105 |
| %vp | | | | 2 | 1 | 4 | 7 | 3 | 2 | 6,737 |
| v | | | | | 1 | 4 | 5 | 7 | 2 | 7,263 |
| E_Q | 1 | | 4 | 4 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 5,053 |
| CS_{exp} | 3 | 9 | 3 | 1 | 2 | 1 | | | | 2,632 |
| E_{MAR} | | | 2 | | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 6,737 |

$$W_{VPT, Kendall} = \begin{pmatrix} w_{\Delta L} \\ w_{P_{exp}} \\ w_{S_{exp}} \\ w_{IMD} \\ w_{\%vp} \\ w_v \\ w_{E_Q} \\ w_{CS_{exp}} \\ w_{E_{MAR}} \end{pmatrix}_{Kendall} = \begin{pmatrix} 13,11\% \\ 24,34\% \\ 6,22\% \\ 10,92\% \\ 6,66\% \\ 6,17\% \\ 8,88\% \\ 17,04\% \\ 6,66\% \end{pmatrix}$$

Está claro que la ordenación es muy parecida, sobre todo en las RSPV más importantes, y que los pesos también son bastante parecidos, solo marcando diferencias relativas para las variables de la velocidad y superficie también respecto del método de análisis extendido. Se resumen ordenadamente en la tabla 4.7.

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

Tabla 4.7: Comparativa de ordenación y ponderación de las RSPV. Fuente: elaboración propia.

| FAHP ORIGINAL | | | FAHP EXTENDIDO | | | KENDALL | | |
|---------------|-------------------|--------|----------------|-------------------|--------|---------|-------------------|--------|
| ORDEN | RSPV | PESO | ORDEN | RSPV | PESO | ORDEN | RSPV | PESO |
| 1 | P _{exp} | 21,00% | 1 | P _{exp} | 23,59% | 1 | P _{exp} | 24,34% |
| 2 | CS _{exp} | 18,97% | 2 | CS _{exp} | 22,23% | 2 | CS _{exp} | 17,04% |
| 3 | ΔL | 14,77% | 3 | ΔL | 17,87% | 3 | ΔL | 13,11% |
| 4 | IMD | 11,60% | 4 | IMD | 14,39% | 4 | IMD | 10,92% |
| 5 | E _Q | 9,05% | 5 | E _Q | 9,46% | 5 | E _Q | 8,88% |
| 6 | %vp | 6,63% | 6 | v | 4,49% | 6 | %vp | 6,66% |
| 7 | E _{MAR} | 6,62% | 7 | %vp | 4,36% | 7 | E _{MAR} | 6,66% |
| 8 | v | 6,21% | 8 | E _{MAR} | 3,62% | 8 | S _{exp} | 6,22% |
| 9 | S _{exp} | 5,15% | 9 | S _{exp} | 0,00% | 9 | v | 6,17% |

A estas comparaciones puede añadirse una más, que se realizó solo a efectos de comprobación para reforzar la escala de conversión difusa a partir de las etiquetas lingüísticas utilizada. Así, se realizaron los cálculos de los pesos según FAHP utilizando una escala de números difusos triangulares en 9 escalones, exactamente igual a la propuesta por Saaty en la técnica original (tabla 2.3) pero en su versión difusa, y se observó que el orden y las ponderaciones nuevamente obtenidas fueron nuevamente muy parecidas, pero con la diferencia de que las consistencias obtenidas eran menores, llegando a ser inconsistentes en algunos casos, lo cual es lógico ya que con esta escala se aumenta la *difusividad* de las valoraciones, es decir, la incertidumbre dada a los juicios es mayor. Con esta prueba, se quiso comprobar la idoneidad de la escala utilizada, que así se vio más conveniente al arrojar resultados más consistentes con una correspondencia numérica y lingüística más simple y, por tanto, con unos cálculos más sencillos, para llegar a ponderaciones igualmente o más lógicas.

De todo ello, y teniendo en cuenta los resultados a la luz del trabajo previo realizado no se considera coherente ni la eliminación del análisis una variable como la superficie expuesta, tan relevante dentro de los MER y la propia normativa que los desarrolla, ni una importancia tan alta para la variable de la velocidad media de los vehículos, introducida en última instancia dentro del estudio y que verdaderamente presenta una influencia muy limitada en el problema de toma de decisiones, se estima como vector de pesos propuestos para su aplicación en la metodología el deducido mediante el **FAHP original** combinado con *defuzzificación* por el centroide difuso.

Además, la ordenación así obtenida es más coincidente con la obtenida mediante el método de Kendall.

Por tanto, como se ve, la RSPV más importante es la población expuesta al ruido, seguida del número de centros sensibles al ruido expuestos, es decir, los dos parámetros de mayor afección a la ciudadanía son los que resultan con un mayor peso en la metodología para la toma de decisiones, lo cual parece lógico dado el principal objetivo del PAR en el que se intenta priorizar y además sigue la filosofía de las recomendaciones del Ministerio de Fomento recogidas en el documento de «Criterios y condiciones técnicas para la elaboración de los mapas estratégicos de ruido de las carreteras de la Red del Estado 2ª fase 2012», como ya se vio en el apartado 1.5.2. Le sigue el dato de la atenuación necesaria, que como se sabe es uno de los factores clave según la normativa, junto con la IMD, que también determina de forma destacada el nivel de ruido que es soportado junto a la carretera e incluso la obligación de aplicar la Directiva Europea de Ruido Ambiental. A continuación se sitúa la circunstancia de la existencia de quejas, que también guarda un especial sentido social a la hora de priorizar las actuaciones. Por otro lado, las siguientes variables en importancia, todas por debajo de un 10% en peso, se encuentran muy cercanas entre ellas, como son, por este orden, el porcentaje de pesados, la existencia de otras medidas antirruído y la velocidad media de los vehículos, cuya influencia en el problema parece clara que es menor. Finalmente, en último lugar se encuentra la superficie expuesta, que aparece peor valorada por la gran mayoría de los expertos, puesto que se trata de un aspecto no tan destacado de la afección del ruido, sin tener en cuenta ni edificios ni personas.

Continuando con la aplicación del FAHP, es necesario ahora encontrar cuál es el **peso relativo de las subvariables respecto de sus respectivas RSPV «padre»**. Se actúa de manera similar a la anterior para obtener las ponderaciones, a partir de las matrices de comparaciones resultantes para las subvariables, salvo en el caso de las dependientes de la variable de atenuación necesaria, puesto que al ser solo dos no es aplicable el FAHP. Para ellas sencillamente se procederá a *defuzzificar* el único elemento representativo de su matriz, lo cual dará un valor de la importancia relativa entre las dos subvariables, que de manera simple puede transformarse en ponderaciones de ambas, tal y como se muestra a continuación:

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

$$W_{\Delta L} = \begin{pmatrix} w_{\Delta L_d} \\ w_{\Delta L_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 22,27\% \\ 77,73\% \end{pmatrix}$$

Para los otros tres grupos de subvariables se obtienen sus **vectores de pesos** mediante los dos métodos utilizados anteriormente, que se presentan seguidamente, junto a sus correspondientes **razones de consistencia**:

$$W_{P_{exp},original} = \begin{pmatrix} w_{P_{exp},75} \\ w_{P_{exp},65} \\ w_{P_{exp},55} \end{pmatrix}_{original} = \begin{pmatrix} 58,41\% \\ 27,32\% \\ 14,27\% \end{pmatrix} \quad RC = 0,037$$

$$W_{P_{exp},extendido} = \begin{pmatrix} w_{P_{exp},75} \\ w_{P_{exp},65} \\ w_{P_{exp},55} \end{pmatrix}_{extendido} = \begin{pmatrix} 70,54\% \\ 29,46\% \\ 0,00\% \end{pmatrix} \quad RC = 0,084$$

$$W_{S_{exp},original} = \begin{pmatrix} w_{S_{exp},75} \\ w_{S_{exp},65} \\ w_{S_{exp},55} \end{pmatrix}_{original} = \begin{pmatrix} 57,35\% \\ 27,74\% \\ 14,91\% \end{pmatrix} \quad RC = 0,054$$

$$W_{S_{exp},extendido} = \begin{pmatrix} w_{S_{exp},75} \\ w_{S_{exp},65} \\ w_{S_{exp},55} \end{pmatrix}_{extendido} = \begin{pmatrix} 67,52\% \\ 32,48\% \\ 0,00\% \end{pmatrix} \quad RC = 0,108$$

$$W_{CS_{exp},original} = \begin{pmatrix} w_{CS_{exp},75} \\ w_{CS_{exp},65} \\ w_{CS_{exp},55} \end{pmatrix}_{original} = \begin{pmatrix} 58,81\% \\ 27,10\% \\ 14,09\% \end{pmatrix} \quad RC = 0,045$$

$$W_{CS_{exp},extendido} = \begin{pmatrix} w_{CS_{exp},75} \\ w_{CS_{exp},65} \\ w_{CS_{exp},55} \end{pmatrix}_{extendido} = \begin{pmatrix} 70,96\% \\ 29,04\% \\ 0,00\% \end{pmatrix} \quad RC = 0,101$$

En primer lugar, llama la atención que los resultados resultantes de aplicar el método del análisis extendido del FAHP no presentan adecuada consistencia, puesto que sus RC rebasan sobradamente en los tres casos el 5%, mientras que las razones de consistencia usando el método original son inferiores al 5% salvo en el caso de las subvariables de la superficie expuesta (aunque se halla muy cercano a este valor), por lo que se pueden estimar más adecuados. En segundo lugar, puede observarse también que en los tres casos al aplicar el análisis extendido es eliminada la subvariable que mide cada uno de los parámetros para el intervalo de L_{den} entre 55 y 65 dB(A) y los otros parámetros dos quedan con ponderaciones muy descompensadas, mientras que el método original no elimina ninguna subvariable y ofrece ponderaciones muy similares en los tres grupos y más repartidas. Por ello, basándonos sobre todo en los datos de consistencia pero

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

continuando también con la esencia de los razonamientos discutidos para el caso de las variables, se consideran **más convenientes los resultados obtenidos mediante el método original**.

Para terminar, se agregan de acuerdo con la jerarquía establecida para encontrar los **pesos resultantes de las subvariables** respecto del nivel superior, el objetivo del problema, sencillamente multiplicando los pesos obtenidos, como se muestran en la tabla 4.8.

Tabla 4.8: Cálculo de pesos de las subvariables de las RSPV. Fuente: elaboración propia.

| Subvariables | Peso RSPV «padre» (%) | Peso relativo subvariable (%) | Peso total (%) |
|---------------|-----------------------|-------------------------------|----------------|
| ΔL_d | 14,77% | 22,27% | 3,29% |
| ΔL_n | | 77,73% | 11,48% |
| $P_{exp,75}$ | 21,00% | 58,41% | 12,26% |
| $P_{exp,65}$ | | 27,32% | 5,74% |
| $P_{exp,55}$ | | 14,27% | 3,00% |
| $S_{exp,75}$ | 5,15% | 57,35% | 2,95% |
| $S_{exp,65}$ | | 27,74% | 1,43% |
| $S_{exp,55}$ | | 14,91% | 0,77% |
| $CS_{exp,75}$ | 18,97% | 58,81% | 11,16% |
| $CS_{exp,65}$ | | 27,10% | 5,14% |
| $CS_{exp,55}$ | | 14,09% | 2,67% |

Con ello se tiene que todas las variables que influyen en el modelo jerárquico están convenientemente ponderadas y se ha comprobado la consistencia de los datos, por lo que el FAHP ha concluido como método de ponderación. Procede, por tanto, continuar con el análisis multicriterio a partir de estos datos y definir el RSPI.

4.4. ÍNDICE DE PRIORIDAD DE TRAMO.

Como se ha visto anteriormente, en el contexto actual de crisis económica y ante las escasas disponibilidades presupuestarias de las Administraciones, se hace más importante si cabe realizar una planificación ordenada por prioridad de las actuaciones de los PAR que

permita dotar de mayor eficiencia a las mismas y además pueda mostrarse a la opinión pública de una forma razonada y coherente.

Además, una vez analizados todos los aspectos que influyen el problema del ruido debido al tráfico de las carreteras, se ha comprobado que es muy adecuado establecer diferentes pesos a las variables que sirven de apoyo a la toma de decisiones sobre el planteamiento de la citada prioridad de actuación, ya que su relevancia es muy dispar respecto de dicho objetivo, y que, por tanto, es preciso utilizar una **técnica de análisis multicriterio** para agregar toda esta información.

Con intención de ofrecer a los PAR esta asignación de prioridades a partir de la aplicación del método de la suma ponderada sobre las variables y sus pesos definidos en el apartado anterior, se determina como herramienta el denominado **Índice de Prioridad de Tramo (RSPI)**, mediante el cual se podrá valorar cada tramo de carretera incluido en el PAR y así ordenarlos dentro del horizonte temporal que prevé la normativa, que como ya se ha dicho, es de 5 años.

Este RSPI se compone de la suma de los valores que son dados de forma ponderada a todas las RSPV, de forma que es un número que varía entre 0 y 100 y cuanto mayor sea su valor, mayor será la prioridad que debe tener en el PAR el tramo en cuestión. No hay que olvidar que los valores numéricos dados a las RSPV han de estar previamente normalizados, obtenidos por el método de normalización lineal descrito anteriormente. Además, puesto que todas las variables actúan como «criterios de beneficio», es decir, que cuanto mayor sea su valor, más contribuyen al objetivo de la jerarquía, dicha normalización se efectúa directamente según dicha técnica.

Por tanto, la definición del RSPI puede expresarse mediante la siguiente ecuación, que no es más que aplicar el método de ponderación lineal [Ruiz-Padillo *et al.*, 2014]:

$$RSPI = \sum_{i=1}^{16} RSPV_i \cdot w_i \quad (ec. 4.5)$$

donde $RSPV_i$ son cada una de las variables y subvariables estudiadas anteriormente,

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

w_i son los pesos obtenidos en el apartado anterior, de acuerdo con la notación utilizada, todo lo cual queda resumido en la tabla 4.9.

Tabla 4.9: Listado y ponderación de las RSPV. Fuente: adaptada de [Ruiz-Padillo et al., 2014].

| Nº | Variables de prioridad de tramo | | | Peso total (%) | |
|-------|---------------------------------|--|-------------------------------------|----------------------|---------|
| 1 | P _{exp} | Población expuesta | a L _{den} > 75 dB(A) | P _{exp,75} | 12,26% |
| 2 | | | a L _{den} ∈ [65, 75[dB(A) | P _{exp,65} | 5,74% |
| 3 | | | a L _{den} ∈ [55, 65[dB(A) | P _{exp,55} | 3,00% |
| 4 | CS _{exp} | Número de centros sensibles al ruido | a L _{den} > 75 dB(A) | CS _{exp,75} | 11,16% |
| 5 | | | a L _{den} ∈ [65, 75[dB(A) | CS _{exp,65} | 5,14% |
| 6 | | | a L _{den} ∈ [55, 65[dB(A) | CS _{exp,55} | 2,67% |
| 7 | ΔL | Atenuación necesaria de nivel sonoro | Período diurno | ΔL _d | 3,29% |
| 8 | | | Período nocturno | ΔL _n | 11,48% |
| 9 | IMD | Intensidad media diaria de vehículos | | | 11,60% |
| 10 | E _Q | Existencia de quejas respecto al ruido del tráfico | | | 9,05% |
| 11 | v | Velocidad media de los vehículos | | | 6,21% |
| 12 | %vp | Porcentaje de vehículos pesados | | | 6,63% |
| 13 | E _{MAR} | Existencia de medidas previas antirruído | | | 6,62% |
| 14 | S _{exp} | Superficie expuesta | a L _{den} > 75 dB(A) | S _{exp,75} | 2,95% |
| 15 | | | a L _{den} ∈ [65, 75[dB(A) | S _{exp,65} | 1,43% |
| 16 | | | a L _{den} ∈ [55, 65[dB(A) | S _{exp,55} | 0,77% |
| TOTAL | | | | | 100,00% |

Como se ve, en términos absolutos los mayores pesos de la metodología propuesta recaen sobre la población expuesta a más de 75 dB(A) de L_{den}, la IMD, la atenuación necesaria del nivel sonoro necesaria en período nocturno y el número de centros sensibles al ruido expuestos a más de 75 dB(A) de L_{den} existentes en el tramo. Por el otro lado, los pesos más reducidos son fijados para los datos de exposición al ruido de la superficie a todos los niveles y del resto a menos de 65 dB(A) de L_{den}. En la parte central de la tabla se encuentran el resto de parámetros de exposición entre 65 y 75 dB(A) de L_{den}, el resto de datos extraídos de los aforos y las dos variables de carácter binario, que sencillamente «suman» su peso correspondiente al RSPI en caso afirmativo o no colaboran nada en caso negativo.

Es fácil observar que el RSPI, por su propia definición, puede ser observado como un operador OWA (“ordered weighted average”), definido por Yager. Como el propio

autor presenta, estos operadores constituyen un tipo de métodos de agregación, basados en el principio del promedio de pesos ordenados. Así, un operador OWA de dimensión n está definido mediante una función $F : R^n \rightarrow R$, que tiene asociado un vector de pesos $W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$, que debe cumplir las propiedades siguientes [Yager, 1988; Yager, 1993]:

- $\sum_{i=1}^n w_i$.
- $w_i \in [0, 1]$.

Así, su resultado final está dado por la expresión $f(a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot b_i$, donde b_i es el i -ésimo mayor elemento de la colección a_i .

Un aspecto fundamental de este operador OWA está asociado con el reordenamiento de los elementos de agregación, es decir a un elemento particular a_i no se le asocia un peso determinado, sino que a cada peso w_i se le asocia una posición en la agregación [Yager, 1988]. No es sino otra forma de ver el RSPI alcanzado, bien como un operador lineal que agrega las RSPV afectadas por sus correspondientes pesos, bien como un operador OWA que, dado un vector de pesos, asocia cada uno de sus elementos a una variable de acuerdo con el orden establecido a los mismos.

De hecho, la literatura relacionada con estos operadores OWA buscan mediante la aplicación de estas propiedades y otras, como la monotonía, conmutatividad, simetría, *idempotencia*, etc., junto a diversos métodos y procedimientos, la obtención del vector de pesos asociado al operador, sobre la base de diferentes planteamientos matemáticos y analíticos [Cables Pérez, 2011].

No obstante, en el caso presente, ya se han conseguido tales pesos, de forma que el problema ha quedado resuelto satisfactoriamente gracias a la utilización combinada del FAHP y el panel de expertos, y se estima que de cara a su presentación a la comunidad ingenieril, dada la gran tradición de empleo de la suma ponderada, será más adecuada la formulación propuesta para lograr una mayor utilidad e incluso aparecer de forma más intuitiva hacia los ciudadanos o personas no expertas que puedan acercarse a la justificación del plan relacionado.

4.5. DIAGRAMA DE FLUJO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.

Tras el trabajo realizado en los apartados anteriores, se ha determinado el RSPI y ha sido propuesta una metodología que cuenta con sus RSPV ponderadas hasta alcanzar una ordenación por prioridad de los tramos de carretera incluidos en un PAR determinado como resultado de los valores del RSPI de cada uno de ellos. A partir de aquí, se procedería a considerar las alternativas posibles para cada tramo concreto y se estudiaría cada una de ellas hasta decidir qué alternativa contra el ruido es más conveniente, desde el punto de vista de diferentes criterios, como se verá en el capítulo siguiente. Por supuesto, en dicho análisis deberá estar presente siempre la alternativa nula o cero, que consiste en no realizar ninguna actuación, es decir, dejar el tramo de carretera tal y como está.

Para llegar a este punto se ha seguido un proceso definido en el plan de trabajo establecido en el apartado 3.4 y el estudio pormenorizado de todos los factores y parámetros que influyen en el problema de toma de decisiones. Es fácil, por tanto, establecer unas reglas sencillas, genéricas pero que podrán ser aplicadas a cada caso en cuestión, mediante las cuales encontrar las RSPV que influyen en el RSPI, así como incluso decantarse directamente por la alternativa 0, caso de que no sea preciso actuar sobre el tramo en cuestión. Ello puede ser presentado en forma de un diagrama de flujo que permitirá aumentar la sencillez de aplicación de esta primera fase de la metodología, así como alcanzar unos resultados más eficientes y presentar una mejor y más clara argumentación del orden escogido con ella.

Este diagrama, representado en la figura 4.2, ilustra la **aplicación de la metodología partiendo de determinados datos iniciales**, de los que pueden ir extrayéndose ordenadamente las variables que conforman el RSPI, así como de los MER, que incluso puede que no sea preciso realizar en su fase detallada o incluso ni los básicos, ya que si el diagrama arroja el resultado de la alternativa 0, no es necesario programar ninguna actuación [Ruiz-Padillo *et al.*, 2014].

De este modo, se parte de los datos del plan de aforos del tramo en estudio, del que se extraen los valores de la IMD, el porcentaje de vehículos pesados y la velocidad media, que pueden ser traducidos directamente en las RSPV correspondientes. Seguidamente, se

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

debe comprobar si la IMD del tramo es superior o no al volumen de tráfico umbral definido por la normativa según se esté en el horizonte temporal de 2007 o de 2012 y siguientes, como ya se ha visto. Si se rebasa, se procede a generar los MER básicos, mientras que si no, antes de decantarse directamente por la alternativa 0, se confirma la existencia de quejas en relación con el ruido, de modo que si existen, se pasa igualmente a componer los mapas básicos (o, al menos, una suficiente simulación o medición acústica en el tramo afectado) y a determinar el valor de la variable E_Q .

Por tanto, continuando con el diagrama, del estudio de los mapas básicos se extraen los valores de los índices de ruido, que al compararlos con los valores de estos mismos índices según los objetivos de calidad acústica, obtenidos estos de la zonificación acústica deducida de los datos de usos del suelo adyacente a la carretera, permiten el cálculo de los valores de atenuación necesaria tanto para el período diurno (ΔL_d) como el nocturno (ΔL_n). Si ambos son negativos es señal de que no rebasan los umbrales máximos determinados por la normativa, por lo que no es preciso definir ninguna actuación en el PAR (alternativa 0). Si alguno es positivo, se procede a calcular el valor de las dos RSPV correspondientes (caso de que solo un valor fuera positivo, el negativo toma valor 0, es decir, se elimina como criterio de estudio) y se continúa la metodología con el desarrollo de los mapas estratégicos detallados sobre el tramo de estudio. Estos permitirán, por un lado, determinar la existencia de centros sensibles al ruido (CS_{exp}) y, por otro, calcular los valores de superficie expuesta (S_{exp}) así como de población expuesta (P_{exp}) a ese exceso de nivel sonoro obtenido, con la ayuda de los datos de edificación y población de la zona. Con todo ello, ya se tienen los valores de estas tres RSPV, y sus correspondientes subvariables, a las que añade la que recoge la información de las medidas antirruído existentes, tomada directamente de las características de la carretera (E_{MAR}).

Una vez obtenidos los valores numéricos de todas las RSPV, se procedería a la normalización de sus valores y calcular el RSPI de cada tramo, lo cual dará la prioridad de actuación dentro del PAR. Seguidamente, para cada tramo concreto se continúa con la segunda fase de la metodología, la decisión de la mejor alternativa contra el ruido, que se desarrolla en el siguiente capítulo.

4. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DE CARRETERA DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO

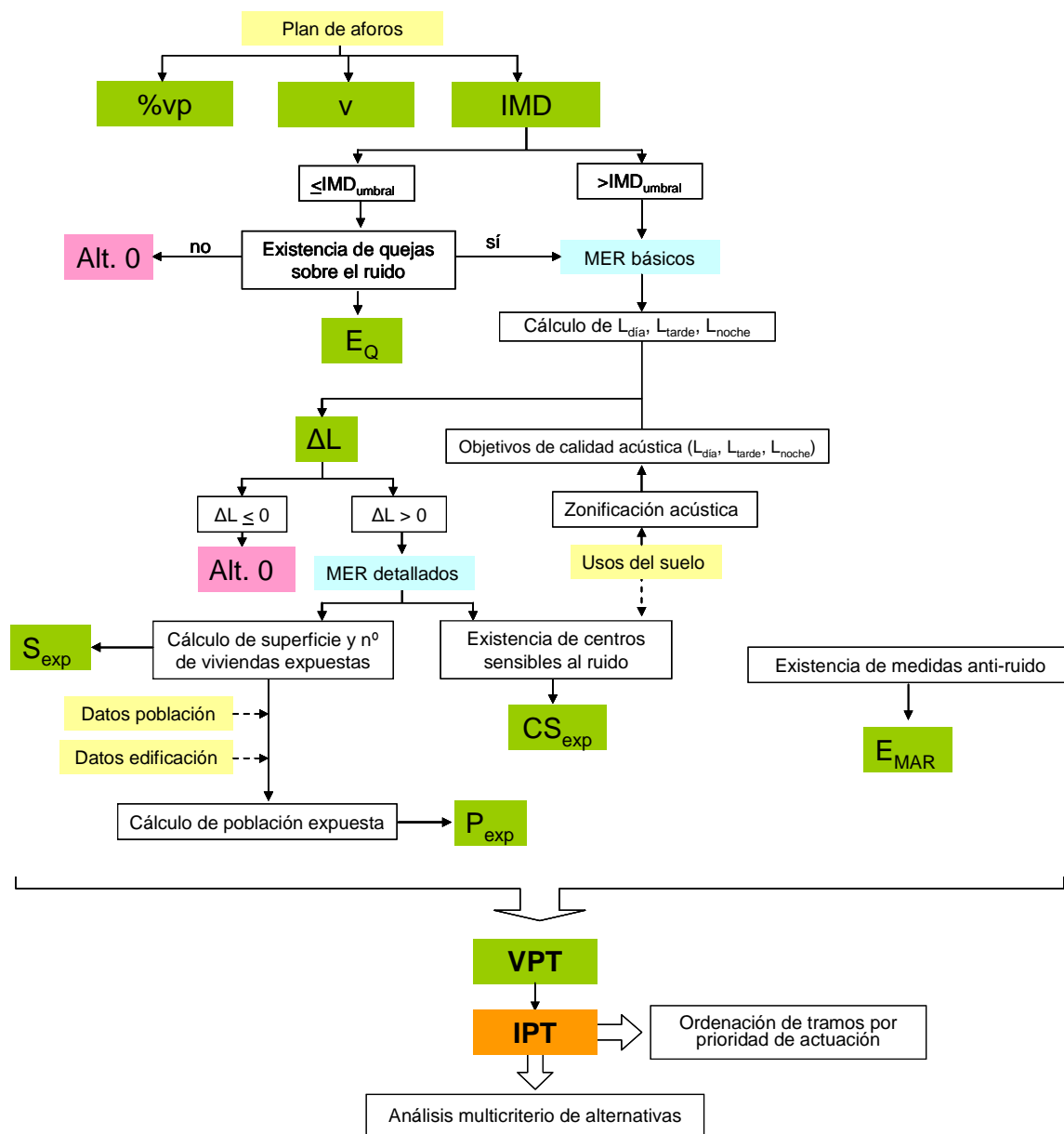


Figura 4.2: Diagrama de flujo de aplicación de la primera fase de la metodología y obtención de variables de prioridad de tramo. Fuente: elaboración propia a partir de [Ruiz-Padillo et al., 2014].

CAPÍTULO 5. PROPUESTA DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA ELECCIÓN DE LAS SOLUCIONES IDÓNEAS DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN CARRETERAS.

5.1. MATERIAL Y MÉTODOS.

5.1.1. Planteamiento del problema.

Esta segunda parte de la metodología parte de los resultados obtenidos para la primera, aunque tampoco es obligatorio, sino que también puede desarrollarse de forma independiente si se quiere aplicar separadamente a un problema de toma de decisiones sobre alternativas contra el ruido en un tramo de carretera determinado. Sea como sea, una vez ordenados por prioridad los tramos objeto de actuación del PAR que se esté elaborando o bien para un caso aislado, se debe estudiar el tramo de carretera concreto en relación con las soluciones que la ingeniería ofrece para tratar el problema de exceso de ruido que presenta y, como fruto de este análisis, **decidir la mejor alternativa u ofrecer al decisor un listado ordenado de las alternativas factibles** [Silence project, 2009; Ruiz-Padillo *et al.*, 2014].

Como es sabido, tampoco existen en la normativa de referencia criterios claramente definidos ni metodología propuesta para elección de estas alternativas. De hecho, como quedó recogido en el apartado 1.5.2, los parámetros que los PAR publicados en España utilizan para esta decisión no suelen explicitarse (en el caso de que los haya), con lo que esta no suele estar justificada, y entre las diferentes opciones existe una inclinación mayoritaria hacia las pantallas acústicas, que no son sino una, aunque muy importante, de las posibles, como seguidamente se verá.

De acuerdo con lo anterior y con lo ya expresado en el planteamiento del problema que dio lugar a la primera fase de la metodología, llegados a este punto se hace necesario también el desarrollo de un método que permita ayudar al decisor o responsable del PAR en la tarea de elegir las soluciones idóneas para cada tramo de carretera y establecer un orden según diferentes criterios sobre la prioridad de elección. Es decir, existe de nuevo un

problema de toma de decisiones multicriterio discreto que precisa ser abordado mediante las técnicas expuestas en el capítulo 2, pero en este caso en todas sus fases.

Es decir, los **objetivos de esta segunda fase de desarrollo de la metodología** ahora tienen dos vertientes como ya se comentó en el plan de trabajo: una primera parte de determinación y ponderación de criterios, que se abordará de modo muy semejante al seguido en la primera fase, y una segunda de definición de alternativas y selección de una opción, por lo que en esta segunda fase será necesario conocer no solo aquellos criterios que sirven de referencia para tomar la decisión, sino también las alternativas que conformarán el conjunto de posibilidades sobre las que elegir.

Así, para los criterios se procederá de una forma similar a la expuesta en el capítulo 4: se estudiarán los factores que influyen en el problema, se determinarán aquellos que tienen una importancia relevante a la luz de la bibliografía especializada, se seleccionarán los criterios y subcriterios y se buscarán sus pesos relativos. En cuanto a las alternativas, se debe realizar un adecuado estudio del arte en relación con las soluciones específicas que existen en la actualidad para enfrentar el problema del ruido del tráfico de las carreteras, profundizando en su modo de actuación, ventajas y limitaciones, prescripciones técnicas y otras características de interés. A partir de ello, se podrá acometer igualmente una preselección de las alternativas factibles que puedan ser objeto de elección en la metodología y sobre las que se desarrollará el análisis multicriterio.

Por tanto, es preciso llevar a cabo, por un lado, **un proceso de ponderación de criterios y seguidamente un método de decisión multicriterio sobre las alternativas**, de modo que el decisor disponga, como resultado completo de la metodología, de una definición ponderada de los puntos de vista con que analizar el problema y de una propuesta de agregación de toda la información derivada de ellos y las alternativas para llegar a una toma de decisiones justificada y coherente hacia los ciudadanos.

A continuación se hace referencia a las herramientas metodológicas utilizadas para alcanzar la propuesta de análisis multicriterio, sin ahondar nuevamente en aquellas que ya fueron utilizadas en la primera fase del proceso, así como las etapas marcadas para alcanzar los resultados perseguidos.

5.1.2. Presentación de la metodología.

Continuando con lo expresado hasta ahora, se plantean entonces dos partes claramente diferenciadas en las necesidades que han de afrontarse de cara a la formulación de la propuesta de análisis multicriterio buscada. Así, por un lado está la determinación de los criterios que serán utilizados y su ponderación y, por otro, la selección de las alternativas posibles y el modo de elección de la mejor o mejores.

Asimismo como también fue comentado en el capítulo 2, los métodos clásicos de decisión multicriterio resultan ineficientes para problemas de decisión complejos, sobre todo en aquellos casos en los que existen criterios de los que solo se dispone de información cualitativa. Por ello resulta más interesante la **utilización de métodos híbridos** donde se combinen las ventajas que puedan aportar cada uno de dichos métodos [Haghighat, 2011].

De esta manera, al respecto de los criterios van a seguirse los mismos pasos con las técnicas descritas de FAHP y de panel de expertos para la ponderación de los mismos, una vez escogidos de entre los que sean determinados a partir de la bibliografía, relacionados con las alternativas seleccionadas. De hecho, llegados a este punto, al profundizar en la conveniencia de una u otra alternativa para algunos de los parámetros descritos, queda patente que algunos de ellos no constituyen un factor determinante a la hora de escoger la solución técnica, de modo que es posible simplificar el análisis posterior al evitar introducir estos criterios en la metodología.

En relación con las alternativas, en primer lugar es necesario llevar a cabo un proceso similar de caracterización de las soluciones posibles que ofrece la ingeniería al problema de ruido objeto de esta tesis, para posteriormente realizar una preselección de las mismas en aquellas que son las que se constituyen como conjunto de alternativas factibles y eficientes sobre las que actúa el análisis multicriterio planteado. Para ello se hace imprescindible recabar las posibilidades existentes en el mercado actualmente y desglosar sus propiedades técnicas así como sus principales ventajas e inconvenientes y, seguidamente, extraer de entre todas ellas aquellas alternativas más comunes o convenientes a la luz de la experiencia en el sector. El estudio de la influencia que tienen

los parámetros de decisión sobre cada una de estas alternativas preseleccionadas, de modo que se tenga clara la relación existente entre ambos grupos de elementos, también ayuda a escoger los criterios más representativos, como ya se ha dicho.

Caso parecido puede describirse con algunas soluciones, que pueden no ser viables para un escenario determinado por sus atributos, así que también es posible, antes de iniciar el estudio de un caso concreto, restringir aun más el número de alternativas iniciales y así reducir el rango de decisión. Para ello, el usuario podrá valerse de algunas reglas sencillas que pueden ser sistematizadas en sendos diagramas de flujo, que se presentan igualmente junto a la metodología.

Una vez definidos todos los elementos del problema de toma de decisiones, solo resta escoger un método de análisis e implementarlo. Para ello, y siguiendo la idea anteriormente citada de combinar aquellos que más ventajosos se presentan al caso estudiado, se propone al decisor la utilización del método ELECTRE dentro de los del tipo de superación y el método TOPSIS para los de agregación completa. Por supuesto, los resultados de cada caso concreto pueden ser fácilmente comparables entre sí y con la técnica tradicional de la suma ponderada. Sin duda, ofrecerá opciones de discutir y obtener conclusiones interesantes al respecto.

Se inicia la investigación, de este modo, introduciendo los conceptos necesarios para comprender el problema de toma de decisiones en relación con las soluciones técnicas para continuar después con los criterios y así conformar la metodología junto a los procedimientos lógicos y matemáticos utilizados.

5.2. SOLUCIONES TÉCNICAS AL RUIDO DEBIDO AL TRÁFICO DE LAS CARRETERAS.

Como se vio en el capítulo 1, las carreteras en particular y los sistemas de transporte en general generan un impacto importante en el medio ambiente, y concretamente en el tema de esta tesis, sobre los niveles acústicos soportados debido al

tráfico rodado. Así, y pese a las medidas ya puestas en marcha en esta materia, el problema del ruido ambiental debido al tráfico de las carreteras se ha incrementado en los últimos años, como consecuencia de multitud de factores relacionados con el desarrollo económico, técnico y social de la comunidad de referencia, entre los que destacan la elevada densidad de población, la creciente urbanización y movilidad de las personas y el aumento del transporte de mercancías [Nijland *et al.*, 2003], todo lo cual ya ha sido expuesto y analizado.

Esta circunstancia podría llevar a pensar como solución a dicho dilema en buscar la **imposición de una política ecológica de crecimiento cero** que ayudara a mitigar estos problemas. Sin embargo, esta postura no es factible debido a las desigualdades existentes en la actualidad entre unos países y otros, puesto que su puesta en práctica no llevaría sino a un agudizamiento de estas diferencias, con graves consecuencias a todos los niveles. De este modo, es importante plantear, además, soluciones desde un punto de vista técnico y en el marco de lo que se definió en el apartado 3.1 como «desarrollo sostenible», que no supongan un freno a la actividad ni a la economía, pero que permitan conseguir unas carreteras que aumenten la calidad de vida de sus usuarios y vecinos y respondan a las actuales necesidades de movilidad de la población.

Por consiguiente, las soluciones técnicas para la atenuación del ruido suelen tener como objetivo influir en el principal factor acústico, la exposición al ruido, y en este apartado se va a profundizar en aquellas **medidas utilizadas comúnmente en el ámbito del problema del ruido debido al tráfico rodado en carreteras**. Estas medidas pueden actuar, de acuerdo con las características expuestas anteriormente sobre el ruido (véase apartado 1.2.2), de diferentes maneras [Burt, 1971; Bergendahl, 1976; Nijland *et al.*, 2003; Imagine Project, 2004; European Commission, 2005; Silence project, 2009; Ruiz-Padillo *et al.*, 2014]:

- Medidas para evitar y reducir el ruido en el origen. Estas medidas suelen ser las más efectivas y pretenden reducir el ruido de la fuente de ruido que lo origina, es decir, los vehículos propiamente, las carreteras y el tráfico. Algunas de las medidas más utilizadas a tal efecto son la utilización de pavimentos silenciosos, la gestión de los vehículos pesados en el interior de las ciudades, la restricción

de tráfico en ciertos sectores, la peatonalización de calles o la mejora del diseño de vehículos y sus neumáticos para la reducción de sus parámetros acústicos de emisión y rodadura. Otra familia de actuaciones directamente sobre la fuente, aunque en este caso de forma indirecta, son aquellas de índole socio-económico, tales como restricciones legales o planificación del transporte, o cargas como impuestos adicionales sobre los vehículos, los carburantes o los aparcamientos, aparte de los propios impuestos especiales.

- Medidas para reducir la propagación del ruido por divergencia geométrica. Con estas medidas se disminuye el ruido propagado ampliando la distancia entre la fuente y el receptor, para lo cual entra en juego la ordenación del territorio, la gestión del suelo y la planificación de las infraestructuras.
- Medidas para obstaculizar la propagación del ruido. Estas medidas pretenden que el ruido originado por las fuentes llegue al menor número de personas posible o llegue lo más atenuado posible. Algunas de estas medidas son la utilización de barreras acústicas, la construcción de túneles o la utilización de edificios de uso no residencial para apantallar viviendas.
- Medidas para reducir el ruido en el receptor. Estas medidas también buscan obstaculizar la propagación del ruido, pero se aplican directamente sobre el receptor y se toman cuando el resto de medidas son ineficaces, no son suficientes o no se pueden llevar a cabo. La más común es el aislamiento de las fachadas de los edificios.

Concretando por el elemento sobre el que actúan, las técnicas de ingeniería o de gestión relacionadas con el estudio para la minimización del impacto acústico de las carreteras permiten emprender distintas acciones que cabe agrupar en cinco grandes grupos, cuyas principales características se han resumido en la tabla 5.1, junto a sus propiedades de reducción de ruido referidas a una situación de carretera sin otra medida de atenuación implantada y con un firme convencional bituminoso denso o de hormigón, según el caso.

Seguidamente se profundiza en aquellas medidas más habituales para la reducción de lo niveles de ruido producido por el tráfico de las carreteras [Ruiz-Padillo *et al.*, 2014].

5. PROPUESTA DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA ELECCIÓN DE LAS SOLUCIONES IDÓNEAS DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN CARRETERAS

Tabla 5.1: Medidas de reducción del ruido debido al tráfico de las carreteras. Fuente: elaboración propia a partir de [Burt, 1971; Cegarra Plane, 1982; Nielsen and Solberg., 1988; Segués Echazarreta, 2007; Ausejo et al., 2011].

| Tipo de medida | Medida específica | Factores principales | Reducción potencial del ruido |
|---|---|---|---|
| Sobre el vehículo | Motores (más silenciosos, eléctricos...) | Efectiva a velocidades reducidas. La calidad del aire también mejora con los motores eléctricos | 2 – 4 dB emitido |
| | Neumáticos | Efectiva a velocidades altas | Hasta 8 dB emitido |
| Sobre la carretera | Diseño de la carretera (en viaducto o túnel, trazado en planta y alzado...) | Aplicable para nuevas carreteras | Hasta 30 dB emitido (típicamente 10 dB). Depende de la situación específica |
| | Barreras (diques de tierra, plantaciones, pantallas...) | Algunas visualmente poco atractivas | Recibidos hasta 25 dB menos (muy local), generalmente 5 – 10 dB |
| | Capa de rodadura (porosa, delgada, poroelástica...) | Buen drenaje. Requisitos de mantenimiento | 2 – 5 dB emitido |
| Ordenación del territorio y planificación de los usos del suelo | Normas sobre la ocupación del suelo (alejamiento de edificios de carreteras) | Aplicable para nuevas áreas que construir | Depende de la situación específica |
| | Orientación de los edificios | Aplicable para nuevas áreas que construir | Depende de la situación específica |
| | Protección del receptor (aislamiento, dobles fachadas...) | Depende de la situación específica | Hasta 5 dB recibido (dobles fachadas 20 dB) |
| Medidas sobre el tráfico | Volumen de tráfico (IMD) | Relacionada con la velocidad del tráfico | Hasta 3 dB emitido |
| | Velocidad del tráfico (velocidad menor, con menos aceleraciones y frenadas) | Es necesario su cumplimiento | Hasta 2 dB emitido, depende de la situación específica |
| | Regulación del tráfico (velocidad más regular, con menos paradas y arranques) | La calidad del aire y la seguridad también mejoran | Hasta 4 dB emitido, depende de la situación específica |
| | Composición del tráfico (prohibición concreta a vehículos pesados) | La calidad del aire también mejora | Depende de la situación específica |
| Socio-económicas | Restricciones legales (límites de emisión) | Deben ser más estrictos para ser efectiva | Depende de la situación específica |
| | Impuestos | Utilizados para muchos propósitos | Depende de la situación específica |
| | Subvenciones | Utilizados para muchos propósitos | Depende de la situación específica |
| | Transporte público | La calidad del aire también mejora | Depende de la situación específica |

5.2.1. Acción sobre los vehículos.

En general, cuando es posible, la mejor manera de remediar la exposición a niveles indeseables de ruido del tráfico, tanto económica como estéticamente, es controlar el nivel de emisión en la propia fuente [Boer and Schroten, 2007; Praticò and Anfosso-Lédée, 2012; Milford *et al.*, 2012].

En este punto se encuentran las acciones focalizadas sobre los propios vehículos, diseñando neumáticos más silenciosos y eficientes y, la que es la principal actuación al respecto, interviniendo sobre las fuentes de origen mecánico de los vehículos, es decir, reduciendo el ruido del motor, consiguiendo una mejor transmisión o mejorando los silenciadores. A este respecto, es importante destacar que los fabricantes de los vehículos de la Unión Europea deben seguir desde los años 70 del siglo pasado una normativa común encaminada a ello [Directiva 70/157/CEE, 1970; Regulation (EC) 1222/2009, 2009].

Los efectos de estas medidas suelen ser muy importantes en comparación con otras y actúan en áreas mayores, tanto más cuanto mayor sea la densidad de población, pero son muy complicadas de poner en práctica [Nielsen and Solberg, 1988], por lo que al ser tan generalistas escapan de los objetivos locales de un PAR, no es común su elección y se prefiere actuar sobre la transmisión del ruido hasta el receptor, como se ve en los puntos siguientes [Ouis, 2001].

5.2.2. Planificación de las infraestructuras y ordenación del territorio.

Resulta evidente que la primera forma para evitar los aspectos nocivos del ruido ambiental sobre los ciudadanos es una buena planificación de las infraestructuras y de las ciudades, de forma que los usos del suelo menos sensibles al ruido se localicen próximos a los corredores y zonas de afección de las carreteras.

Por tanto, aparte de las modificación de las carreteras existentes o la inclusión de parámetros determinados en las nuevas construcciones al respecto de la reducción del ruido

5. PROPUESTA DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA ELECCIÓN DE LAS SOLUCIONES IDÓNEAS DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN CARRETERAS

producido por el tráfico, se puede actuar previamente en la fase de diseño de la infraestructura aplicando conceptos de planificación técnica y de ordenación del territorio al factor ruido, como son [Segués Echazarreta y Alegre Marrades, 2006]:

- Evaluación y predicción del efecto, lo cual permitirá, en primer lugar, alejar la infraestructura de áreas sensibles previamente identificadas para preservarlas, o bien mitigar el problema gracias a una adecuada implantación en el terreno.
- Reducción de la intensidad del impacto ocasionado: en el caso de que, finalmente, no sea posible evitar el efecto con los métodos anteriores, se pueden incluir en el proyecto modificaciones adecuadas de la infraestructura que disminuyan el área afectada y los valores de la percepción acústica del ruido producido.



Figura 5.1: Ejemplos de cubrición de carretera para reducción de ruido. Fuente: [Alegre Marrades, 2013].

De este modo, se impone plantear variantes de carreteras que permitan alejarlas lo máximo posible de las construcciones existentes, así como estudiar el trazado y perfil longitudinal de los nuevos ejes, para evitar la afección a la población o a áreas sensibles. También surgen soluciones como las cubriciones parciales o totales de la carretera

(túneles), que, aunque son muy efectivas, resultan de alto coste [Nielsen and Solberg, 1988] y por esta razón suelen estudiarse otras opciones, como elevarlas respecto de los terrenos circundantes, siempre que no se generen pendientes y rampas pronunciadas que producirían el efecto contrario al buscado [Williams, 1971]. Además, las soluciones de construcción de túneles o cubrición de la carretera (falso túnel) generan mayores costes de mantenimiento posterior.

5.2.3. Barreras acústicas.

Una barrera acústica es una estructura u obstáculo que, intercalada entre el foco de ruido y el receptor, reduce el nivel sonoro que llega a este. De esta manera, una barrera acústica o antirruido bien diseñada es a menudo una solución eficaz para reducir significativamente los niveles de receptores muy expuestos al ruido, tanto en términos de $L_{\text{día}}$ como L_{noche} , por lo que se convierte en una opción muy apropiada cuando es viable su instalación y comúnmente en la estrategia de reducción del ruido más extendida [Murphy and King, 2011; Van Renterghem and Botteldooren, 2012].

Existen los siguientes **tipos de barreras acústicas**:

- Pantallas acústicas: muros constituidos por elementos relativamente delgados, verticales o inclinados, con distinto grado de absorción acústica y que ofrecen gran resistencia a la transmisión del sonido (figura 5.2). Además de por razones de seguridad y durabilidad, deben ofrecer también gran resistencia a los agentes climatológicos y al vandalismo. Son las más usuales y se profundiza en ellas a continuación.
- Diques de tierra, con grandes espesores en la base y generalmente con la parte superior plana, recubierta de tierra vegetal donde pueden crecer las plantas, de modo que permiten una mejor integración en el paisaje [Van Renterghem and Botteldooren, 2012] (figura 5.3). Otras ventajas respecto de las pantallas son que no se necesitan barreras de seguridad adicionales para ellas en la carretera, su vida útil indefinida, la ausencia de problemas con los grafiti y otros actos

5. PROPUESTA DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA ELECCIÓN DE LAS SOLUCIONES IDÓNEAS DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN CARRETERAS

vandálicos y su menor coste si existe material en exceso cerca. Sin embargo, suelen ser menos efectivas que las pantallas y tienen otros inconvenientes, como la necesidad de un mayor espacio, lo que puede suponer mayor coste por la expropiación adicional de terrenos, o que sea inviable su implantación cuando las edificaciones estén demasiado cercanas a la carretera [Bergendahl, 1976; Van Renterghem and Botteldooren, 2012].

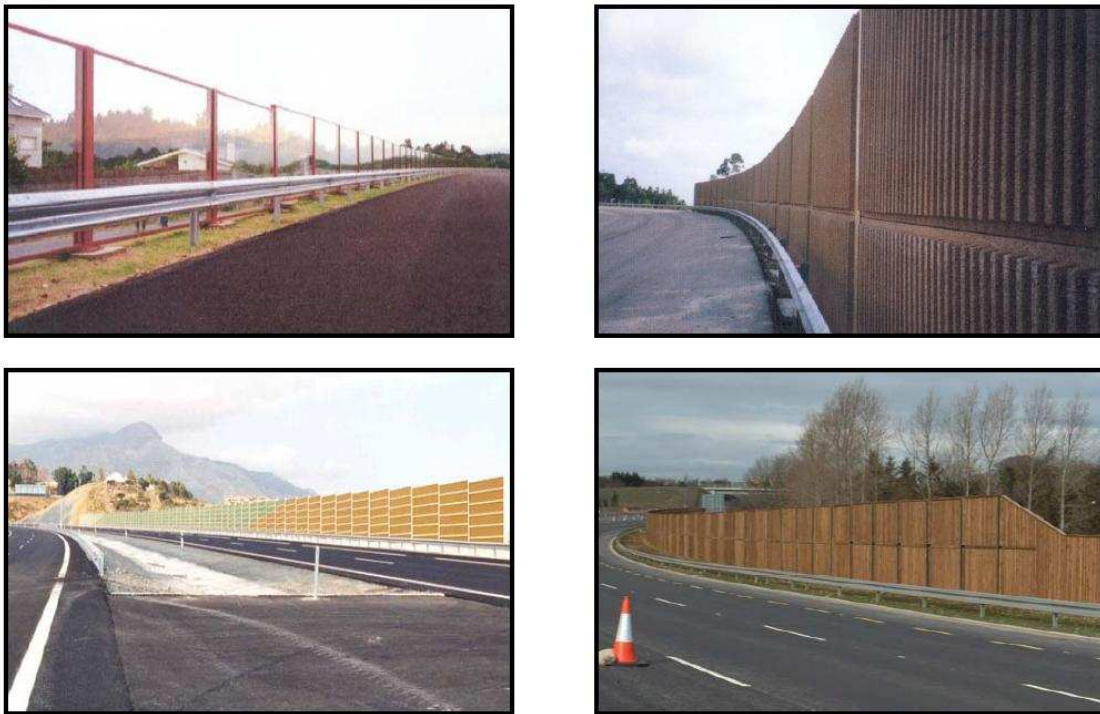


Figura 5.2: Ejemplos de pantallas acústicas. Fuente: [Alegre Marrades, 2013].



Figura 5.3: Esquema de un dique de tierra como barrera acústica. Fuente: [COPV, 2012]

- Muros de gaviones: su efectividad, teniendo en cuenta que suelen ser de baja altura, es significativa para receptores de altura limitada igualmente, hasta 8 dB(A) menos detrás de la barrera [Koussa *et al.*, 2013] (figura 5.4).



Figura 5.4: Ejemplo de muro de gaviones. Fuente: [COPV, 2012]

- Pantallas vegetales, constituidas por masas de vegetación muy densas. No son eficaces salvo que se implanten en una banda de anchura considerable [Williams, 1971], de más de 100 metros, puesto que la atenuación producida por ellas es muy pequeña (se estima que 10 metros de vegetación densa aportan una atenuación de adicional de 1 dB(A)). Sus efectos proceden de varios mecanismos: la reflexión, la absorción y la difracción de las ondas sonoras por los elementos vegetales, así como la interferencia destructiva de las mismas [Van Renterghem *et al.*, 2012]. Sus ventajas son su aspecto agradable y la absorción que favorece de los gases de escape de los vehículos [Maffei *et al.*, 2013].



Figura 5.5: Ejemplo de pantallas vegetales. Fuente: [COPV, 2012]

- Construcciones especiales: combinación de alguno de los tipos anteriores: mixtas formadas por un dique de tierra con una pequeña pantalla acústica adicional [Van Renterghem and Botteldooren, 2012], muros con relleno de tierra y vegetación, etc.



Figura 5.6: Ejemplo de barrera acústica mixta. Fuente: [COPV, 2012]

Según se ha dicho, dentro de las barreras acústicas las más comunes por su eficacia y posibilidad de implantación en aquellas carreteras ya existentes donde se presentan problemas de niveles sonoros altos son las **pantallas**, y además gozan de gran popularidad, como se desprende de los PAR analizados y su evidente presencia en muchas carreteras, así que se profundiza a continuación en sus propiedades.

En primer lugar, cabe reseñar que la clasificación usual de las pantallas se realiza por sus propiedades acústicas, por el tipo de material y por su disposición geométrica.

Así, en relación con los materiales con que están constituidas, se encuentran los siguientes: hormigón, elementos metálicos, madera, vidrio, materiales plásticos, materiales cerámicos (ladrillos agujereados), elementos prefabricados con material absorbente (fibra de vidrio, lana mineral), etc. [Boer and Schroten, 2007]. Condicionan bastante la altura, puesto que las pantallas de hormigón no suelen superar los 3 m, mientras que las constituidas por paneles más ligeros pueden alcanzar los 5 m.

En cuanto su geometría, el parámetro más destacable es la altura, que suele variar entre los 2 y 5 m, pero es importante destacar que la mejora en la atenuación del ruido gracias a las barreras al incrementar su altura de 2 a 3 m es aproximadamente el doble que la que se obtiene de aumentar la altura de 4 a 5 m [Hothersall *et al.*, 1991]. Como regla general, una pantalla debería al menos ser lo suficientemente alta como para bloquear la línea de visión desde una vivienda para los motores de los vehículos de la carretera, por lo que no tiene por qué tener una altura constante dependiendo de las características de ruido de las viviendas. Además, la atenuación se incrementa cuando la distancia respecto de la carretera aumenta [Cianfrini *et al.*, 2007]. En general, las barreras se estudian de alturas entre 3 y 6 m, ya que por debajo de 3 m no son eficaces por sí solas y por encima de 6 m presenta graves inconvenientes desde el punto de vista de la estética y diseño urbano [Naish, 2010; Hong and Jeon, 2014].

También se han planteado durante el tiempo diferentes formas de las barreras, buscando mejoras en la atenuación del ruido cambiando de una simple barrera vertical a otros diseños con secciones semicirculares o triangulares. De nuevo, la bibliografía concluye que la reducción de nivel sonoro es progresivamente mayor cuanto más vertical es la barrera, particularmente a bajas frecuencias [Hothersall *et al.*, 1991; Ishikuza and Fujiwara, 2004].

Otras experiencias han probado barreras recubiertas de materiales absorbentes. A bajas frecuencias (menores o iguales a 160 Hz) su efecto es insignificante, pero a mayores frecuencias se produce un progresivo aumento de la atenuación respecto de las superficies reflectantes [Fujiwara *et al.*, 1998]. Otros diseños como recubrir la parte expuesta de la barrera al ruido con material reflectante no producen mejoras significativas en la reducción del ruido al lado opuesto de la barrera, salvo a frecuencias altas [Hothersall *et al.*, 1991], pero la disposición de unos voladizos superiores recubiertos de estos materiales (formando una «T» o una «Y») sí ofrecen una mejora importante, porque la cobertura absorbente reduce la presión sonora en el borde y así baja la parte difractada tras la pantalla, de modo que una barrera en «T» de 3 m de altura puede proporcionar el mismo resultado que una barrera vertical plana de 10 m de altura [Ishikuza and Fujiwara, 2004]. La eficiencia de estos bordes mejorados dependen de los ángulos que presentan el emisor y el receptor

respecto de ellos, con lo que su diseño ha de ser estudiado en función de estos valores [Okubo and Yamamoto, 2007].

Así, una pequeña barrera de 1 m de alto reduce el nivel de ruido en alrededor de 5 dB(A) detrás de la misma, pero esta reducción puede llegar hasta los 10 dB(A) si se utilizan diferentes formas o superficies absorbentes [Koussa *et al.*, 2013]. En general, es raro conseguir atenuaciones superiores a los 24 dB(A) y normalmente se sitúan entre los 3 y 6 dB(A), dependiendo de su altura y diseño, así como de la distancia entre la fachada y la carretera [Boer and Schroten, 2007].

De igual modo, cuando se estudian los cambios en el comportamiento ante el ruido de una determinada barrera en función de los diferentes tipos de cobertura del terreno (por el «efecto suelo» estudiado en el capítulo 1, fundamentalmente atendiendo a si tiene características absorbentes o no), se verifica que la atenuación de ruido debido a la pantalla es independiente de las modificaciones del terreno en el rango de frecuencias audibles (no así para altas frecuencias, donde sí se producen grandes diferencias) [Van Renterghem and Botteldooren, 2012].

Por tanto, el parámetro más importante es la altura de la barrera, así como su verticalidad y la posición respecto de la fuente y el receptor (atendiendo a la posibilidad física de implantación entre ambos así como que las viviendas no se encuentren a una cota demasiado alta respecto de la vía), mientras que el uso de materiales absorbentes en la misma o en el terreno solo produce diferencias importantes a altas frecuencias [Van Renterghem and Botteldooren, 2012]. Así, su eficacia dependerá de su aislamiento acústico (comportamiento frente a la transmisión sonora), su carácter absorbente o reflectante, sus dimensiones geométricas (fundamentalmente altura y longitud), su inclinación, su situación relativa respecto a la fuente y a la zona a proteger y la presencia de obstáculos en el lugar de su implantación [Thorsson and Ögren, 2005; Boer and Schroten, 2007].

De hecho, en algunos de los PAR consultados, en concreto en los del Principado de Asturias, que como se vio son de los más completos y cumplidores de los plazos establecidos en la normativa, marcan como criterios para la implantación de pantallas acústicas la eficiencia de su colocación, evaluada según la altura de las edificaciones

adyacentes (de forma que se caracterizan como de eficacia alta cuando existen edificaciones bajas, hasta dos plantas de altura, situadas por debajo de la plataforma del eje viario o protegidas por desmontes importantes; eficacia media cuando las edificaciones son de baja altura y están situadas en terreno llano; y eficacia baja en el caso de darse edificaciones altas situadas cerca del eje viario, difíciles de salvaguardar), y la facilidad de construcción (siendo esta alta cuando la realización de las tareas necesarias para la colocación de las pantallas acústicas no implica prácticamente actuaciones tanto en la infraestructura viaria como en terrenos adyacentes; media cuando las tareas a realizar para la ejecución de la solución acústica propuesta no son abundantes pero implican ciertas modificaciones en zonas anexas al eje viario; y baja si la implantación de la medida de reducción sonora supone la realización de numerosas acciones que implican una modificación sustancial tanto del eje viario como de los terrenos colindantes al mismo) [CMAOTI, 2011].

En general, estas medidas, que reducen los niveles de emisión general son preferibles a aquellas que solo influyen en los niveles de emisiones a nivel local mientras que la situación se mantiene en el exterior, como ocurre con el aislamiento de fachadas [Ausejo *et al.*, 2011]. Sin embargo, en carreteras que se encuentran flanqueadas por edificaciones en ambos márgenes y sobre las que es muy difícil establecer medidas de atenuación de ruido, hay que tener en cuenta que las pantallas, si es posible su instalación, tendrán efectividad sólo en las partes más bajas de los edificios, mientras que para las partes altas será necesario establecer otras medidas de absorción del ruido directamente en el receptor, como el aislamiento de los edificios, para poder conseguir los valores típicos de reducción de ruido de 4 dB(A) [Hornikx and Forssén, 2009].

Por otro lado, entre los **inconvenientes o problemas** que pueden presentar las barreras se encuentran los siguientes [Burt, 1971; Nielsen and Solberg, 1988; Imagine Project, 2004; Van Renterghem and Botteldooren, 2012; Hong and Jeon, 2014]:

- Aspectos visuales y estéticos, además de pérdida de luminosidad y capacidad de visión para los residentes junto a la infraestructura.

- Colisiones de vehículos con ellas (por lo que para evitar incrementos del riesgo o de la gravedad de accidentes precisan tener características adecuadas de contención y/o mayores medidas de seguridad lateral en la vía).
- Problemas con la acumulación de nieve (las barreras hacen que la nieve se deposite en mayor medida en la calzada y que debido a su sombra tarde más en desaparecer).
- Problemas de visibilidad de seguridad, iluminación y drenaje.
- La posibilidad de que se incremente el ruido en la otra margen de la carretera debido a la reflexión. De hecho, se han realizado experiencias al respecto que han puesto en evidencia que en el caso de una única barrera en una margen de la calzada, puede ocurrir que se incremente el nivel de ruido en la margen opuesta debido a la reflexión [Boer and Schrotten, 2007], mientras que si se colocan en ambas márgenes barreras reflectantes existe la posibilidad de que el ruido reflejado de una barrera genere un incremento del ruido detrás de la barrera opuesta a distancias pequeñas desde la misma si el receptor es de mayor altura, e incluso a distancias mayores para receptores más bajos [Watts, 1996(a)]. Como posible solución a estos problemas se plantea a veces la colocación de una tercera línea de pantallas en la mediana de la vía, si existe y sus dimensiones lo permiten, así como cubrir las partes cara al tráfico con materiales absorbentes o bien mejorarlas con diferentes formas, como ya se ha visto [Cianfrini *et al.*, 2007].
- Problemas de accesibilidad a la carretera, por lo que las barreras solo son aceptables en aquellos casos en que los peatones no tengan que cruzar la calzada y no existan accesos rodados al tramo en concreto o bien accesos directos a las viviendas.
- Posibles incrementos de elementos contaminantes del aire en la carretera debido a la presencia de las barreras, en determinadas condiciones atmosféricas, sobre todo de viento, como consecuencia del bloqueo de la dispersión inicial de estos elementos, así como del aumento de la turbulencia y mezcla de los mismos [Baldauf *et al.*, 2008].

- Finalmente, problemas medioambientales debidos al aumento del efecto barrera de la infraestructura para la fauna, aunque ello pueda redundar en una disminución de los atropellos y colisiones con animales en la calzada. Además, algunas pantallas constituidas por elementos transparentes pueden ser dañinas para las aves que intentan volar a través de ellas, de modo que para intentar evitarlo suelen pintarse con diferentes diseños, lo que adicionalmente puede generar una mejor integración en el entorno [Arenas, 2008].

En cuanto a los costes, depende mucho del tipo de material, la altura y la cimentación necesaria, que a su vez está condicionada por el lugar de colocación y la presencia de vientos fuertes. Como regla general, suele oscilar entre los 100-400 €/m² [Milford *et al.*, 2012].

5.2.4. Pavimentos silenciosos.

Los pavimentos silenciosos nacen de las investigaciones al respecto en las últimas décadas que persiguen mejorar las características acústicas de las capas de rodadura del firme con el objetivo de reducir el ruido producido por el tráfico [Meiarashi *et al.*, 1995], que, como se vio en el apartado 1.2.3, tiene su origen tanto en el propio vehículo como en la interacción entre el neumático y el pavimento. Así, se trata de una medida que actúa sobre esta segunda fuente del ruido, elevando el coeficiente de absorción de la capa de rodadura [Nielsen and Solberg, 1988].

De hecho, de entre las dos causas de este ruido entre el firme y el neumático, que como se recordará obedecen por un lado al impacto con las rugosidades de la carretera (textura de la superficie de rodadura) y, por otro, a la excitación aerodinámica por efectos de resonancia y oclusión del aire en las cavidades presentes en las carreteras y el relieve del neumático, algunos trabajos de investigación realizados indican que a frecuencias por debajo de 800 Hz la generación del ruido se asocia a la rugosidad relativa del sistema neumático/calzada. Por encima de 800 Hz, es el aire alrededor del neumático el que juega un papel fundamental por la vibración de las cubiertas, por la expulsión del aire a presión

encerrado entre los dibujos de las cubiertas y por el efecto de ventosa de las cubiertas o efecto de aire resonante [Saura López *et al.*, 2005].

Normalmente, para calificar a **un firme de silencioso debe reducir el ruido de rodadura en al menos 3 dB(A)** con respecto a una mezcla bituminosa convencional, lo cual equivale a duplicar la distancia entre el receptor y la fuente de ruido o limitar a la mitad el tráfico (figura 5.7). Esta medida suele ser más efectiva para velocidades superiores a los 50 km/h [Nielsen and Solberg, 1988].



Figura 5.7: Representación del efecto de los pavimentos silenciosos sobre el ruido. Fuente: [COPV, 2012]

Las mezclas bituminosas densas convencionales utilizadas en muchas de las capas de rodadura de las carreteras españolas fundamentalmente reflejan el ruido producido por el vehículo y los neumáticos, mientras que en el caso de los firmes de hormigón, estos habitualmente suelen ser más ruidosos que los bituminosos, por su propio comportamiento, aunque si se les aplica un estriado longitudinal en lugar del transversal la textura conseguida es más favorable a la atenuación del ruido de rodadura [Kraemer *et al.*, 2001]. Sin embargo, hay que tener en cuenta que si los sonidos producidos por un firme bituminoso y otro de hormigón son ajustados al mismo nivel sonoro en la escala ponderada A, no se percibirá una clara diferencia en el ruido producido por uno u otro [Watts, 1996(b)]. Por supuesto, los firmes de adoquines son los más molestos [Freitas *et al.*, 2012], al igual que los tratamientos simples o dobles mediante riegos, que además de no poseer

función estructural y escasa durabilidad, generan una superficie muy rugosa que da lugar a niveles de ruido elevados [Praticò and Anfosso-Lédée, 2012].

Queda patente, por tanto, que en las características acústicas de la superficie de la carretera influyen de manera importante dos parámetros fundamentales: la textura (mega, macro y microtextura) y la porosidad del pavimento, además de la regularidad superficial. La contribución de la fuente de ruido provocada por la interacción neumático-firme depende principalmente de la tipología de ambos componentes de la rodadura de la carretera, aparte de su estado de conservación [Saura López *et al.*, 2005].

De hecho, de la experiencia recabada de las propias carreteras se pueden extraer las siguientes **conclusiones generales al respecto de la influencia del firme en el ruido** [Saura López *et al.*, 2005]:

- La influencia del tipo de pavimento en el ruido generado por los neumáticos es debida a las características geométricas, macroscópicas y microscópicas, del firme.
- Los pavimentos flexibles (capas bituminosas sobre una base rígida) son menos ruidosos que los pavimentos rígidos (hormigón).
- El pavimento asfáltico liso es el menos ruidoso seguido por el de hormigón estriado. Para un mismo neumático, las diferencias encontradas entre el menos ruidoso y el más ruidoso (hormigón no estriado) alcanzan los 11 dB(A).
- Las diferencias entre neumáticos, sobre un mismo tipo de firme, son siempre menores que entre tipos de firme para un mismo neumático.
- La longitud de onda media de la rugosidad del pavimento superior a 10 mm incrementa el ruido generado por los neumáticos.
- El ruido generado por los neumáticos aumenta al disminuir la presión de los mismos, dado que aumenta la presión de contacto.
- Las condiciones para un pavimento seguro no son contrarias en principio a las exigidas para un pavimento poco ruidoso.

Teniendo esto en cuenta, desde un punto de vista práctico, hay algunas **reglas básicas para el diseño de un pavimento silencioso** [Saura López *et al.*, 2005; Praticò and Anfosso-Lédée, 2012]:

- La superficie debe estar provista de macrotextura suficientemente profunda (profundidad de las desviaciones en el firme entre 0,5 mm y 5 cm) formando una mezcla aleatoria de áridos dentro de una serie homogénea de tamaño pequeño a medio (tamaño máximo: 10 mm) y muy juntos, con el fin de minimizar el bombeo de aire. Así, cuanto menor sea el tamaño de los huecos, menor será el ruido, y cuanto mayor sea la macrotextura, menores son las fuerzas de adhesión entre los neumáticos y la superficie de la calzada, con lo que menor será igualmente el nivel de el ruido. De igual modo, la macrotextura afecta a la adherencia a grandes velocidades, a la capacidad vertical y lateral de drenaje y a la resistencia a la rodadura.
- O el papel de la macrotextura puede ser jugado por una porosidad hecha de poros conectados a la superficie y unos a otros (contenido mínimo de huecos: 20%) que, además, proporcionará una absorción favorable al penetrar el sonido en los huecos, poniendo en vibración el aire que se encuentra en su interior, el cual roza con las paredes de los áridos. Es decir, entra en juego la microtextura (irregularidades por debajo de los 0,5 mm), donde se fuerza así a la transformación de la energía acústica en energía calorífica, por el efecto Joule. Por tanto, cuanto mayor sea la porosidad, menor será el ruido producido por las vibraciones en el firme. Pero la microtextura también influye en la adherencia, en este caso a velocidades bajas, pero es particularmente importante en la valoración de la resistencia al deslizamiento de la superficie.

De esta manera, para dotar de características acústicas especiales a los firmes, fundamentalmente hay que atender al tamaño y forma de los áridos de la capa de rodadura y, sobre todo, es necesario mejorar los métodos de puesta en obra para reducir en la medida de lo posible las irregularidades y conseguir así una macrotextura uniforme que minimice la generación de ruido causado por la interacción del neumático y la superficie de la carretera (que como se ha visto es la fuente predominante del ruido del tráfico para velocidades por encima de 50 km/h), así como un gran contenido de huecos (igual o

superior al 20%) que permitan la absorción del ruido producido [Meiarashi *et al.*, 1996; Kraemer *et al.*, 2001; Brennan *et al.*, 2001; Golebiewski *et al.*, 2003]. Además, para un mismo tipo de superficie del pavimento, el aumento del tamaño máximo de árido implica generalmente un mayor nivel de ruido generado [Saura López *et al.*, 2005].

En relación con las frecuencias, se ha constatado que estos firmes silenciosos presentan un alto coeficiente de absorción en el rango entre los 600 y 2000 Hz en comparación con otros pavimentos, lo que indica que la absorción acústica en los huecos de la superficie es largamente responsable de las características del ruido a baja frecuencia [Nelson and Abbott, 1987].

Por consiguiente, y teniendo en cuenta las características estándar de un firme asfáltico tradicional (árido de tamaño máximo 2-16 mm, con un tamizado del 40-55 %; arena de tamaño 0,06-2 mm y rango 35-45 %; *filler* (árido muy fino) con tamaños inferiores a 0,06 mm y rango 5-10%; ligante bituminoso con fracciones entre 4-8%; y contenido de huecos entre el 3 y el 5%), **los firmes silenciosos en el ámbito de las carreteras** pueden ser los siguientes, de acuerdo con los criterios anteriores [Kraemer *et al.*, 2001; Saura López *et al.*, 2005; Praticò and Anfosso-Lédée, 2012]:

- Asfalto poroso o drenante. El tipo más utilizado es el PA-12 en una única capa delgada (de 40 mm o menos, aunque en algunos países se ha experimentado con capas dobles: una superior de textura más fina y otra inferior gruesa y más abierta), con tamaño máximo nominal 12 mm, granulometría más abierta (10-15% pasa por el tamiz de 2,5 mm, con contenido de *filler* del 4,5%) y contenido en huecos iniciales en mezcla superior al 20%, muchos de los cuales interconectados. Como ligantes, en carreteras de la red principal se emplean generalmente betunes modificados y en la red secundaria betunes ordinarios de penetración 60/70. Suelen utilizarse dosificaciones de ligante alrededor del 4,5% sobre árido. Actualmente es la tecnología de firme de carretera más utilizada contra el ruido, por lo que se profundiza sobre ella a continuación.
- Mezclas bituminosas mejoradas o modificadas con caucho. Se trata de las capas asfálticas formadas por hormigones bituminosos que contienen entre un 20 y un 30% de polvo de caucho en peso sobre la mezcla. Tradicionalmente, su uso no

ha sido muy común en general en el mundo, debido de manera fundamental a su mayor coste [Fujiwara *et al.*, 2005], como consecuencia del mayor aporte de betún y los procedimientos especiales para su fabricación, aunque sí se encuentran casos en España que han permitido mejorar la reducción del nivel sonoro a valores entre los 3 y 4 dB(A) [CEDEX, 2007] y actualmente se están desarrollando de una forma muy importante, sobre todo a partir de la concreción de normativa técnica al respecto. Por ello, también merecen un mayor detalle seguidamente.

- Capas poro-elásticas. Se trata de unos pavimentos aún en experimentación [Praticò and Anfosso-Lédée, 2012], sin normalizar completamente en España, por lo que su uso actual aún es muy escaso. Sin embargo, sí son mezclas muy utilizadas en numerosos países europeos (Alemania, Reino Unido, Austria, Holanda, etc.), donde reciben el nombre de mezclas tipo SMA (“*stone mastic asphalt*”). Se caracterizan por una curva granulométrica discontinua con un 20 a un 40% de contenido en huecos interconectados y permiten la incorporación de una cantidad mayor de ligante (entre el 6 y el 7% en peso de áridos). Como las anteriores, incorporan caucho, procedente habitualmente de neumáticos fuera de uso (NFU), hasta en un 20%, de modo que tanto los áridos como el caucho están recubiertos de un ligante de polímero modificado, de mayor viscosidad, con lo que disminuye el riesgo de escurrimiento o de deformaciones plásticas de la mezcla [FER, 2013]. Estos materiales proveen a la capa de una superficie muy elástica que es beneficiosa para el ruido producido por los neumáticos debido a la rodadura, logrando reducciones del nivel sonoro de entre 5 y 15 dB(A) (valor típico 10) en comparación con las superficies densas convencionales. Su principal inconveniente es que poseen menores propiedades de resistencia a la fricción, con lo cual acarrearán problemas de seguridad vial, y, aparte de las desventajas ya citadas de los firmes porosos, por supuesto, tienen también un elevado coste de producción aparte de un excesivo tiempo necesario de endurecimiento (de hasta 5 días) antes de su puesta en servicio.
- Firmes de hormigón poroso. Están compuestos por hormigones con gran cantidad de huecos que ofrecen similares características que los firmes bituminosos porosos, de modo que habitualmente generan hasta 5 dB(A) menos

que los pavimentos de hormigón convencionales. Suelen disponerse en capas de rodadura de pequeño espesor y, para que sean considerados silenciosos, deben conservar sus propiedades fonoabsorbentes al menos durante tres años, pese a la colmatación de los huecos. En general, suelen tener un coste un 40% mayor que los firmes de hormigón convencionales [Watts *et al.*, 1999; Praticò and Anfosso-Lédée, 2012]. En España destaca su uso en un tramo de la carretera M-50 en Pinto (Madrid), entre otros ejemplos, pero a partir de 1993 el uso general de pavimentos de hormigón se reduce drásticamente en las carreteras de nuestro país (sobre todo después de los fracasos recabados en algunos tramos de la autovía A-4 en Toledo y Ciudad Real o el tan conocido de la A-92 entre Sevilla y Granada), hecho que se mantiene en estos comienzos del siglo XXI, mientras se construyen profusamente pavimentos de hormigón en puertos y aeropuertos.

- Pavimento eufónico. Se trata de una versión mejorada del pavimento formado por una capa de rodadura de mezcla porosa de 40 a 60 cm de espesor que recubre una losa de hormigón de armadura continua con resonadores de alrededor de 500 cm³ cada uno, repartidos sobre el conjunto del pavimento. Se trata de otro tipo actualmente en desarrollo e investigación, pero que ya ha sido implantado en países como Italia, donde se han experimentado disminuciones del ruido sobre todo a frecuencias bajas, alcanzando una reducción de 5 a 6 dB(A), lo cual corresponde aproximadamente al efecto que se obtendría duplicando la masa superficial de fachada o multiplicando por cuatro la distancia entre la edificación expuesta y la carretera.

Como se ha dicho, tradicionalmente **el tipo más común de estos pavimentos silenciosos es el de mezclas porosas drenantes**, puesto que presenta una gran eficiencia en términos de reducción del ruido (entre los 3 y 5 dB(A), dependiendo de la velocidad específica de la vía) y, aparte de ello, presenta excelentes propiedades frente al “*aquaplanning*” y las salpicaduras gracias a que sus huecos están intercomunicados y no están rellenos de finos, con lo que dejan entrar el agua hasta evacuarla [Watts *et al.*, 1999]. En general, se estima que las mezclas drenantes respecto de las mezclas densas producen una reducción del ruido de 1-7 dB para vehículos ligeros, 3-4 dB para camiones pequeños y 4-6 dB para camiones pesados, de modo que la media percibida por el receptor permite

alcanzar una reducción sonora de hasta los 5 dB(A) [Meiarashi *et al.*, 1996]. Experiencias con este tipo de técnicas desarrolladas en España por el Centro de Investigaciones de la concesionaria ELSAN, en concreto en la autopista Bilbao-Behovia y en Paseo de Colón de Barcelona, obtuvieron como resultado que estas mezclas porosas comparadas con las tradicionales reducen el nivel sonoro equivalente medido durante 24 horas y a 5 m de la calzada, en 2-3 dB(A).

La principal desventaja de estas capas con gran cantidad de huecos interconectados es la obstrucción y colmatación de los mismos durante la vida útil del firme, con lo que pierde parte de su capacidad drenante y eficiencia sobre el ruido. Por ello, se estima una vida útil media de unos 6 años, pero que puede prolongarse hasta los 10-12 años si se realizan tareas de limpieza y desatascos, no sólo para mantener sus características acústicas, sino también por razones de seguridad, para garantizar una adecuada adherencia de los vehículos [Williams, 1971; Brennan *et al.*, 2001; CEDEX, 2007]. Por esta razón, las mezclas abiertas y drenantes se caracterizan por tener bajos niveles de ruido al comienzo de su vida útil y un aumento significativo en sus primeros años de servicio, mientras que las mezclas tradicionales densas normalmente tienen mayores niveles de ruido al comienzo de su vida, pero son más estables con el tiempo en comparación con las capas porosas [Freitas *et al.*, 2012].

Además, estas capas suelen ser menos resistentes a las tensiones tangenciales, de modo que no son recomendables para intersecciones y glorietas, donde se producen desprendimientos de partículas en superficie. Del mismo modo, su capacidad estructural es menor que la de las mezclas convencionales, pero en cuanto a la resistencia a la rodadura, no debe ser un inconveniente si se utilizan áridos con la calidad adecuada, aunque justo durante unos pocos meses después de su extendido puede dar problemas al respecto debido a la fina capa de ligante que envuelve los áridos que no haya sido aún desgastada por el tráfico. Debido a su elevado porcentaje de huecos, tampoco es recomendable su uso en zonas susceptibles de heladas [CEDEX, 2007].

Por tanto, cuando se buscan pavimentos porosos eficaces durante mayor tiempo de servicio se consideran 3 criterios [Saura López *et al.*, 2005]:

- Máximo tamaño del árido fino entre 4-6 mm y una alta porosidad. Se alcanzan reducciones sonoras iniciales elevadas aunque se produce con rapidez una colmatación de los poros requiriendo una adecuada limpieza y mantenimiento.
- Máximo tamaño del árido grueso entre 16-20 mm y una alta porosidad. Aunque los huecos/poros son anchos, tardará más en rellenarse de suciedad y por tanto en colmatarse. La reducción inicial del ruido se sustituye a favor de una reducción moderada a largo plazo.
- Doble capa. Combina los 2 principios anteriores utilizando el primer principio en la capa superior en contacto con las ruedas y utilizando el segundo en la inferior. Este tipo de superficie garantiza una larga reducción acústica pero requiere un mantenimiento y limpieza regular.

En cuanto a su coste, suele ser entre un 25 y un 50% mayor que las mezclas bituminosas convencionales, aunque debido a su menor densidad puesta en obra representa en superficie un 10% más de precio a igual espesor. Sin embargo, en comparación con las pantallas acústicas representa una reducción del coste de inversión inicial hasta del 80%.

Finalmente, reseñar experiencias publicadas que han destacado la independencia de su efecto de la temperatura ambiente (al menos en el rango normal de 9°C a 22°C), de la edad del pavimento (al menos en el período hasta 10 años), de la porosidad de la mezcla (para valores del 20% o superiores), de la resistencia al deslizamiento y para tráficos habituales [Williams, 1971; Nelson and Abbott, 1987; Meiarashi *et al.*, 1995; Brennan *et al.*, 2001].

La implantación de los firmes drenantes en España tienen un hito importante en 1979, año en que de ingenieros de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de Santander ponen a punto este tipo de mezclas bituminosas porosas para su empleo en capas de rodadura, así como desarrollan el denominado ensayo cántabro, incorporado a los procedimientos de diseño de estas mezclas en distintos países europeos además de en el nuestro. Tras las primeras experiencias en carreteras de Cantabria se empiezan a realizar obras no experimentales por toda España, como las ya citadas entre Bilbao y Behovia y en Barcelona, y a partir de entonces se extienden rápidamente por toda la geografía nacional,

hasta el punto que en 1999 se superan los setenta millones de metros cuadrados, destacando provincias como las de Zamora y Jaén. Estas cifras superan extraordinariamente las de otros países europeos donde esta técnica alcanza también una gran difusión: Austria, Bélgica, Francia y Países Bajos, principalmente. Sin embargo, el clima poco lluvioso de la mayor parte de España hace que a finales de los noventa se empiece a considerar que los inconvenientes antes citados de colmatación y dificultad de limpieza superan a sus ventajas drenantes y acústicas, y la técnica entra, de cara al siglo XXI, en una etapa de retroceso.

Para finalizar en cuanto a las mezclas porosas, apuntar que para reducir el ruido de calles céntricas de ciudades (velocidades bajas) se están investigando capas bituminosas drenantes muy delgadas y de baja granulometría (10 mm o menos) [Praticò and Anfosso-Lédée, 2012]. Sin embargo, se ha comprobado que en estos casos es más importante el tamaño del árido que el espesor de la capa, de modo que al reducir el diámetro de los áridos se obtiene entre 1 y 2 dB(A) de reducción de nivel sonoro emitido adicional sobre una mezcla drenante normal [Meiarashi *et al.*, 1996].

En relación a las **mezclas bituminosas modificadas o mejoradas con caucho**, hay que destacar el especial protagonismo que están recabando en los últimos años dentro del panorama de los firmes de carretera, debido a la reutilización de los llamados neumáticos fuera de uso (NFU). De hecho, la Directiva 1999 / 31 / CE, de 26 de abril de 1999, sobre vertido de residuos, prohibió el vertido de neumáticos enteros en vertederos a partir del 16 de julio del 2003 y troceados a partir del 16 de julio de 2006; por su parte, en España, la Ley 10 / 1998 de residuos, actualizada por la Ley de residuos 22 / 2011, establece para el tratamiento de los residuos el principio básico de jerarquía donde se da prioridad al reciclado material de los residuos frente a otras formas de valorizar (reutilizar-reciclar-valorizar) [Costa Hernández, 2011].

El reciclado material de los NFU consiste básicamente en recuperar por separado los componentes del neumático, es decir, el caucho, el acero y las fibras textiles. Es precisamente el caucho de NFU en forma de polvo o partículas finas, procedente de la trituración y molienda de los neumáticos, el agente modificador que se incorpora a los

betunes y mezclas bituminosas mejorando notablemente sus propiedades, entre las que caben destacar las siguientes [CALTRANS, 2003; CEDEX, 2007]:

- El polvo de caucho actúa como espesante, aumentando la viscosidad del ligante. En las mezclas bituminosas esto permite envolver los áridos con películas más gruesas de betún sin que se produzcan escurrimientos o exudaciones.
- La adición de polvo de caucho modifica la reología de los betunes, de manera que aumentan su elasticidad y resiliencia a temperaturas elevadas y disminuye la susceptibilidad térmica.
- Mejor resistencia a las roderas que las mezclas que utilizan betún convencional, por su elevada viscosidad, punto de reblandecimiento y resiliencia (ligante más elástico y viscoso a las temperaturas altas de servicio).
- Menor susceptibilidad a la temperatura que las mezclas bituminosas fabricadas con betún convencional.
- Mayor resistencia al agrietamiento, tanto por fatiga como por reflexión de las capas inferiores, que las mezclas fabricadas con betún convencional, debido a los elevados contenidos de ligante que permite esta técnica.
- Mayor resistencia al envejecimiento y a la oxidación que las mezclas convencionales, por el potencial de utilizar mayores dotaciones de ligante y por la presencia de los antioxidantes del caucho de neumáticos.
- Ventaja desde la óptica de la seguridad vial, al mantener durante más tiempo el contraste con las marcas viales debido a que permiten introducir más betún y dura más el color negro de la superficie.
- Y, lo que afecta especialmente al problema que se está analizando, mejores propiedades acústicas, al disminuir el ruido de rodadura de los vehículos gracias a su elevado porcentaje de huecos.

La idea de incorporar caucho de NFU en las mezclas bituminosas no es nueva, sino que se remonta a mediados del siglo pasado, pero el hecho de que el volumen de neumáticos generados haya aumentado de manera exponencial en los últimos años, la prohibición de su vertido y la necesidad de reciclar aprovechando sus componentes antes

que proceder a su valorización energética ha sido el punto de partida que ha motivado la realización de numerosos estudios e investigaciones en profundidad para buscar una salida provechosa del residuo en el mercado de la carretera, el cual se ha actualizado también en materia normativa al respecto para poder dar acogida al reciclado de un gran volumen de los NFU generados [FER, 2013].

Actualmente existen dos formas fundamentales de incorporar el polvo de caucho en las mezclas bituminosas para firme de carreteras [CEDEX, 2007; FER, 2013]:

- Por vía húmeda: procedimiento que consiste adicionar en la mezcla a alta temperatura el polvo de caucho procedente de NFU con un betún de penetración para obtener un ligante modificado o mejorado con caucho. Cabe establecer la diferencia entre los tipos de betunes obtenido, puesto que los betunes mejorados con caucho (BC) presentan características empíricas mejores que las de los betunes asfálticos y el porcentaje de polvo de caucho suele estar comprendido entre un 8 y 12%; por su parte, los betunes modificados con caucho (BMC) presentan propiedades empíricas similares a las de los betunes modificados con polímeros y la cantidad de polvo de caucho es generalmente mayor del 12% e inferior al 15%; finalmente, los betunes modificados de alta viscosidad con caucho (BMAVC) se fabrican con una mayor proporción de polvo de caucho (generalmente entre 15 y 22%). Las dos primeras clases se producen en planta, mientras que las mezclas con BMAVC también pueden ser fabricadas *in situ*, con planta móvil. Cuando el polvo de caucho se incorpora a un betún a elevada temperatura, las partículas de caucho se reblandecen, absorben los componentes más ligeros del betún y se hinchan. Con el hinchamiento disminuye la distancia entre partículas y el ligante se hace más viscoso. Este fenómeno de hinchamiento se suele denominar digestión o maduración.
- Por vía seca: procedimiento que consiste en la incorporación del polvo de caucho procedente de NFU directamente en la amasadora de la central de fabricación de la mezcla bituminosa, como si de un árido mineral se tratara, pero las partículas más finas interaccionan con el betún modificando sus propiedades, consiguiéndose así mejorar el comportamiento de la mezcla

bituminosa. Con este procedimiento se obtiene una «mezcla bituminosa modificada con polvo de caucho».

En el caso concreto del uso de estas mezclas en capa de rodadura, la normativa española prescribe, en función de la categoría de tráfico pesado que corresponda a la carretera a pavimentar, tres posibles tipos de acuerdo con el PG-3 [CEDEX, 2007; FER, 2013]:

- Para las categorías T00 a T1 solo se permite utilizar o bien mezclas bituminosas en caliente de granulometría discontinua para capas delgadas tipo BBTM B o bien mezclas porosas o drenantes del tipo PA. Estos dos tipos se caracterizan por tener un elevado contenido de huecos en áridos, variable entre el 22% para las BBTM B y del 27 al 28% para las mezclas PA. En ellas, gracias a la mayor viscosidad que da al betún el polvo de caucho, se puede aumentar el contenido de ligante sin riesgo de escurrimientos o deformaciones plásticas, con lo que la película de ligante alrededor de los áridos gruesos es sensiblemente más gruesa, lo que se traduce en mayor durabilidad de la mezcla bituminosa y en un mejor comportamiento de la misma a la fatiga.
- Para el resto de categorías de tráfico pesado pueden utilizarse los dos tipos anteriores, así como las discontinuas tipo BBTM A y las tipo hormigón bituminoso (AC densas y semidensas como las AC16 surf D, AC16 surf S, AC22 surf D y AC22 surf S, todas las cuales tienen una granulometría continua y un contenido moderado de ligante, entre el 4,5 y el 5%). Como capa de rodadura, las mezclas densas y semidensas, de 5 o 6 cm de espesor, tienen la ventaja de poseer mayor capacidad estructural que el resto de las mezclas bituminosas, pero su textura no las hace muy adecuadas para tramos en los que se circula a velocidad elevada.

Este tipo de microaglomerados bituminosos discontinuos en caliente entran con fuerza en el panorama español, como se ha dicho, a finales del siglo pasado hasta acabar por desplazar a los firmes porosos como capa de rodadura de altas prestaciones funcionales en los comienzos de este siglo XXI y en la actualidad continúan con gran expansión, sobre todo en las obras de refuerzo de carreteras.

Dentro de este tipo de pavimentos silenciosos ocupan un lugar diferenciado las denominadas **mezclas bituminosas de capa delgada**, caracterizados por su gran proporción de árido grueso que está entrelazado para formar un esqueleto que se rellena con un betún, arena y un inhibidor de drenaje del aglutinante (por lo general, fibras). Exigen áridos más duraderos y mayor contenido de ligante modificado, así como una cuidada puesta en obra, con lo que suelen ser más caras que las mezclas convencionales densas, pero debido a su alta durabilidad presentan una rentable relación coste-beneficio [Praticò and Anfosso-Lédée, 2012]. Suelen ser más utilizadas en vías urbanas y calles de países del norte de Europa, donde sus datos típicos de mejora acústica se sitúan también en los 3 dB(A). Además, pueden ser también porosas, constituidas por mezclas discontinuas, con lo que suman buenas características drenantes a las acústicas.

Para terminar, no hay que olvidar que los pavimentos silenciosos, en general, no suelen ofrecer la reducción de ruido que se puede obtener por barreras a corta distancia, aunque en casos precisos pueden ser complementarias a ellas [Van Renterghem and Botteldooren, 2012].

5.2.5. Gestión del tráfico.

En general, es posible reducir de forma muy importante el número de personas expuestas a niveles de ruido dañinos mediante técnicas globales como la gestión del tráfico, que además son más baratas que las medidas locales [Ausejo *et al.*, 2011].

Este grupo de medidas sobre el tráfico atienden fundamentalmente a la regulación de la circulación, reduciendo la velocidad o el volumen del mismo, generando un flujo de tráfico más suave y uniforme o bien modificando su composición [Burt, 1971; European Commission, 2005]. Ello puede conseguirse mediante las siguientes **técnicas** [Bergendahl, 1976; Ausejo *et al.*, 2011]:

- Modificación de la vía a un único sentido.

- Restricciones a la circulación de vehículos en general mediante el control de matrículas (de forma que se autoriza la utilización del vehículo de forma alternativa según si son pares o impares) o de la velocidad máxima permitida (que reduce el ruido en menor medida que cuando se reducen en número).
- Restricción exclusivamente para vehículos pesados tanto en su número como en su velocidad máxima permitida (siempre que esta última acción no vaya en detrimento de la fluidez del tráfico en general o provoque un incremento de la velocidad de los vehículos ligeros, lo que conllevaría un aumento del ruido producido globalmente). De hecho, una reducción del 50% de los vehículos pesados, que comprenden un máximo de un 10% del total del tráfico, disminuyen los niveles de ruido en 2 dB(A) (y hasta 7 dB(A) en período nocturno), mientras que una reducción del 50% sobre todos los vehículos solo consigue la ya conocida reducción de 3 dB(A).

Estas medidas, cuya aplicación no es viable generalmente en autovías, autopistas y otras carreteras de gran capacidad [Van Renterghem and Botteldooren, 2012], sí pueden ser estudiadas para carreteras y vías de tipo urbano donde exista conflicto entre el transporte y el ruido del tráfico [Ouis, 2001]. De hecho, en aquellos casos estudiados donde se han implantado estas medidas, se ha comprobado la alta eficiencia de las mismas, con lo que su desarrollo puede ser un arma potencial muy importante al respecto en el futuro [Murphy and King, 2011], ya que además suele verse más beneficiado el rango de población que se encuentra en las categorías con mayor nivel de exposición, aparte de la mejoría que se comprueba durante los períodos nocturnos, de modo que permiten corregir la situación de las personas más afectadas [Murphy and King, 2011]. Un resumen de estos **efectos** puede verse en la tabla 5.2 [Danish Road Institute, 2004].

Como se ve, en general suelen ser más efectivas las medidas de reducción de velocidad que de reducción del volumen de tráfico, aunque cuando se aplican simultáneamente, suelen dar resultados adicionales en comparación a su aplicación separada. Además, hay que tener en cuenta que habitualmente una reducción del tráfico provoca un aumento de la velocidad de los vehículos.

5. PROPUESTA DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA ELECCIÓN DE LAS SOLUCIONES IDÓNEAS DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN CARRETERAS

Tabla 5.2: Efectos de las limitaciones de velocidad y de las reducciones de tráfico sobre la reducción del ruido. Fuente: [Danish Road Institute, 2004].

| Reducción de velocidad (10% vp) | Reducción de nivel sonoro | Reducción de tráfico | Reducción de nivel sonoro |
|--|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| De 110 a 100 km/h | 0.7 dB(A) | 10% | 0.5 dB(A) |
| De 100 a 90 km/h | 0.7 dB(A) | 20% | 1.0 dB(A) |
| De 90 a 80 km/h | 1.3 dB(A) | 30% | 1.6 dB(A) |
| De 80 a 70 km/h | 1.7 dB(A) | 40% | 2.2 dB(A) |
| De 70 a 60 km/h | 1.8 dB(A) | 50% | 3.0 dB(A) |
| De 60 a 50 km/h | 2.1 dB(A) | 75% | 6.0 dB(A) |
| De 50 a 40 km/h | 1.4 dB(A) | | |
| De 40 a 30 km/h | 0 dB(A) | | |

Por otro lado, el modo de conducción de los usuarios de la carretera también afecta al grado de molestia percibido por el ruido del tráfico, ya que los cambios bruscos de velocidad tienen efectos negativos sobre el control del ruido del tráfico. En general, el nivel sonoro producido es mínimo a velocidad constante y se incrementa con las aceleraciones/deceleraciones del vehículo, que es cuando se producen los picos de ruido [Mak *et al.*, 2011].

Sin embargo, una de las técnicas más utilizadas últimamente para la reducción de la velocidad en las vías españolas es la instalación de elementos reductores de velocidad, en sus diferentes fisonomías de pasos de peatones sobreelevados o lomos de asno, y bandas transversales de alerta. Ya la normativa de aplicación al respecto [Orden FOM/3053/2008, 2008] advierte de que las bandas transversales de alerta no deberán instalarse en la proximidad de zonas habitadas, puesto que pueden producir molestias a causa del ruido que ocasionan al circular sobre ellas. Pero, además, en el caso de los elementos reductores de velocidad también se ha comprobado que, en comparación con el flujo de tráfico libre, la aceleración de los vehículos después de superarlos incrementan los niveles sonoros pico en más de 10 dB(A) y, aunque el nivel sonoro medio no se ve modificado de forma representativa, la molestia producida por el nivel sonoro máximo sí se incrementa [Rylander and Björkman, 2002].

En cuanto a las medidas sobre la composición del tráfico, hay que tener en cuenta que los resultados experimentales muestran que el número de eventos de ruido no influye en el grado de molestia, es decir, hay una fuerte relación entre el nivel sonoro equivalente

ponderado y el grado de molestia, así como entre el nivel máximo de ruido y el grado de molestia. Estos datos sugieren que las acciones para controlar los efectos perturbadores del ruido del tráfico rodado deben centrarse en vehículos ruidosos y que limitar el número de vehículos no tendría tanto efecto sobre el grado de molestia, por lo que las medidas de reducción de ruido en este sentido son más eficientes orientadas a prohibir los vehículos más ruidosos, que, además, suelen ser un pequeño porcentaje del número total de vehículos en el flujo de tráfico total [Sato *et al.*, 1999].

Como efecto adicional de estas técnicas se consigue una mejora de la seguridad del tráfico y del comportamiento en sí del flujo de vehículos (mayor suavidad en la conducción, menores congestiones...), así como efectos favorables sobre la contaminación del aire [Nielsen and Solberg, 1988]. Igualmente permiten mejorar la concienciación ciudadana con el problema del ruido y la optimización de la utilización del vehículo privado en las ciudades [Ausejo *et al.*, 2011].

Sin embargo, en muchas ocasiones estas medidas, caso puedan ser usadas, no logran resolver el problema completamente, dejando un porcentaje significativo de población a niveles muy altos de ruido, con lo que se hace necesario combinar estas acciones globales con otras locales, como las barreras acústicas vistas anteriormente.

5.2.6. Aislamiento de edificios.

Y finalmente se considera esta solución, aplicada directamente sobre el receptor del ruido. En el ámbito que se está tratando, se entiende por aislamiento acústico al conjunto de **procedimientos empleados para reducir o evitar la transmisión del ruido ambiental desde el exterior hacia el interior de un recinto**, con el fin de obtener una calidad acústica determinada. Para ello, y basándose en los conceptos de atenuación del ruido descritos en el capítulo 1, se plantea la aplicación de materiales aislantes de sonido sobre los edificios para así conseguir una disminución en el nivel de ruido que reciben los habitantes que residen en ellos.

La implantación de ventanas aislantes, disposiciones especiales de ventilación, dobles fachadas o viviendas integradas en barreras acústicas pueden conseguir reducciones de ruido de 5 a 20 dB, con lo que suele ser la acción más efectiva en aquellos casos de exposición a niveles elevados de ruido en el interior de los edificios que generen problemas graves de perturbación del sueño [Nielsen and Solberg, 1988]. Obviamente, las ventanas con aislamiento acústico son eficaces como protección contra el ruido si permanecen cerradas, lo cual puede ser una restricción no deseada para muchas personas, especialmente durante el verano. Precisamente, por la razón de que la gente abre las ventanas y pasa tiempo fuera de sus viviendas se ha demostrado que con un aumento del aislamiento no se reduce tanto la molestia debida al ruido como se podría esperar sobre la base de la reducción del nivel sonoro [Van Renterghem and Botteldooren, 2012].

Por otro lado, la composición del ruido en el espectro de frecuencias es muy importante a la hora de estudiar el aislamiento de edificios, porque desgraciadamente el ruido del tráfico presenta una gran composición de bajas frecuencias, especialmente a unos 60 Hz, y en este rango de bajas frecuencias el aislamiento es más difícil de conseguir [Ouis, 2001].

En general las medidas que reduzcan los niveles de emisión general son preferibles a estas que solo influyen en los niveles de emisiones a nivel local mientras que la situación se mantiene en el exterior, puesto que con el aislamiento de fachadas no se protegen las zonas exteriores de los edificios como los balcones y los jardines [Imagine Project, 2004]. Sin embargo, estas medidas pueden ponerse en práctica en conjunto con otras sobre el tráfico [Nielsen and Solberg, 1988] y suelen ser necesarias cuando medidas locales como las barreras u otras como los pavimentos silenciosos no son efectivas [Ausejo *et al.*, 2011].

A continuación se seleccionarán las soluciones técnicas que más adecuadamente serán introducidas en la metodología que se desarrolla en la presente tesis, y que posteriormente serán evaluadas en función de los criterios igualmente determinados por su influencia en el problema de toma de decisiones planteado.

5.3. ALTERNATIVAS EN ANÁLISIS.

5.3.1. Identificación de soluciones técnicas.

En el apartado anterior se han estudiado las diferentes medidas posibles que ofrecen la técnica y la ingeniería como solución a los problemas del ruido debido a las carreteras. Ello ha permitido enumerar las distintas alternativas y glosar sus principales características atendiendo a su efectividad, coste y posibilidades de implantación.

Sin embargo, como ya se conoce, cada tramo con presencia de exceso de ruido producido por el tráfico rodado reúne diferentes peculiaridades que hacen que unas soluciones sean más viables que otras, lo que implica la necesidad de toma de decisiones correctas al respecto. De hecho, la Directiva Europea de Ruido Ambiental presenta una serie de recomendaciones sobre las medidas que pueden prever las autoridades dentro de sus competencias, como las siguientes [Murphy and King, 2011; Directiva 2002/49/CE, 2002]:

- Planificación de los usos del suelo y ordenación del territorio.
- Gestión y regulación del tráfico.
- Aplicación de medidas técnicas en las fuentes emisoras.
- Selección de fuentes más silenciosas.
- Reducción de la transmisión de sonido.
- Atenuación mediante medidas de aislamiento sonoro.
- Medidas o incentivos reglamentarios o económicos.

Por su parte, en el documento «Criterios y condiciones técnicas para la elaboración de los mapas estratégicos de ruido de las carreteras de la Red del Estado 2ª fase 2012» elaborado por el Ministerio de Fomento, como ya se comentó en el apartado 1.5.2, cita únicamente las pantallas acústicas y los pavimentos silenciosos, englobando el resto de posibles medidas dentro del tipo «complejo» [Ministerio de Fomento, 2010].

5. PROPUESTA DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA ELECCIÓN DE LAS SOLUCIONES IDÓNEAS DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN CARRETERAS

Por tanto, a la luz del estudio bibliográfico realizado, **las alternativas técnicas se pueden englobar en varias categorías**, dependiendo de dónde enfoquen su actuación y del proceso de atenuación sonora que sigan. En la tabla 5.3 se resumen los principales tipos estudiados, con sus características esenciales de efectividad en atenuación sonora y coste de inversión para la Administración competente. Hay que aclarar que se han presentado valores típicos de estos datos, ya que la variación según los casos puede ser muy amplia, sobre todo en relación con el coste, que depende en gran medida de las condiciones de implantación que precisa la medida en la infraestructura existente, así como en función de la dimensión del tramo de actuación y las peculiaridades locales de la carretera. En este aspecto hay que indicar igualmente que algunas medidas no tienen un coste claro de inversión, puesto que algunas se trata de políticas de actuación generales o que requieren un estudio pormenorizado para alcanzar un presupuesto o, sencillamente, involucran actores privados de forma compleja, lo que necesita de un protocolo de trabajo conjunto muy concreto.

Tabla 5.3: Principales medidas de acción contra el ruido del tráfico en carreteras. Fuente: elaborada a partir de [Ruiz-Padillo et al., 2014].

| Referencias |
|---|
| Boer and Schrotten, 2007 |
| Nijland <i>et al.</i> , 2003; Regulation (EC) 661/2009, 2009; Praticò and Anfosso-Lédée, 2012 |
| Danish Road Institute, 2004 |
| Danish Road Institute, 2004 |
| Ausejo <i>et al.</i> , 2011 |
| Bendtsen <i>et al.</i> , 2005 |
| European Commission, 2005 |
| Nielsen and Solberg, 1988 |
| MOPTMA, 1995 |
| Williams, 1971 |
| Bergendahl, 1976 |
| MOPTMA, 1995; Boer and Schrotten, 2007; Milford <i>et al.</i> , 2012 |
| MOPTMA, 1995; Van Renterghem and Botteldooren, 2012 |
| MPWET, 1995; Koussa <i>et al.</i> , 2013 |
| Van Renterghem and Botteldooren, 2012 |
| De Winne <i>et al.</i> , 2012; Van Renterghem and Botteldooren, 2012 |
| Milford <i>et al.</i> , 2012; Meiarashi <i>et al.</i> , 1996; Watts <i>et al.</i> , 1999 |
| Milford <i>et al.</i> , 2012 |
| Nijland <i>et al.</i> , 2003; De Winne <i>et al.</i> , 2012; Praticò and Anfosso-Lédée, 2012 |
| Fujiwara <i>et al.</i> , 2005; De Winne <i>et al.</i> , 2012; Praticò and Anfosso-Lédée, 2012 |
| Praticò and Anfosso-Lédée, 2012 |
| MPWET, 1995 |
| Nielsen and Solberg, 1988; MOPTMA, 1995; Jiménez Díaz <i>et al.</i> , 2014. |

| Tipo de medida | Medida específica | Reducción potencial del ruido | Coste | |
|---|---|---|---|--------------------------------|
| Sobre el vehículo | Motores (más silenciosos, eléctricos...) | 2 – 4 dB | Fuera de ámbito | |
| | Neumáticos | Hasta 8 dB | Fuera de ámbito | |
| | Medidas sobre el tráfico | Volumen de tráfico (IMD) | Hasta 3 dB | Según configuración específica |
| | | Velocidad del tráfico | Hasta 2 dB, según situación específica | Según configuración específica |
| | | Composición del tráfico (prohibición) | Hasta 2 dB, según situación específica | Según configuración específica |
| | | Regulación del tráfico | 2 – 5 dB, según situación específica | Según configuración específica |
| Socio-económicas | Restricciones legales (límites de emisión), impuestos, subvenciones... | Según situación específica | Fuera de ámbito | |
| Planificación de las infraestructuras y ordenación del territorio | Modificación de la carretera (nuevo diseño en planta y cubrición total (túnel) o elevación en viaducto) | Según situación específica | Sólo nuevas carreteras | |
| | Normas sobre la ocupación del suelo (alejar edificios de) | Según situación específica | Sólo nuevas construcciones | |
| | Orientación de los edificios | Según situación específica | Sólo nuevas construcciones | |
| | | | | |
| Barreras acústicas | Pantallas | Hasta 25 dB (muy local), en general 5-10 dB | 300-1.600 €/ml (100-400 €/m ²) | |
| | Diques de tierra | Hasta 20 dB. Generalmente 5-10 dB | 30 €/m ² | |
| | Muros de gaviones | Hasta 8 dB | 140-160 €/m ³ | |
| | Vegetales | Hasta 3 dB (espesores 50-100 m) | Según configuración específica | |
| | Mixtas | Según situación específica | Según configuración específica | |
| Pavimentos silenciosos | Bituminoso poroso | 3 – 5 dB | 6-10 €/m ² (48,00 €/tn) | |
| | Bituminoso delgado | 2 – 3 dB | 2-2,50 €/m ² | |
| | Bituminoso modificado o mejorado con caucho | 7 – 9 dB | Hasta 70 €/m ² (52,00 €/tn) | |
| | Bituminoso poroelástico | 5 – 15 dB | En experimentación | |
| | Hormigón poroso | 3 – 5 dB | 2 – 3 €/m ² | |
| | Pavimento eufónico | 5 – 7 dB | 70 €/m ² | |
| Aislamiento de edificios | Aislamiento, doubles fachadas... | 5 – 10 dB (dobles fachadas hasta 20 dB) | 1.700 €/ml casas individuales 3.000 €/ml inmuebles colectivos 650 €/m ² (5 dB(A)) 900 €/m ² (10 dB(A)) 1120 €/m ² (15 dB(A)) | |

Por otro lado, siguiendo la tabla 5.3, a primera vista se observa que existen dos grupos de alternativas que se encuentran fuera del ámbito de resolución de problemas locales de ruido ambiental, puesto que no debe olvidarse que el objetivo planteado es presentar una metodología para la toma de decisiones en la elaboración de los PAR referidos a los ejes viarios, tal y como los define la normativa descrita. Es decir, el problema se refiere a los tramos de carretera que presentan ruido excesivo debido al tráfico rodado, de modo que las soluciones que actúan de forma tan general sobre el tema se encuentran fuera de las posibilidades del mismo. Estas son las basadas tanto en la reducción de las emisiones sonoras de los vehículos, actuando de manera directa sobre ellos, como las medidas estrictamente socioeconómicas que tratan de modificar los hábitos generales de los conductores y usuarios de las carreteras, independientemente de los modelos de gestión del tráfico que sí pueden aplicarse de forma local.

Por otro lado, existe otro grupo de medidas que solo son aplicables a nuevas carreteras o nuevas urbanizaciones junto a ellas. Por otro lado, en caso de tener que plantear una medida antirruído para una carretera de nuevo trazado en una zona donde también existen ya las edificaciones o bien levantar viviendas cerca de una carretera ruidosa existente (hecho que, como se ha visto, no es lo más recomendable desde el punto de vista de una planificación territorial ordenada), existen no obstante criterios para la elección de las diferentes alternativas. Puede citarse un estudio bien clásico [Bergendahl, 1976] que establecía que debía diferenciarse en estos casos entre áreas urbanas con elevado tráfico y gran densidad de población y áreas rurales con menor tráfico y población, de modo que se puede establecer:

- La regla de prioridad inicial es: regulación del tráfico; reemplazo de ventanas (efecto de reducción entre 5 y 10 dB(A)); construcción de barreras (si es posible por la fisonomía de la zona, provee igualmente una mejora del nivel sonoro entre 5 y 10 dB(A)); y expropiación de las casas.
- Cuando una carretera debe construirse en un área urbana, un orden de prioridad apropiado puede ser: regulación del tráfico; reemplazo de ventanas; construcción de barreras acústicas; y deprimir el trazado de la carretera.

- Finalmente, si el caso es la construcción de edificios junto a una carretera existente, la prioridad adecuada puede ser: regulación del tráfico; reemplazo de ventanas; construcción de barreras; e incrementar la distancia entre la carretera y las casas.

Sin embargo, como se ha especificado más arriba, también **el ámbito de los PAR estudiados se centra en las actuaciones sobre problemas existentes**, es decir, de aquellos tramos de carretera que como resultado del análisis de los MER prescritos por la normativa se han detectado valores de niveles sonoros por encima de los objetivos de calidad acústica según el sector del territorio donde se encuentren y presenten afección a la población. Por tanto, medidas que ofrecen criterios, por supuesto muy apropiados, para la planificación de nuevas infraestructuras o edificaciones quedan fuera de las posibilidades de este estudio.

Caso especial representa la eventualidad de que un tramo de carretera conflictivo desde el punto de vista del ruido tenga ya previsto en los programas de inversión en nuevos ejes una variante de población o modificación sustancial de trazado que alterara de forma representativa las condiciones del corredor existente al descargarlo del tráfico principal, mitigando o eliminando así el problema del ruido de la carretera. En estas especiales circunstancias, debería tenerse en cuenta que la aplicación de un gasto en medidas de atenuación de ruido puede no ser lógica o rentable si la puesta en servicio de la nueva carretera se estima a corto plazo, de modo que incluso si fueran precisas actuaciones complementarias en materia de lucha contra el ruido podrían ser tenidas en cuenta dentro del proyecto completo de la nueva infraestructura. Sin embargo, casos como este o parecidos pueden ser muy concretos y limitados, que merecen un estudio aparte e individualizado, por lo que escapan de la metodología general que se está presentando. Por ello, en esta propuesta, dichas posibilidades no son tenidas en cuenta.

Finalmente, como se apuntó antes, es muy distinto actuar en tramos urbanos o interurbanos. De hecho, las acciones que pueden emprenderse en las zonas urbanizadas son muy limitadas, de modo que muchas de ellas son inviables y deben atender más a proyectos integrales de transporte, puesto que la instalación de pantallas acústicas, por ejemplo, pese a su efectividad potencial, presentan problemas de visibilidad y estética,

mientras que los pavimentos fonoabsorbentes, en su caso, no son eficaces en aquellas zonas donde el tráfico es lento, ya que, como se ha descrito, a bajas velocidades el ruido predominante procede de los motores y no tanto de la interacción entre los neumáticos y el firme de la carretera. Pero, por otro lado, las pantallas pueden ser apropiadas para las áreas que son menos sensibles visualmente, mientras que la reducción del límite de velocidad en autopistas puede ser menos adecuada que la construcción de una barrera contra el ruido [Murphy and King, 2010; Torija *et al.*, 2012].

Así, de acuerdo con todo lo anterior, se pueden concretar que existen **cinco grandes grupos de medidas antirruído** que pueden implantarse individual o conjuntamente, como son:

- Las barreras acústicas.
- Los pavimentos silenciosos.
- Las medidas de gestión del tráfico.
- El aislamiento de edificios.
- La modificación del diseño de la carretera.

A partir de estas categorías, se van a preseleccionar aquellas alternativas que serán presentadas como el universo de estudio general de la metodología propuesta.

5.3.2. Preselección de alternativas.

Abundando en los cinco grandes grupos de alternativas presentados en el apartado anterior, se pueden encontrar diferentes tipos o modelos de aplicación de la técnica concreta, como se ha visto anteriormente. De ellos, se van a seleccionar igualmente aquellas que sean de aplicación al objeto de estudio de la presente tesis, bien con criterios de generalidad en esta propuesta de herramienta de ayuda al problema de toma de decisiones planteado, bien con criterios de eficacia de trabajo al descartar aquellas técnicas de escasa o difícil implantación en el ámbito relacionado. Para facilitar la comprensión al

lector y con la intención de utilizar una nomenclatura cómoda a la hora de implantar el análisis multicriterio posterior de la forma más idónea, se han numerado las alternativas según un orden correlativo, diferenciando entre los grupos marcados, que permitan igualmente combinarlas entre sí, cuando sea posible. **Se tratarán, por tanto, las siguientes posibilidades** [Ruiz-Padillo *et al.*, 2014]:

- Alternativa 0. Como todo análisis en materia de infraestructuras, la **alternativa nula** debe estar presente, es decir, la de no ejecutar ninguna acción. En este caso, es posible que en el tramo estudiado no sea necesario emprender ninguna medida porque la normativa no lo exija, como se apuntó en el apartado 4.5, de modo que sea la alternativa seleccionada.
- Alternativa 1. En ella se engloban las soluciones de **barreras acústicas**, de entre las que se consideran dentro del método dos tipos de las más representativas: las **pantallas** (alt. 1.1) y los **diques de tierra** (alt. 1.2), puesto que las soluciones mixtas no son sino combinación de las dos (alt. 1.1 + alt. 1.2). Es decir, en principio se desechan las barreras vegetales por su escasa eficacia y exigencia de espacio, ya que en caso de disponer espacio adecuado siempre serán más lógicos los diques de tierra, sobre los que aplicar un tratamiento de integración paisajístico, con lo que los principales efectos de las barreras vegetales, el psicológico y el medioambiental, estarían cubiertos [Maffei *et al.*, 2013]. En cuanto a los muros de gaviones, no suelen ser una opción muy usual, puesto que en comparación con las otras alternativas no presentan ventajas destacables ni de coste ni de atenuación acústica ni de ocupación de espacio, de modo que su utilidad en materia de reducción de ruido, aunque probada, no es sino añadida sobre su verdadera función de soporte o estabilización de taludes. Por supuesto, los muros de gaviones pueden ser tenidos en cuenta en los proyectos integrales de nuevas infraestructuras o en las actuaciones de reparación y mantenimiento de carreteras si además quieren obtenerse buenos resultados respecto al entorno acústico a bajas alturas respecto de la vía.
- Alternativa 2. Se recogen en ella los denominados **pavimentos silenciosos**, de los que se diferencian, por un lado, los constituidos por material bituminoso y,

por otro los de hormigón compactado. Dentro del primer grupo han sido seleccionados los dos tipos más habituales que se utilizan en Europa y, más concretamente, en España, como son: los de **capa bituminosa drenante** (alt. 2.1) y los de **mezclas mejoradas o modificadas con caucho** (alt. 2.2). A ellos se añade el **hormigón poroso** (alt. 2.3). Por tanto, en el establecimiento de prioridades sobre las soluciones posibles de estas tecnologías se atenderá en esta etapa de planificación a estos tipos generales, dejando para el diseño más específico posterior la elección posible del número de capas y su espesor, que ya debe ser objeto de proyecto de construcción detallado. Aparte, tampoco se contemplan, por el carácter del estudio, los firmes que aún se encuentran en proceso de investigación o experimentación, caso de los firmes bituminosos poroelásticos y los pavimentos eufónicos, ya que no suelen encontrarse de forma comercial en el mercado y sus costes actuales aún dificultan en gran medida su implantación de forma general y que, por tanto, se consideren como una opción viable económicamente.

- Alternativa 3. Se trata de las medidas de **gestión de tráfico** ya estudiadas. Como se ha visto, pueden ser variadas pero fundamentalmente buscan reducir el ruido en su origen (el tráfico) actuando bien sobre el volumen del mismo (IMD) o bien sobre la velocidad de los vehículos, pudiendo a su vez intervenir de forma general o solo sobre los componentes del tráfico más ruidosos, esto es, los vehículos pesados. Por supuesto, existe igualmente la opción de actuar sobre ambas variables, a lo que pueden sumarse otro tipo de políticas de fomento del transporte urbano o de reordenación de la circulación. Con la intención de simplificar la metodología atendiendo al objetivo del análisis multicriterio posterior para la elección de alternativas generales o sus combinaciones, se van a contemplar tres variantes de esta alternativa: la **acción sobre el volumen del tráfico** (alt. 3.1), la **acción sobre la velocidad del tráfico** (alt. 3.2) y la **regulación integral del tráfico** (alt. 3.3). Como se ve, en esta primera elección no se establece diferenciación entre las actuaciones sobre todo el caudal de la circulación o sólo sobre los vehículos pesados, pues el modelo de gestión aplicado debería ser concretado en una fase ulterior y, en su caso, completado con otro tipo de políticas relacionadas. Por otro lado, actuaciones encaminadas

a dejar vías en un único sentido y a su regulación exhaustiva mediante semáforos o itinerarios obligados escapan de las posibilidades de las propias carreteras y se enmarcan mejor en políticas municipales sobre calles o vías exclusivamente urbanas, que no son el ámbito de este estudio.

- Alternativa 4. En esta posibilidad se circunscriben las acciones sobre los propios edificios, centradas fundamentalmente en la **adecuación de ventanas y aislamiento de fachadas** contra el ruido, por ser las más habituales y menos agresivas y costosas, toda vez que esta alternativa recae sobre propiedades privadas en las que ya son los ciudadanos propiamente los que pueden actuar de manera independiente y por propia voluntad o bien incentivados y subvencionados por la Administración (que sería el caso que se contemplaría en esta propuesta de metodología si esta opción fuera escogida). Por supuesto, como fue posible comprobar en los razonamientos de algunos PAR publicados, esta alternativa puede ser planteada desde el punto de vista de una actuación integral de la Administración sobre el problema del ruido, ya que si fuera competencia única del titular de la vía quedaría automáticamente descartada, al no poder fomentar por su propia naturaleza y capacidad una iniciativa de este tipo.
- Alternativa 5. En esta última opción se contempla el **soterramiento de la carretera o la cubrición de la misma** a modo de falso túnel, como representante de las posibilidades más extremas de modificación de la infraestructura para evitar el ruido sobre los ciudadanos cercanos a ella. Como ya se ha visto, se trata de una opción muy costosa y complicada de implantar, sobre todo en ámbitos urbanos o suburbanos, aunque en campo abierto también presenta muchas dificultades de índole medioambiental, funcional y de mantenimiento posterior, aparte del coste de inversión inicial. Sin embargo, en casos de severa contaminación acústica quizá pueda plantearse como la mejor (o única) alternativa, de ahí que se incluya en esta selección para que el método de elección la tenga en cuenta.

En la tabla 5.4 se resumen las alternativas y la nomenclatura adoptada.

5. PROPUESTA DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA ELECCIÓN DE LAS SOLUCIONES IDÓNEAS DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN CARRETERAS

Tabla 5.4: Listado y denominación de alternativas preseleccionadas de la metodología. Fuente: elaboración propia.

| | | | |
|--------|---------------------------|----------|--|
| Alt. 0 | Alternativa nula | | |
| Alt. 1 | Barreras acústicas | Alt. 1.1 | Pantallas acústicas |
| | | Alt. 1.2 | Bermas de tierra |
| Alt. 2 | Pavimentos silenciosos | Alt. 2.1 | Mezclas bituminosas drenantes |
| | | Alt. 2.2 | Mezclas bituminosas mejoradas o modificadas con caucho |
| | | Alt. 2.3 | Hormigón poroso |
| Alt. 3 | Gestión del tráfico | Alt. 3.1 | Acción sobre volumen del tráfico |
| | | Alt. 3.2 | Acción sobre velocidad del tráfico |
| | | Alt. 3.3 | Regulación integral del tráfico |
| Alt. 4 | Aislamiento de fachadas | | |
| Alt. 5 | Cubrición de la carretera | | |

Por supuesto, estas alternativas, en sus diferentes variantes o no, **pueden ser combinadas entre sí**, de modo que para la actuación sobre un caso determinado puede que la opción más viable, por ejemplo, sea la de modificar el firme a capa bituminosa modificada con caucho que reduzca el nivel sonoro de los vehículos que circulan a mayores velocidades, junto con una solución de aislamiento de las viviendas más afectadas por el ruido de fondo (caso de las de menor altura); o bien combinar una medida sobre la velocidad del tráfico que permita reducir las necesidades de atenuación sonora, a la que recurrir con una adecuada pantalla acústica. Se hablaría en estos dos ejemplos de las opciones de «alt. 2.2 + alt. 4» y de «alt. 1.1 + alt. 3.2».

No obstante, por las propias características técnicas de las alternativas preseleccionadas, que poseen determinados condicionantes para su implantación, parece claro que, aun habiendo restringido el conjunto sobre las que plantear la decisión, una vez se analice el caso concreto es posible que algunas más deban quedarse fuera del estudio desde el inicio del proceso, con la intención de ahorrar recursos tanto de tiempo como económicos en el trabajo de redacción del plan.

Para sistematizar estas circunstancias, se han desarrollado varios **diagramas de flujo** que, en función de los posibles valores de algunos de los parámetros estudiados, permiten ir excluyendo algunas alternativas o posibilidades concretas para al final de los mismos dejar claros los elementos que deben ser tratados en la técnica que ayude a tomar la decisión para el problema estudiado. Son presentados en las figuras 5.8 a 5.11, en los cuales se atiende especialmente a la condición de la carretera como tramo urbano, vía urbana o travesía, al tipo del pavimento existente en el tramo, a la velocidad media del tráfico en el mismo, a la existencia de otras medidas antiruido implantadas y a la atenuación necesaria (ΔL) debido al nivel sonoro alcanzado en el entorno de la carretera. En los casos en que los diagramas ofrezcan esta opción, es interesante dejar estas alternativas atrás y no incluirlas en el proceso de elección posterior, ya que así la metodología seguida se simplifica y se hace más eficiente.

Es necesario recordar previamente los condicionantes sobre las carreteras que permiten calificar un determinado tramo como urbano, travesía o vía urbana. Estos proceden de los datos del planeamiento adyacente al tramo de carretera de acuerdo con lo estipulado por la normativa sectorial [Ley 25/88 de España, 1988; Ley 8/2001 de Andalucía, 2001]:

- Tramo urbano: aquel que discorra por suelo clasificado como urbano por el correspondiente instrumento de planeamiento urbanístico vigente.
- Travesía: aquel tramo que cumpla simultáneamente las tres condiciones siguientes: ser parte de un tramo urbano; que existan, al menos en una de sus márgenes, edificaciones consolidadas, como mínimo, en las dos terceras partes de su longitud; y que exista un entramado de calles.
- Vía urbana: aquellos tramos urbanos que no formen parte de la malla continua y, en general, cerrada de la red de carreteras.

Así, en el caso concreto del diagrama reflejado en la figura 5.8, el proceso reflejado atiende a esta determinación, comenzando por si se trata de un tramo urbano:

- Si no lo es, directamente se descartan las alternativas 3.1 y 3.3 de la metodología, es decir, las técnicas de gestión del tráfico sobre la IMD y de

forma integral al no ser viables en tramos interurbanos. Seguidamente, ayudados de los datos de la sección tipo de la carretera, se observa si se trata de una vía de gran capacidad, de modo que si lo es debe abandonarse la posibilidad de emplear también las medidas de gestión del tráfico aplicadas a la velocidad de los vehículos (alt. 3.2). Si no es así, no es posible descartar previamente ninguna alternativa concreta.

- Si se trata con un tramo urbano, se determina si se trata de una vía urbana o no atendiendo a su definición, es decir, que no forme parte de la malla cerrada de carreteras. Si no lo es, se observa adicionalmente si se está ante una vía urbana de gran capacidad, pero en todo caso se pasa a ver si es una travesía, para lo que precisa cumplir con las otras dos condiciones impuestas por la ley, es decir, que existan, al menos en uno de sus márgenes, edificaciones consolidadas, como mínimo, en las dos terceras partes de su longitud y que forme parte de un entramado de calles. Si no se dan todas las condiciones a la vez, no será travesía y, por tanto, no se descarta ninguna alternativa; si lo es, directamente pueden desecharse las alternativas de cubrición total y de barreras acústicas en todas sus clases, puesto que no son viables en travesías, así como las de pavimentos silenciosos, salvo los de capa bituminosa modificada o mejorada, que sí son apropiados para estos tramos en el caso de capas delgadas.

En cuanto al diagrama de la figura 5.9, sencillamente se atiende a si el tramo de estudio posee ya medidas antirruído implantadas, como pavimento silencioso en el firme o aislamiento acústico en las viviendas afectadas, de modo que en estos casos no tiene sentido contemplar la posibilidad de implantar un firme silencioso (alt. 2) o de proponer una insonorización de los edificios (alt. 4).

5. PROPUESTA DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA ELECCIÓN DE LAS SOLUCIONES IDÓNEAS DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN CARRETERAS

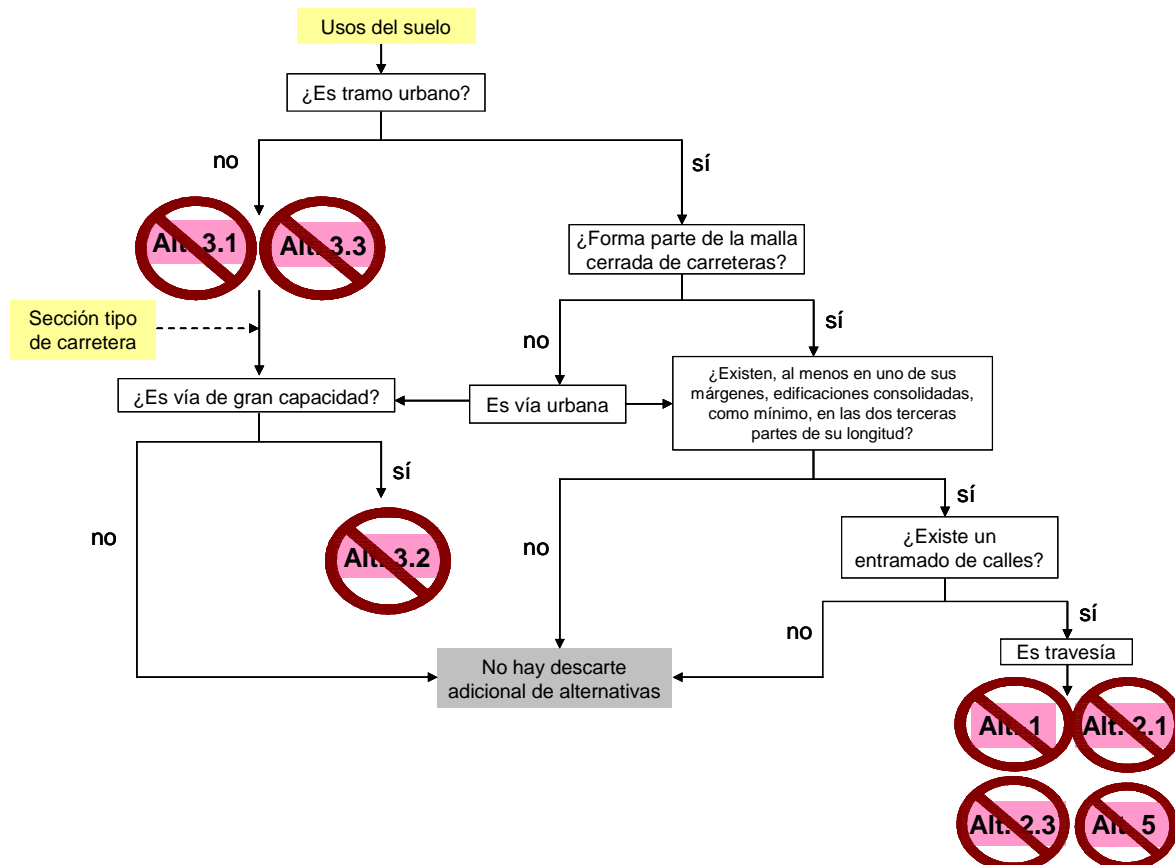


Figura 5.8: Diagrama de flujo de depuración de alternativas según tramos urbanos, vías urbanas o travesías. Fuente: elaboración propia.

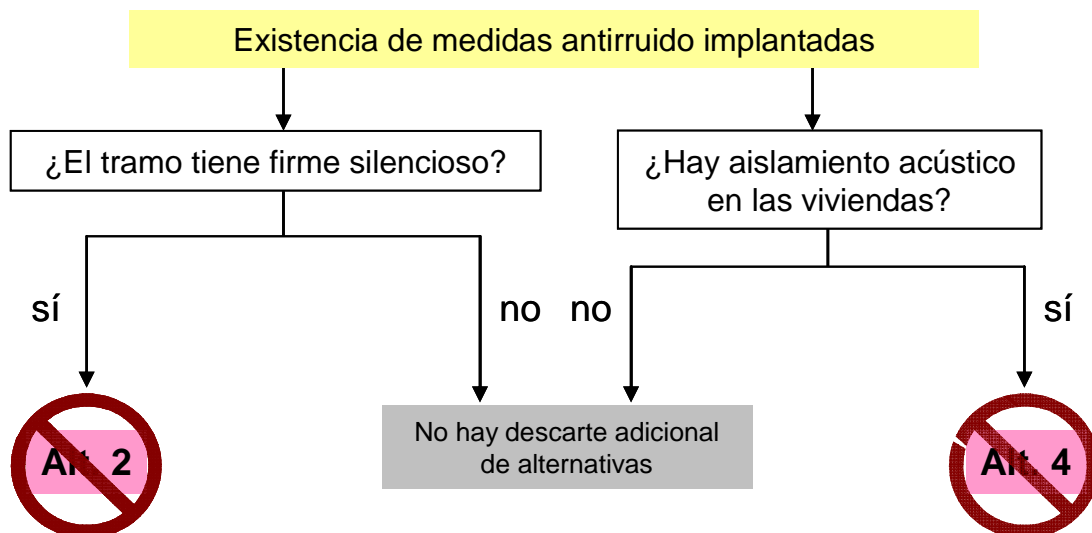


Figura 5.9: Diagrama de flujo de depuración de alternativas según existencia previa de medidas antirruído. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, los diagramas de las figuras 5.10 y 5.11 permiten descartar algunas alternativas en función de determinados valores que presenten dos de las RSPV estudiadas en la primera fase. Así, en el caso del primero de estos diagramas, se elimina la opción de emplear de forma exclusiva (es decir, sin combinación con otras) las alternativas 2 o 3 si la atenuación necesaria debe ser superior a 5 dB(A), ya que estas técnicas por sí solas no son capaces de alcanzar estos valores de reducción de nivel sonoro con total seguridad. De hecho, aunque los pavimentos silenciosos podrían dar resultados de disminución de ruido de entre 6 dB(A) en período diurno y 8 dB(A) en período nocturno, es sabido que con el paso del tiempo su efectividad disminuye, de modo que en caso de atenuaciones necesarias superiores a esos 5 dB(A) merece la pena combinarlas con otras alternativas o directamente primar las demás para garantizar la solución del problema.

En cuanto al segundo diagrama, se refiere al valor de la velocidad media del tramo en cuestión, puesto que si es menor de los 50 km/h, no tiene sentido plantear medidas sobre el firme, puesto que se ha visto que los pavimentos silenciosos no son efectivos a bajas velocidades.

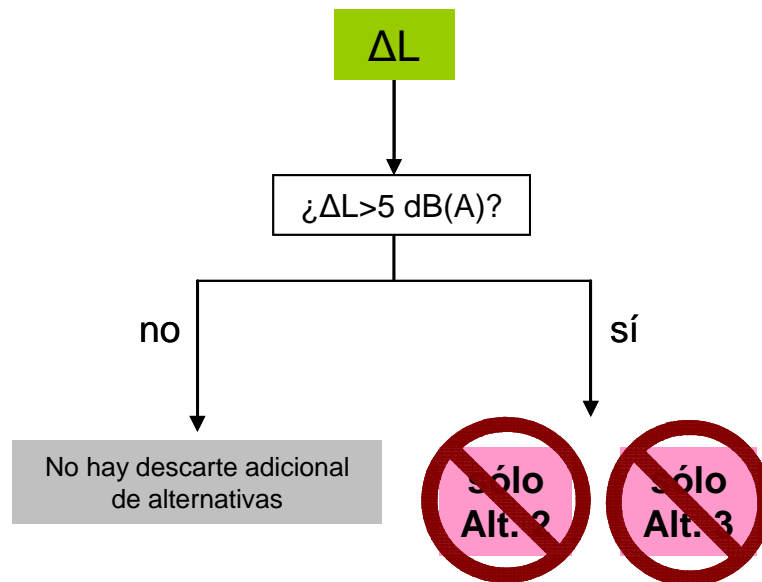


Figura 5.10: Diagrama de flujo de depuración de alternativas según atenuación necesaria. Fuente: elaboración propia.

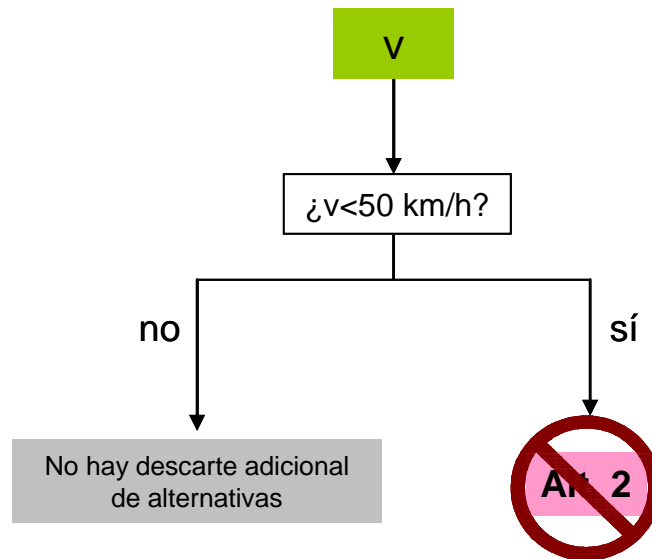


Figura 5.11: Diagrama de flujo de depuración de alternativas según velocidad media del tramo. Fuente: elaboración propia.

5.4. CRITERIOS DE ANÁLISIS.

5.4.1. Identificación de variables influyentes en el análisis.

Una vez que universo de alternativas factibles y eficientes ha quedado definido, se precisa fijar los criterios que van a utilizarse para tomar la decisión sobre la más idónea o el orden de prioridad de implantación más aconsejable. De hecho, se ha visto que en el desarrollo de los PAR las autoridades responsables han de determinar qué medidas específicas de mitigación de ruido deben implantarse desde varios puntos de vista de carácter tanto técnico como económico, para lo que la dificultad estriba en conectar la medida correcta con el problema local de manera adecuada.

Como se hizo en el apartado 4.2.1 para la primera fase de la metodología, para **definir los criterios** que se están buscando es necesario nuevamente atender a la bibliografía especializada y profundizar en las características de las alternativas preseleccionadas. Por un lado, ya fueron descritos con los **parámetros estudiados para la priorización de tramos**, que también influyen en esta fase del problema, pero, por otro, se ha atendido a los **factores y criterios que comúnmente son utilizados en los documentos**

de planificación en materia de carreteras, de los cuales existen infinidad de ejemplos disponibles, puesto que suelen ser trabajos que, además de estar concebidos para plasmar la toma de decisiones estratégicas tan importantes para las Administraciones responsables de las carreteras, sirven como documento de información pública sobre ellas de acuerdo con la legislación sectorial [Loro *et al.*, 2014].

Así, en relación con el primer grupo de factores, se realiza la siguiente discusión:

- Niveles de ruido alcanzados en el tramo y, derivados de ellos, valores de atenuación necesaria, que serán puesto de manifiesto mediante los MER. Sin duda, se trata de un factor fundamental puesto que la efectividad en atenuación de las diferentes medidas antirruído es variada y, por tanto, en caso de tener una alta exigencia de atenuación, algunas de ellas no serán efectivas, como quedó reflejado en la figura 5.10. Se trata, por tanto, más de un criterio limitante o excluyente de determinadas alternativas, puesto que, como tal, es una meta que debe ser alcanzada o, de lo contrario, la elección no es eficiente (y ya se sabe que el universo de alternativas posibles debe ser exhaustivo y factible).
- Datos de tráfico, es decir los extraídos de los planes de aforos: IMD, porcentaje de vehículos pesados y velocidad media. De ellos es posible ver su escasa influencia directa sobre la elección de una u otra alternativa, salvo sobre el nivel de ruido alcanzado, visto justo antes (puesto que, por ejemplo, valores altos de la IMD y porcentaje de pesados implicarán mayores niveles de ruido). En cuanto a la velocidad sí destaca su importancia al respecto de los pavimentos silenciosos, puesto que se ha visto que estos no son efectivos a velocidades bajas, por debajo de los 50 km/h, al ser predominante el ruido del motor, aparte de tratarse de un parámetro bastante sensible para los conductores.
- Valores de población, número de viviendas, superficie y número de centros sensibles expuestos. Parece claro que deba darse mayor prioridad a aquellas alternativas que puedan atender a mayor número de estos parámetros, puesto que su eficacia será mayor cuantos más habitantes, edificios o áreas afectadas por el ruido sean protegidas y/o corregidas respecto de una situación no deseada de contaminación acústica.

- Relacionado con los anteriores están los parámetros que llevan al cálculo de los valores de afección al ruido: características y tipos de las viviendas, usos del suelo adyacentes, datos de densidad de población, etc. Su influencia vuelve a estar englobada en las variables extraídas de los MER o bien afectan al respecto de la facilidad o dificultad que puedan añadir a la implementación de la medida antiruido (por ejemplo, como se vio en los PAR analizados, la existencia de viviendas muy cerca de la carretera o de altura elevada hacen ineficaces las pantallas acústicas o incluso inviables los diques de tierra), así como el coste de la misma, que obviamente, como se verá más adelante, es un criterio capital.
- La existencia de quejas de ciudadanos sobre el ruido no influye en el tipo de medida que deba elegirse, sino solo en la prioridad de actuación, como ya quedó plasmado en el capítulo anterior.
- Sobre las variables meteorológicas, al margen de lo ya expuesto cuando se analizaron para la primera fase de la metodología, cabe añadir la influencia que factores como la falta de lluvias o humedad pueda tener sobre medidas que impliquen tratamientos de restauración paisajística o se apoyen directamente en el efecto de la vegetación contra el ruido (que ya quedó claro que es muy escaso) así como en los mayores costes de mantenimiento y reducida durabilidad de determinados pavimentos silenciosos de tipo drenante para evitar la colmatación de sus huecos en caso de bajos índices de precipitación.

En cuanto a las barreras acústicas está documentada la influencia del viento sobre ellas, puesto que, en ausencia del mismo y ante la decisión de instalar una pantalla acústica o una berma de tierra, se prefiere la pantalla cuando se puede colocar en la misma posición que los pies de la berma en el lado de la fuente. En caso de una posición superior fija tanto para la pantalla como para la berma, una berma con una parte superior plana da similar atenuación sonora como la pantalla. En el caso de la propagación del sonido a favor del viento (es decir, una situación del peor caso), la eficiencia de la pantalla acústica disminuye en gran medida, de modo que un viento fuerte podría llevar a una pérdida casi total de la protección de la pantalla contra el ruido en comparación con la propagación del sonido en un terreno sin obstáculos en ausencia de viento. En contraste, con una berma de ángulo de pendiente decreciente, la refracción

hacia abajo por el viento puede llegar a ser muy pequeña. En el caso de bermas con una pendiente de 1:3 o más pronunciadas, pero con una parte superior plana, el efecto promedio del viento puede ser menor que 1 dB(A) debido a la magnitud limitada de las gradientes verticales en la componente horizontal de la velocidad del viento cerca de obstáculos tan aerodinámicos. Teniendo en cuenta los niveles de ruido equivalentes de períodos largos, incluidos los períodos de viento, también pueden ser una elección acertada bermas acústicas y poco profundas en lugar de pantallas antirruído verticales [Van Renterghem and Botteldooren, 2012].

Otro de los parámetros atmosféricos concretos que puede afectar a las barreras es la nieve, con la que pueden dar problemas de acumulación, así como otros agentes agresivos que pueden mermar su durabilidad o dificultar su conservación. Igualmente la meteorología afecta en ocasiones a los niveles de contaminación atmosférica debido a la polución, de modo que pueden influir a su vez en la conveniencia o no de las pantallas acústicas.

No obstante todo lo anterior, se puede ver que estos factores meteorológicos son parámetros que van a afectar a los costes de implantación o de conservación de la carretera en general o de las medidas seleccionadas en concreto, por lo que su influencia directa a la hora de elegir entre una opción y otra es escasa, salvo que se trate de condiciones muy extremas, que en muchos casos suelen darse en tramos de carretera de escaso tráfico y poca población adyacente, de modo que su afección en términos acústicos es igualmente limitada.

- En relación con las características del tramo de carretera que también fueron descritas en el capítulo 4, destaca nuevamente la existencia de otras medidas antirruído ya implantadas, que puede constituir otro factor excluyente como se vio en la figura 5.9 (que expresa que en caso de contar la carretera con un pavimento silencioso o las viviendas afectadas con aislamiento acústico no tiene sentido plantearse estas medidas dentro de las analizables), o incluso imposibilitando la implantación de otras soluciones (por ejemplo, barreras acústicas si ya cuenta con ellas y se han observado ineficaces o no permiten por espacio físico añadir otras o medidas de gestión del tráfico si ya este se encuentra regulado y no ha resuelto el problema del ruido).

De los datos puramente geométricos de la carretera, aparte de caracterizar la infraestructura para la simulación acústica que da lugar a los MER, la situación entre la carretera y el entorno condiciona de manera importante las posibilidades de establecer una u otra medida antirruído y afecta a los costes de construcción de las diferentes alternativas. Igualmente, la existencia de accesos al tramo en estudio (en el que se engloban enlaces e intersecciones), de un entramado de calles en el mismo o de tráfico peatonal a su través puede hacer inviable la colocación de barreras acústicas, mientras que la presencia de elementos de seguridad, balizamiento y señalización puede en algunos casos favorecer y en otros encarecer la instalación de las barreras, aunque su importancia al nivel de detalle exigido en esta fase de planificación es reducida. Finalmente, ya se vio en el diagrama de la figura 5.8 que la configuración del tramo como vía urbana, de gran capacidad o travesía también excluye como factibles determinadas alternativas, por lo que de nuevo estos criterios son limitantes más que atributos sobre los que decidir una prioridad de elección entre soluciones viables. De igual modo, carreteras de velocidad específica elevada hacen poco viables las medidas de gestión del tráfico, mientras que pueden ser más efectivas en vías urbanas.

- Por último, las variables relacionadas con la ordenación del territorio y planificación viaria afectan de forma similar a la ya estudiada para la priorización de tramos, por lo que de nuevo son factores limitantes de algunas alternativas o incluso de aplicación de esta metodología general que hagan preciso un estudio más específico.

Por otro lado, del segundo grupo de criterios, indicados en los estudios informativos, anteproyectos y estudios de alternativas de proyectos consultados, muchos de los cuales guardan una estructura muy similar, se relacionan los siguientes:

- Criterios del ámbito territorial de la infraestructura: suelen estudiarse criterios como la permeabilidad territorial de la carretera (que el caso presente pueden verse más como los impedimentos que la medida antirruído pueda causar al respecto tras su implantación, como por ejemplo las restricciones de accesos causados por las pantallas o determinadas acciones de regulación integral del

tráfico); parámetros de calidad de diseño de la vía, como son la distancia de visibilidad o la velocidad específica, por lo que es posible medir la afección que puedan tener sobre ellos las diferentes alternativas; factores que afectan a la seguridad vial, reflejados comúnmente en la accidentalidad derivada de la infraestructura y de aquellas obras que se realicen sobre ella; y molestias causadas al ciudadano con la construcción de la carretera o, concretando para el problema que se está analizando, de las alternativas contra el ruido, ya sea sobre los usuarios de la vía como a los que residen junto a ella.

- Criterios de índole económica: dentro de este grupo suelen dividirse entre factores de coste y de beneficio, puesto que es muy común realizar análisis coste/beneficio en este tipo de estudios. Pero ya fueron tratados los inconvenientes que genera la necesidad de transformar a variables monetarias todos los criterios que no son estrictamente económicos o son difícilmente cuantificables. Por tanto, de ellos se resaltan los que caracterizan propiamente el coste de implantación de la alternativa, como son los gastos derivados en concreto de su establecimiento (llamados costes de primera inversión), los que vienen obligados por la necesidad de efectuar expropiaciones o indemnizaciones a terceros, los de conservación y mantenimiento de la infraestructura y los de funcionamiento de la medida creada (a nivel de gestión, gastos de electricidad, agua u otros consumibles, jardinería y tratamiento vegetal, administración y todos sus derivados, etc.). Por otro lado, entre los criterios de beneficio suelen estudiarse como disminución de otros costes que implican el uso de la carretera, como reducción de costes de funcionamiento (vistos como conjunción de la conversión a valores monetarios de accidentes, tiempos de recorrido y gastos en combustibles, lubricantes, neumáticos... de los vehículos), junto a reducción de costes sociales o incremento de valores inmobiliarios en las propiedades adyacentes a la carretera o que son afectadas por ella. Al respecto de estos últimos aspectos, la literatura suele ofrecer un valor de 10-20 € por año y por dB(A) de exceso sobre el límite de exposición que cada persona estaría dispuesta a pagar para reducir el ruido [Nijland *et al.*, 2003; Martín *et al.*, 2006], mientras que la depreciación del valor de las propiedades se ha estimado en un caso concreto en un 0,23% por cada 1 dB(A)

de incremento de contaminación acústica [Brandt and Maennig, 2011]. Finalmente, no hay que olvidar que deben diferenciarse los costes y beneficios anuales durante el período de vigencia del plan de acción, que es de 5 años según la normativa [Ausejo *et al.*, 2011].

- Criterios ambientales, que en el caso de construcciones de obra civil suelen identificarse como valoraciones de impactos de acuerdo con el estudio de prevención ambiental formulado dentro de la planificación de la nueva infraestructura. Sin embargo, para el caso del problema que se está investigando, la normativa ambiental no obliga a la realización de estos estudios al tratarse, por un lado, de obras que no cumplen las exigencias marcadas por la misma y, por otro, de actuaciones concebidas como beneficiosas para el medio ambiente al combatir una afección sobre el mismo como es el ruido. De todas formas, las alternativas implantadas pueden originar, además de sus esperados efectos medioambientales favorables sobre el ruido, también otros tanto positivos como negativos que es posible que lleguen a ser significativos. En general, los estudios de impacto ambiental suelen ser muy variados, pudiendo afectar a muchos niveles del ecosistema, desde la fauna, la flora, el terreno, el aire, las aguas, etc., pero en el caso de las alternativas que se están planteando es posible separar como verdaderamente influyentes las que afecten a la calidad del aire, de la visión a y desde la carretera, de iluminación en la zona y del paisaje. Dichos impactos suelen ser valorados según una escala de afección al medio analizado que engloba las siguientes categorías: positivo, compatible, moderado, severo y crítico. A esta caracterización cualitativa de los impactos se les suele asociar un indicador numérico (del 0 al 5, respectivamente) para después, al estilo de un pequeño análisis multicriterio, añadir una ponderación de los mismos hasta dar una valoración única para el estudio ambiental.
- Y, finalmente, criterios funcionales, que suelen atender al cumplimiento de los objetivos marcados para la infraestructura analizada (normalmente en términos de distancia y tiempo de recorrido en el itinerario marcado, de capacidad, de velocidad específica, de número de personas beneficiadas, etc.). Adaptando esta visión a las alternativas analizadas, resulta muy conveniente vincularla a los objetivos marcados de corrección del problema estudiado, como se dijo antes,

es decir, sobre el número de habitantes, viviendas y centros sensibles al ruido afectados que quedan corregidos mediante una alternativa determinada, así como extensión o superficie que queda protegida del ruido del tráfico de la carretera.

De acuerdo con todo lo anterior, de nuevo son muchos y variados los criterios, al igual que ocurría en el problema de establecimiento de prioridades de actuación por tramos, que afectan a la toma de decisiones para la elección de las alternativas idóneas contra el ruido. Pero, del mismo modo, pueden agruparse en varias categorías de entre las cuales seguidamente se preseleccionarán aquellos que sean más relevantes al respecto. No ha de olvidarse que también la valoración multicriterio de las alternativas debe ser un proceso optimizado y que tampoco merece la pena, desde los puntos de vista técnico y económico, abarcar aquellos criterios cuya influencia en la decisión sea escasa pero, en cambio, su coste de evaluación sea elevado (visto mediante el gasto en tiempo, esfuerzo y cálculo que se le deba dar dentro del estudio, que ya para esta fase de la metodología será muy común que sea externalizado por la propia Administración hacia empresas consultoras especializadas). Además, una profusión de criterios, algunos de ellos difícilmente cuantificables o comprensibles, tampoco resultará útil para la autoridad responsable de las carreteras objeto del PAR que deba sancionar la planificación técnica formulada, ni para los ciudadanos que tienen el derecho de acercarse al mismo y opinar sobre su conveniencia durante su información pública.

Teniendo todo esto en cuenta, se diferencian en primer lugar aquellos criterios que han sido calificado de «limitantes», que toman valores umbral que deben ser alcanzados por las alternativas planteadas y, de lo contrario, resultan excluyentes para ellas. Estas circunstancias ya fueron explicitadas en los diagramas de flujo de depuración de alternativas expuestas en el apartado 5.3.2, a las que se pueden añadir aquellas más infrecuentes debidas a fenómenos meteorológicos especialmente adversos y las que sean evidentes debido a la propia disposición de la carretera en su entorno, parámetros concretos de su construcción o las características del tráfico a las que sirve.

Por tanto, seguidamente el estudio se centra, para su inclusión en el análisis multicriterio que se quiere proponer en la metodología, en aquellos criterios que realmente

constituyan atributos evaluables sobre las alternativas que sean factibles. Sobre ellos se realiza en el siguiente apartado una adecuada preselección y definición de cara a los siguientes pasos dentro del plan de trabajo marcado.

5.4.2. Preselección de criterios.

Una vez se analizó el problema en su totalidad se decidieron qué factores influían de manera más importante en la implantación de una u otra alternativa. A partir de ello, al igual que se hizo con las RSPV, va a realizarse una selección previa y razonada de los criterios que van a contemplarse en la metodología teniendo presente que para la posterior ponderación que será realizada mediante el FAHP se precisará establecer un sistema de jerarquía que debe abarcarlos también. Además, esta jerarquización consigue reducir el número de criterios a evaluar simultáneamente, agrupándose en niveles según su generalidad [Mellinas Fernández, 2012].

Así, en primer lugar, se van a definir unos criterios generales o grupos de atributos que guardan especial relación entre ellos y que a la luz del estado del arte presentado y el estudio realizado sobre los parámetros encontrados sobresalen por su especial relevancia en este problema de toma de decisiones. A continuación, dentro de estos grupos se desglosarán los subcriterios que propiamente permiten al decisor expresar sus preferencias sobre las alternativas. Esta jerarquización se apoyará fundamentalmente en las dimensiones más destacadas que la comunidad ingenieril suele usar dentro de los estudios de planificación y que se han relacionado en el apartado anterior, pero complementados con aquellos que no resultaron limitantes de los observados en la literatura y adaptados al problema que se está abordando en esta parte de la tesis.

De esta manera, los **criterios y subcriterios planteados** quedan como siguen:

- Afección a la infraestructura, es decir, afección generada a la carretera por la medida antirruído implantada, lo cual puede entenderse como los «efectos colaterales» que la misma causa sobre los vehículos y peatones que discurren por ella. Dentro de él se incluyen el criterio de permeabilidad territorial (visto

como afección a la facilidad que tienen los usuarios de acceder a la carretera desde el territorio), de visibilidad de los conductores en la carretera y de velocidad del tráfico por el tramo.

- Coste económico producido por la implantación de la medida antirruído. Incluirá, como se vio, los costes de primera inversión (obra y expropiaciones), los de conservación y mantenimiento y los de funcionamiento (en los que se englobarán como coste anual aquellos gastos derivados de la correcta marcha de la alternativa, que serán de distinta índole según la alternativa evaluada).
- Dimensión social, entendida como el compendio de las consecuencias, adicionales a la propia reducción del ruido, que la medida antirruído tiene sobre la población usuaria de la carretera y del entorno. En él se engloban, por un lado, la afección sobre la seguridad vial del tramo donde se implante la alternativa (variación en la accidentalidad de los vehículos que circulan por él) y sobre los gastos de los vehículos vistos anteriormente, y, por otro lado, la mejora social de los afectados por el ruido (vista como el cambio que la alternativa origina sobre la calidad de vida de estos ciudadanos) y la influencia sobre el valor de las propiedades inmobiliarias adyacentes al tramo de estudio.
- Afección ambiental, en el que los criterios consistirán en la evaluación de aquellos cambios en las condiciones ambientales del entorno de la carretera, adicionales a la reducción del ruido, que genera la medida implantada en la misma. Dichos cambios se centrarán sobre la calidad del aire, la calidad de visión y/o iluminación y la calidad paisajística tanto de la carretera como de su entorno debido a la implantación de la alternativa y serán valorados según el procedimiento habitual de valoración de impactos ambientales ponderados (como si de una parte de un estudio ambiental se tratara).
- Por último, el criterio funcional antes citado, que valorará las mejoras en los indicadores de ruido según normativa del ruido ambiental teniendo en cuenta la meta alcanzada de la atenuación necesaria. Así, se evaluarán los indicadores numéricos que marcan la superficie, viviendas, personas y centros sensibles que según los MER presentaban afección por ruido debido a la carretera y que,

como resultado de una determinada alternativa, pasan a cumplir el objetivo de calidad acústica marcado por la normativa.

Como es sabido, para poder aplicar las técnicas de análisis multicriterio seleccionadas, los criterios deben ser cuantificables y sus valores deben introducirse normalizados en el método. Para ello es necesario definir unos indicadores que permitan evaluar las cuestiones reflejadas por ellos, su condición de aporte al objetivo (ya sea positivamente, por lo que constituirá un criterio de beneficio, o negativamente, dando así un criterio de tipo coste), así como su unidad de medida, lo cual será objeto del siguiente apartado. Del mismo modo, se elegirá una notación para representar los criterios y subcriterios que será utilizada durante la aplicación de las herramientas metodológicas seleccionadas.

5.4.3. Definición de indicadores.

Como se ha apuntado anteriormente, se estudian en este apartado cada uno de los subcriterios para determinar sus indicadores, carácter y dimensión cuantificable. A la vez se aprovechará para ir asignando una notación a todos ellos y sus criterios «padre».

En primer lugar, se analiza el criterio de **afección a la infraestructura («INFR»)**, que como se ha definido mide los efectos negativos que provocan las alternativas contra el ruido en el tramo de carretera en cuestión, por lo que se tratará de un criterio de coste:

- **Permeabilidad territorial («PERM»)**: se considera esta cuestión mediante la variación en la distancia que debe recorrer cada usuario para cruzar o acceder a la carretera, una vez que la medida antirruído haya sido implantada. Deberá evaluarse así la distancia que deben recorrer todos los usuarios de la vía (vehículos o peatones) con y sin la alternativa y calcular la diferencia del conjunto de las mismas en los dos escenarios. Por tanto, el indicador puede verse como la suma de las longitudes de desvío por el número de usuarios, valorado en metros, y debe ser lo menor posible.

- **Visibilidad en carretera («VIS»):** en este caso la magnitud medida es la propia distancia de visibilidad existente en el tramo. Así, el subcriterio atenderá a la disminución en la distancia de visibilidad que poseen los conductores de la carretera entre las situaciones posterior y previa a la implantación de la medida antirruído evaluada, por lo que cuanto menor sea, mejor consecuencia representará la medida para la carretera respecto de este atributo. Se medirá igualmente en metros y tomará como valor el más restrictivo de los que se den en el tramo.
- **Velocidad del tráfico («VEL»):** de manera similar al anterior, este atributo atiende a la variación de la velocidad media que pueden alcanzar los conductores en la carretera, una vez que la medida antirruído sea implantada. Su principal afección vendrá dada en las alternativas de gestión del tráfico, que en el caso de la velocidad buscan su disminución, así que para evitar tratar siempre con valores negativos se tomará en valores absolutos (medidos en km/h, que es la unidad de referencia habitual en relación al tráfico) y, por tanto, cuanto menor sea esta disminución mejor repercutirá en la valoración global de la alternativa respecto de este atributo.

Se sigue el estudio con el **criterio de coste económico («COST»)**. Obviamente, se trata igualmente de un conjunto de subcriterios que deben ser minimizados, todos ellos evaluados en términos monetarios (euros), actualizados a un año de referencia, que suele ser el de puesta en servicio de la obra (al contar con costes que tienen lugar en tiempos diferidos es necesario tener en cuenta la variación en el valor del dinero):

- **Costes de primera inversión («INV»):** incluye los gastos de las obras necesarias para implantar la alternativa, así como el de las expropiaciones.
- **Costes de conservación y mantenimiento («CONS»):** evalúa el importe de las tareas de conservación periódica y rehabilitación necesarias para el correcto funcionamiento de la medida antirruído considerada. En este caso serán gastos anuales.
- **Costes de funcionamiento («FUNC»):** en este atributo se tiene en cuenta el importe de las tareas periódicas de gestión, electricidad, jardinería, etc. precisas

para el correcto funcionamiento de una determinada alternativa. Al igual que el anterior, son gastos anuales.

El tercer criterio es el de los **efectos sociales de las alternativas («SOC»)**, que se verá que incluyen atributos de más diferente carácter, pero que serán asimilados a consecuencias positivas sobre la carretera, de modo que se le dará un carácter de beneficio:

- **Seguridad vial («SEG»)**: para valorar este subcriterio se utilizará el indicador más habitual que los documentos de planificación y proyección de carreteras emplean, el de variación en la accidentalidad en la circulación de los vehículos por la carretera estudiada debido a la medida que se implante. Se evaluará como la variación entre el número de accidentes antes y después de las alternativas respecto de la situación actual, por lo que puede adoptar valores negativos si se disminuyen o positivos si se aumentan. Así, para armonizar el tratamiento de sus valores se realizará una variación de escala para tomar siempre valores negativos (disminución de la accidentalidad) y al considerarlos en valores absolutos el objetivo será maximizarlos también (beneficio).
- **Gastos en vehículos («VEH»)**: se contempla la variación en los costes generados en los vehículos que circulan por la carretera debido a la implantación de la medida antirruído evaluada. Se considerará como el anterior, medido en euros y con carácter de beneficio.
- **Mejora social de los afectados («MOL»)**: como se ha dicho, este subcriterio trata de evaluar el cambio en la calidad de vida de los moradores adyacentes a la carretera gracias al tratamiento de problema del ruido derivado de las alternativas estudiadas. Para ello, se empleará el grado de molestia debido al ruido que fue introducido en el apartado 1.2.2 según la ecuación 1.8. Así, se realizará este cálculo con los valores de L_{den} en las situaciones original y corregida y se obtendrá la diferencia, en valor absoluto de % (puesto que siempre será menor el número tras implantar la medida antirruído), que constituirá el indicador correspondiente. De este modo, también cuanto mayor sea su valor, mejor valorada debe ser la alternativa y es coherente dentro del criterio de beneficio que supone SOC.

- **Valor de las propiedades colindantes («PROP»):** en este caso, se medirá la variación en el valor inmobiliario de las propiedades colindantes a la carretera que produce la implantación de cada alternativa. Como se vio, en principio al corregir el problema del ruido el valor de las propiedades es lógico que suba, pero eso puede no ocurrir en todos los casos, ya que es posible que algunas soluciones, en términos conjuntos, afecten negativamente a determinadas fincas o edificios. Por tanto, se sumarán las diferencias para las propiedades implicadas de sus valores posteriores respecto de los anteriores, por lo que cuanto mayor sea este resultado mejor podrá valorarse la alternativa (beneficio).

Continuando con el **criterio ambiental («AMB»)**, que como se dijo será el resultado de un estudio de los impactos valorados por sus subcriterios, se empleará un único indicador a partir de su agregación, según las ponderaciones que se asignen a los mismos. Se trata, por tanto, de indicadores adimensionales relativos, a partir de las escalas establecidas de impactos ambientales (de 0 a 5), por lo que cuanto menores sean mejor resultado arroja sobre la alternativa (criterio de coste). Los subcriterios son los siguientes:

- **Calidad del aire («AIR»)**, que medirá los cambios en los indicadores correspondientes en el entorno de la carretera debido a la implantación de la medida antirruído elegida.
- **Calidad de visión/iluminación («ILUM»)**, que de manera similar al anterior se centrará en los cambios en las condiciones de visión e iluminación de la carretera y su entorno.
- **Calidad paisajística («PAIS»)**, subcriterio relacionado con los cambios en las características del paisaje existente en el entorno de la carretera como consecuencia de la solución estudiada.

Y se finaliza con el **criterio funcional de corrección del problema («CORR»)**, que medirá variaciones en los indicadores que a continuación se verán entre la situación corregida por la alternativa implantada y la existente (caracterizada mediante los MER), una diferencia que se entenderá también siempre como mejoría al contar aquellos parámetros que pasan de estar en una situación de afección a otra en que cumplen los

objetivos de calidad acústica. Por tanto, se está ante un criterio de tipo beneficio, mejor cuanto mayor sea:

- **Superficie corregida («SUP»)**, es decir la medición del área adyacente según dicho criterio funcional (en km²) por la reducción de nivel sonoro más desfavorable experimentado (dB(A)). Podrá calcularse a partir de los datos de los intervalos que ofrecen los MER, sumando los respectivos indicadores y después calculando la diferencia entre el antes y el después.
- **Número de viviendas corregidas («VIV»)**, calculado de forma similar al anterior teniendo en cuenta la atenuación alcanzada dentro de los intervalos.
- **Número de personas corregidas («PERS»)**, de nuevo valorado como los anteriores.
- **Y número de centros sensibles al ruido corregidos («CS»)**, sumando también la atenuación conseguida en cada uno de ellos.

En la tabla 5.5 se resumen los criterios y subcriterios, con sus respectivos indicadores y el carácter de coste o beneficio que debe tenerse en cuenta a la hora de normalizar sus valores, como ya se vio en el apartado 2.3.2.

5.5. PONDERACIÓN DE CRITERIOS.

5.5.1. Planteamiento del sistema de jerarquía.

Estos apartados correspondientes a la ponderación de los criterios seguirán un desarrollo muy similar a los que se presentaron en los relativos a las variables y subvariables de prioridad de tramo en la primera fase de la metodología (apartado 4.3), por lo que puede ser necesario remitirse al mismo para una mayor comprensión del proceso llevado a cabo.

Aunque en el problema que se aborda en esta fase de la metodología sí se dispone de alternativas, al haber definido unos subcriterios más o menos fácilmente cuantificables,

5. PROPUESTA DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA ELECCIÓN DE LAS SOLUCIONES IDÓNEAS DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN CARRETERAS

de nuevo se utilizará el **FAHP solo para alcanzar la ponderación de los mismos y de los criterios**, ya que así se podrá obtener mayor exactitud en la valoración de las alternativas mediante otros métodos multicriterio en lugar de utilizar la técnica de jerarquías analíticas hasta su último paso. Es decir, se plantea de nuevo una metodología híbrida.

Tabla 5.5: Criterios y subcriterios y sus indicadores y caracteres para la elección de alternativas contra el ruido en carreteras. Fuente: elaboración propia.

| CRITERIOS | | SUBCRITERIOS | | INDICADORES | CARÁCTER |
|-----------|-------------------------------|--------------|--------------------------------------|---|-----------|
| INFR | Afección a la infraestructura | PERM | Permeabilidad territorial | $\Sigma\Delta$ longitud desvío \times n° usuarios (m) | COSTE |
| | | VIS | Visibilidad en carretera | Δ distancia de visibilidad (m) | COSTE |
| | | VEL | Velocidad del tráfico | Δ velocidad (km/h) | COSTE |
| COST | Coste económico | INV | 1ª inversión | Presupuesto obra + expropiaciones (€) | COSTE |
| | | CONS | Conservación / rehabilitación | Gastos conservación y rehabilitación (€/año) | COSTE |
| | | FUNC | Funcionamiento | Gastos gestión, electricidad, jardinería... (€/año) | COSTE |
| SOC | Social | SEG | Seguridad vial | Δ accidentes circulación (%) | BENEFICIO |
| | | VEH | Gastos en vehículos | Δ costes en vehículos (€) | BENEFICIO |
| | | MOL | Mejora social de los afectados | Δ % ciudadanos molestos (relación con L_{den}) | BENEFICIO |
| | | PROP | Valor de las propiedades colindantes | Δ valor propiedades colindantes (€) | BENEFICIO |
| AMB | Ambiental | AIR | Calidad del aire | Valoración de impactos (positivo, compatible, moderado, severo, crítico: 0, 1, 2, 3, 4) | COSTE |
| | | ILUM | Calidad de visión/iluminación | | |
| | | PAIS | Calidad paisajística | | |
| CORR | Funcional | SUP | Superficie corregida | $\Sigma\Delta$ Sup $\times\Delta$ L (km ² \times dB(A)) | BENEFICIO |
| | | VIV | Nº viviendas corregidas | $\Sigma\Delta$ Viv $\times\Delta$ L (dB(A)) | BENEFICIO |
| | | PERS | Nº personas corregidas | $\Sigma\Delta$ Pers $\times\Delta$ L (dB(A)) | BENEFICIO |
| | | CS | Nº centros sensibles corregidos | $\Sigma\Delta$ CS $\times\Delta$ L (dB(A)) | BENEFICIO |

Por tanto, lo primero es establecer el **sistema de jerarquía**, nuevamente de tres niveles, que de acuerdo con lo ya explicado en apartados anteriores queda como se muestra en la figura 5.12:

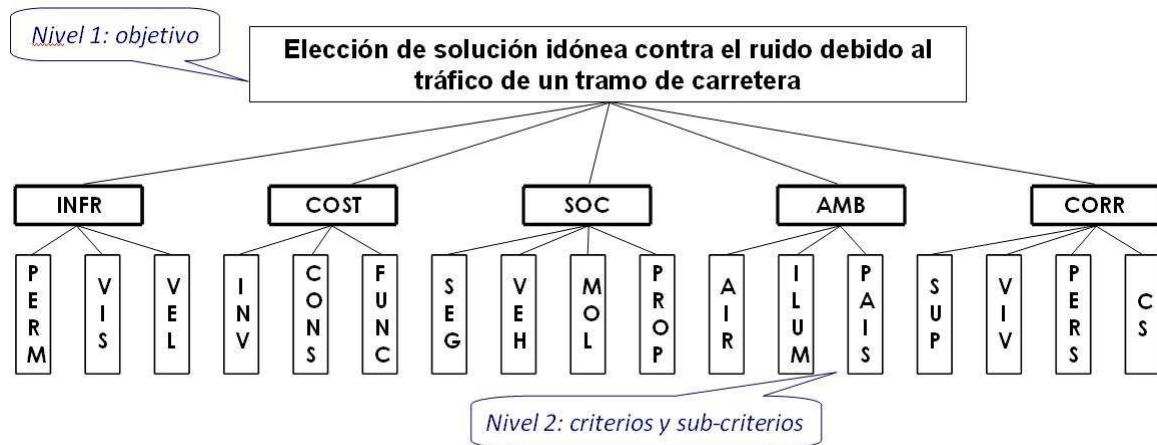


Figura 5.12: Sistema de jerarquía para ponderación de criterios para la elección de alternativas contra el ruido en carreteras. Fuente: elaboración propia.

Así, para el segundo paso del FAHP se formarán por un lado una matriz de criterios de tamaño 5×5 y, para los respectivos grupos de subcriterios, un total de 3 matrices 3×3 y dos de dimensión 4×4 . Al igual que se hizo con las RSPV, se utilizarán los juicios modelizados mediante números difusos triangulares a partir de etiquetas lingüísticas, obtenidos de un panel de expertos, que se describe a continuación.

5.5.2. Panel de expertos y encuestas.

El panel de expertos planteado para esta fase se muy similar al que se vio para la primera. Aparte de las lógicas diferencias en las preguntas, que serán realizadas a los expertos también por la misma modalidad postal por correo electrónico, existen novedades en los **criterios de selección de los expertos y su número**.

Esto es así puesto que el problema de toma de decisiones abordado en esta segunda fase, aun estando dentro de una etapa de planificación estratégica como es un PAR, alcanza un grado de detalle superior a la hora de valorar y elegir las alternativas idóneas para cada tramo que puede equipararse más a unas de tipo de control de la gestión (según lo visto en el apartado 2.2.3), o lo que traducido a las fases relacionadas con los procesos de ingeniería de carreteras, a una etapa de anteproyecto más que de estudio informativo o plan general.

Esta singularidad permite considerar que el trabajo de plantear, valorar y proponer una elección sobre las alternativas no deba ser exclusivo de los más altos niveles técnicos de la Administración competente de la red de carreteras que se esté estudiando, sino que es más lógico pensar que en ello colaborarán otros técnicos de la propia Administración así como ingenieros externos especializados en la materia (normalmente formando parte de empresas consultoras). Por tanto, el universo de alcance de este panel puede ser mucho más amplio que el que se planteó para la primera fase, con lo que es previsible y deseable que el número de cuestionarios empleados sea bastante mayor.

Por tanto, se pueden distinguir **tres grupos principales** entre los expertos que forman parte de este panel:

- Administración: obviamente, el primer foco para la selección de expertos debe centrarse en la propia Administración responsable de elaboración de los PAR, en los tres niveles de competencias sobre carreteras ya conocidos, al que en esta ocasión se sumará la administración local que aunque no posee titularidad de carreteras propiamente dichas, sí tiene vías urbanas sobre las que afrontar problemas de ruido debido al tráfico. Y siguiendo con la filosofía descrita anteriormente, los cuestionarios se harán llegar tanto a los técnicos receptores de las encuestas de la primera fase como a aquellos integrantes de sus departamento a niveles de responsabilidad inferiores (tipo jefes de sección, jefes de área, asesores técnicos o sencillamente ingenieros). El ámbito será fundamentalmente el mismo que en la primera fase, en su mayoría andaluz, aunque se intentará llegar a localizaciones próximas del sur de España, y de nuevo se añadirán representantes de la Consejería con competencias en Medio Ambiente.
- Empresas consultoras de ingeniería: en esta parte de la investigación se contará con colaboración de técnicos especializados en redacción de estudios y proyectos de carreteras, no necesariamente exclusivos respecto al ruido, pero que están familiarizados con la elaboración de documentos constructivos o ambientales de carreteras, de modo que su trabajo podría formar parte de un determinado PAR que fuera externalizado en todo o en parte en esta fase de valoración y decisión de alternativas. El ámbito de estas empresas es variado,

desde las pequeñas consultoras de tipo local o provincial, pasando por las de actuación mayoritariamente regional o nacional, hasta las grandes consultoras con cartera de trabajo internacional, y se intentará abarcar a colaboradores de todos los tipos.

- Finalmente, y también como novedad también en esta fase, se quiere introducir la visión del experto universitario especialista en el tema del ruido, sin ser necesariamente ingeniero relacionado con las carreteras. Con ello se quiere también tener en cuenta el importantísimo papel de la investigación y la innovación en la materia, imprescindible en el ambiente de desarrollo de esta tesis doctoral.

Siguiendo el mismo esquema de presentación del capítulo 4, se explican a continuación los **cuestionarios**, cuyo modelo puede consultarse en el Apéndice 2 de este documento, nuevamente desarrollado en formato de base de datos:

- Una primera hoja similar a la del primer panel, con informaciones parecidas sobre el cuestionario, la discreción en el uso de las respuestas y el proceso de la investigación.
- La segunda hoja presentaba los criterios (denominados aquí grupos de criterios para diferenciarlos de los del siguiente nivel de jerarquía) y solicitaba su ordenación según importancia. Esta ordenación debía ser confirmada en la siguiente hoja.
- Las hojas cuarta a séptima presentaba las comparaciones pareadas de los grupos de criterios sucesivamente desde el más importante al penúltimo respecto de los demás menos importantes, apoyándose en las mismas etiquetas lingüísticas empleadas en la primera fase (igualmente importante, moderadamente más importante, más importante, mucho más importante y extremadamente más importante).
- A partir de la octava hoja se realizaba el mismo proceso con los subcriterios. Así, en primer lugar se pedía una ordenación de los subcriterios y después se realizaban las comparaciones pareadas. Sin embargo, en la hoja de ordenación de subcriterios sí se presentaba, como se hizo en el primer panel de expertos,

una pregunta sobre si el encuestado consideraba importante contemplar algún otro además de los presentados dentro del grupo correspondiente y que fuera importante tener en cuenta en la elección de la alternativa idónea para actuar en un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico. Como en aquella ocasión, había una pregunta cerrada de «sí» o «no», que en caso afirmativo abría la posibilidad de que el experto relacionara aquellos factores que estimara oportunos. Este proceso era igual para todos los subcriterios.

- Para terminar, había una hoja recordatorio de verificación de posibles errores y agradecimiento por la colaboración prestada.

El proceso de envío y recepción de cuestionarios se desarrolló de la misma manera que los anteriores, con la salvedad en este caso de que algunos de ellos no fueron remitidos individualmente, es decir, que algunos correos electrónicos con la encuesta adjunta fueron enviados al técnico de mayor responsabilidad dentro del departamento administrativo o de la empresa solicitándole que la contestara y de igual modo la hiciera llegar a los técnicos dependientes de él para que también colaboraran. Por supuesto, de aquellos técnicos que llegaban encuestas respondidas se solicitaba su nombre, titulación y posición en la empresa o unidad administrativa, con el fin de controlar la idoneidad de los mismos respecto de los criterios de selección de los expertos, aun dentro del anonimato que ya se dijo que se guardaba en todo momento de la investigación.

Debido a lo anterior, no es posible determinar el número de expertos a los cuales llegó el cuestionario, al no haber sido contabilizados individualmente. No obstante, sí se puede especificar el **número total de las respuestas recibidas**, que asciende a 66 (de los cuales uno no fue contestado correctamente y hubo de ser desechado), y también es posible clasificarlos por la entidad de la que proceden. Esta información queda reflejada en la tabla 5.6.

A continuación, en el siguiente apartado, se realiza el tratamiento de los resultados obtenidos mediante el panel de expertos, aplicando el FAHP para alcanzar la ponderación de los criterios y subcriterios.

5. PROPUESTA DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA ELECCIÓN DE LAS SOLUCIONES IDÓNEAS DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN CARRETERAS

Tabla 5.6: Resumen de expertos colaboradores en panel de expertos sobre criterios para la elección de alternativas contra el ruido en carreteras. Fuente: elaboración propia.

| Colectivo de expertos | | Nº de cuestionarios contestados correctamente | |
|-----------------------|----------|---|----|
| Administración | DGI CFV | Servicios centrales | 3 |
| | | Servicios periféricos | 17 |
| | CMAOT | | 1 |
| | DGC MFOM | | 2 |
| | DDPP | | 2 |
| | Local | | 4 |
| Empresas consultoras | | 28 | |
| Universidad | | 8 | |

5.5.3. Agregación de la información recibida.

El proceso seguido en este apartado y los siguientes es nuevamente similar al desarrollado en el capítulo 4, por lo que no se va a repetir la explicación de los pasos seguidos, sino que se irán presentando los resultados obtenidos a partir de los datos del panel de expertos.

Pero antes de eso se procesó la **información adicional suministrada en los cuestionarios**, también como se hizo en el apartado 4.3.4, que en este caso es la posible existencia de nuevos subcriterios a juicio de los expertos. Las respuestas obtenidas a estas preguntas fueron, resumidamente, las siguientes:

- Por un lado, destacaron la incidencia de las alternativas sobre los elementos de señalización vertical, de balizamiento y de defensas, así como sobre el drenaje de la carretera y otras sinergias. Todo ello se debe tener en cuenta dentro de los costes de primera inversión y de mantenimiento, ya que estas posibles afecciones no deben darse negativamente en la carretera, y en el caso en que aparecieran, precisarían de otras actuaciones complementarias que las contrarrestaran. Igualmente, fueron citados los costes debido al rediseño de la medida antiruido, en caso de un funcionamiento incorrecto o insuficiente, o debido a la necesidad de ampliación por un aumento del ruido. Estos hechos responderían a una planificación deficiente, pero se parte de la premisa de que

la misma será realizada de manera conveniente, pues si se dan problemas posteriores de este tipo deberán ser incluidos nuevamente los tramos en la siguiente revisión del plan.

- Otro grupo importante de aspectos reseñados fueron los que afectan a la seguridad de los usuarios de la vía, debido a la pérdida de visión lateral, efecto pantalla o túnel, distracción por pintadas o publicidad, menor distancia lateral a obstáculos, puntos duro de inicio y fin, reflejos, variaciones de anchos de calzada, arcenes o bermas y afección al ruido de los propios usuarios de la vía y a su grado de confort. Como se ve, con estos aspectos importantes los expertos dieron mayor información sobre los elementos que han de tenerse en cuenta en el cálculo del subcriterio de seguridad vial.
- Del criterio social fue reseñada solo la variación que pueda darse en los tiempos de recorrido de los vehículos como consecuencia de las medidas antirruído evaluadas. Este aspecto influye en el subcriterio de los gastos de los vehículos y será ahí donde sea tenido en cuenta.
- Dentro del criterio ambiental, solo fueron señaladas las afecciones que pudieran tener las alternativas sobre la fauna, como consecuencia de un posible efecto barrera o en sus cruces de la carretera, así como la generación o reducción de contaminación lumínica para ser incluida en la valoración del subcriterio de calidad de visión/iluminación. En cuanto al efecto sobre la fauna, en verdad fue un factor que en un primer momento se consideró incluir en la metodología, pero se vio muy dependiente de la solución mediante barreras acústicas, que en caso de darse debería ser resuelta adecuadamente mediante pasos seguros para los animales, de modo que sus correspondientes costes deben formar parte del criterio económico.
- Finalmente, en relación a la corrección funcional del problema, algunos expertos propusieron como otro subcriterio adicional la del ancho de banda corregido. Sin embargo, esto, aparte de ser muy difícil de evaluar ya que no se trata de una información disponible en los MER ni en la metodología de su generación y precisa de instrumentación muy específica para ello, no reviste especial importancia para los ciudadanos y sus actividades. Otros aspectos que

destacaron para tener en cuenta fueron los siguientes: accesibilidad y utilidad del área corregida (si son zonas lúdicas, de paseo, ambientalmente protegidas o el uso que puedan tener), así como considerar los enfermos como habitantes de los centros sanitarios y los alumnos como habitantes de los centros docentes a la hora de contabilizar el número de personas corregidas (se incluirán en el subcriterio de corrección funcional de las personas). En cuanto al uso de la superficie, podría haberse subdividido en un siguiente nivel de jerarquía dentro del subcriterio SUP dependiendo de la utilidad que tuviera, pero la experiencia recabada en la primera fase de la metodología donde la importancia dada a su correspondiente RSPV fue tan pequeña hizo considerar que no merecía la pena establecer esta diferenciación para introducir una ponderación distinta, ya que supondría un esfuerzo poco efectivo finalmente.

Por tanto, teniendo más claro cómo deben evaluarse algunos de los subcriterios gracias a las sugerencias de los expertos, pero a la vista de que no era necesario modificar el conjunto de los subcriterios, se dieron por correctas las encuestas y se pasó a procesar las respuestas recibidas.

Así, en primer lugar, tras convertir las etiquetas lingüísticas de las respuestas a números difusos (con la misma escala definida en la tabla 4.5) y realizar la agregación mediante la media geométrica, se alcanzaron las matrices de criterios y de subcriterios difusas sobre las que a continuación se aplicó el FAHP.

5.5.4. Resultados.

Como se ha comentado en el apartado anterior, del panel de expertos se obtuvieron las **matrices medias de comparaciones de criterios y subcriterios** (paso 2 de la técnica de jerarquías analíticas), que se presentan a continuación:

5. PROPUESTA DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA ELECCIÓN DE LAS SOLUCIONES IDÓNEAS DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN CARRETERAS

| | <i>INFR</i> | <i>COST</i> | <i>SOC</i> | <i>AMB</i> | <i>CORR</i> |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <i>INFR</i> | (1,000, 1,000, 1,000) | (0,671, 0,994, 1,487) | (0,489, 0,726, 1,101) | (0,660, 0,971, 1,398) | (0,407, 0,574, 0,858) |
| <i>COST</i> | (0,673, 1,006, 1,490) | (1,000, 1,000, 1,000) | (0,547, 0,790, 1,175) | (0,691, 1,020, 1,487) | (0,400, 0,574, 0,899) |
| <i>SOC</i> | (0,908, 1,378, 2,044) | (0,851, 1,266, 1,829) | (1,000, 1,000, 1,000) | (1,017, 1,662, 2,532) | (0,509, 0,775, 1,227) |
| <i>AMB</i> | (0,715, 1,030, 1,515) | (0,673, 0,981, 1,446) | (0,395, 0,602, 0,983) | (1,000, 1,000, 1,000) | (0,369, 0,528, 0,816) |
| <i>CORR</i> | (1,166, 1,741, 2,459) | (1,122, 1,743, 2,502) | (0,815, 1,290, 1,965) | (1,225, 1,894, 2,711) | (1,000, 1,000, 1,000) |
| | <i>PERM</i> | <i>VIS</i> | <i>VEL</i> | | |
| <i>PERM</i> | (1,000, 1,000, 1,000) | (0,365, 0,495, 0,709) | (0,848, 1,290, 1,891) | | |
| <i>VIS</i> | (1,410, 2,020, 2,741) | (1,000, 1,000, 1,000) | (1,773, 2,617, 3,529) | | |
| <i>VEL</i> | (0,529, 0,775, 1,179) | (0,283, 0,382, 0,564) | (1,000, 1,000, 1,000) | | |
| | <i>INV</i> | <i>CONS</i> | <i>FUNC</i> | | |
| <i>INV</i> | (1,000, 1,000, 1,000) | (0,760, 1,156, 1,730) | (0,968, 1,472, 2,086) | | |
| <i>CONS</i> | (0,578, 0,865, 1,315) | (1,000, 1,000, 1,000) | (0,780, 1,331, 2,181) | | |
| <i>FUNC</i> | (0,479, 0,680, 1,033) | (0,459, 0,751, 1,283) | (1,000, 1,000, 1,000) | | |
| | <i>SEG</i> | <i>VEH</i> | <i>MOL</i> | <i>PROP</i> | |
| <i>SEG</i> | (1,000, 1,000, 1,000) | (2,631, 3,655, 4,529) | (1,198, 1,816, 2,607) | (2,510, 3,383, 4,040) | |
| <i>VEH</i> | (0,221, 0,274, 0,380) | (1,000, 1,000, 1,000) | (0,265, 0,355, 0,540) | (0,913, 1,443, 2,126) | |
| <i>MOL</i> | (0,384, 0,551, 0,835) | (1,854, 2,813, 3,768) | (1,000, 1,000, 1,000) | (2,348, 3,364, 4,234) | |
| <i>PROP</i> | (0,247, 0,296, 0,398) | (0,470, 0,693, 1,095) | (0,236, 0,297, 0,426) | (1,000, 1,000, 1,000) | |
| | <i>AIR</i> | <i>ILUM</i> | <i>PAIS</i> | | |
| <i>AIR</i> | (1,000, 1,000, 1,000) | (0,457, 0,667, 1,029) | (0,720, 1,115, 1,731) | | |
| <i>ILUM</i> | (0,972, 1,498, 2,186) | (1,000, 1,000, 1,000) | (1,029, 1,563, 2,253) | | |
| <i>PAIS</i> | (0,578, 0,897, 1,389) | (0,444, 0,640, 0,971) | (1,000, 1,000, 1,000) | | |
| | <i>SUP</i> | <i>VIV</i> | <i>PERS</i> | <i>CS</i> | |
| <i>SUP</i> | (1,000, 1,000, 1,000) | (0,353, 0,485, 0,721) | (0,299, 0,402, 0,581) | (0,321, 0,431, 0,618) | |
| <i>VIV</i> | (1,388, 2,061, 2,834) | (1,000, 1,000, 1,000) | (0,378, 0,553, 0,918) | (0,497, 0,746, 1,186) | |
| <i>PERS</i> | (1,721, 2,486, 3,345) | (1,089, 1,808, 2,642) | (1,000, 1,000, 1,000) | (0,772, 1,294, 2,046) | |
| <i>CS</i> | (1,617, 2,318, 3,120) | (0,843, 1,340, 2,012) | (0,489, 0,773, 1,296) | (1,000, 1,000, 1,000) | |

Sobre estas matrices se aplicaron los dos métodos de FAHP descritos con anterioridad y utilizados también en la ponderación de las RSPV. Así, para el caso de los criterios se obtuvieron los dos **vectores de pesos** ya *defuzzificados* (bajo los cuales se destacaron los valores de la razón de consistencia resultantes), a los que se añadió el correspondiente deducido mediante la ponderación de Kendall:

5. PROPUESTA DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA ELECCIÓN DE LAS SOLUCIONES IDÓNEAS DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN CARRETERAS

$$\begin{pmatrix} w_{INFR} \\ w_{COST} \\ w_{SOC} \\ w_{AMB} \\ w_{CORR} \end{pmatrix}_{original} = \begin{pmatrix} 16,21\% \\ 16,74\% \\ 22,86\% \\ 15,69\% \\ 28,51\% \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} w_{INFR} \\ w_{COST} \\ w_{SOC} \\ w_{AMB} \\ w_{CORR} \end{pmatrix}_{extendido} = \begin{pmatrix} 15,79\% \\ 16,51\% \\ 23,83\% \\ 15,84\% \\ 28,53\% \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} w_{INFR} \\ w_{COST} \\ w_{SOC} \\ w_{AMB} \\ w_{CORR} \end{pmatrix}_{Kendall} = \begin{pmatrix} 16,92\% \\ 16,69\% \\ 21,05\% \\ 15,98\% \\ 29,36\% \end{pmatrix}$$

$RC = 0,001$ $RC = 0,001$

Realizado el mismo proceso con las matrices de subcriterios así como con su ordenación relativa, se obtuvieron también los tres vectores de pesos para cada uno de los grupos:

$$\begin{pmatrix} w_{PERM} \\ w_{VIS} \\ w_{VEL} \end{pmatrix}_{original} = \begin{pmatrix} 26,56\% \\ 52,43\% \\ 20,85\% \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} w_{PERM} \\ w_{VIS} \\ w_{VEL} \end{pmatrix}_{extendido} = \begin{pmatrix} 23,35\% \\ 71,25\% \\ 5,40\% \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} w_{PERM} \\ w_{VIS} \\ w_{VEL} \end{pmatrix}_{Kendall} = \begin{pmatrix} 28,96\% \\ 46,77\% \\ 24,26\% \end{pmatrix}$$

$RC = 0,000$ $RC = 0,000$

$$\begin{pmatrix} w_{INV} \\ w_{CONS} \\ w_{FUNC} \end{pmatrix}_{original} = \begin{pmatrix} 39,93\% \\ 35,87\% \\ 27,69\% \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} w_{INV} \\ w_{CONS} \\ w_{FUNC} \end{pmatrix}_{extendido} = \begin{pmatrix} 38,98\% \\ 35,12\% \\ 25,90\% \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} w_{INV} \\ w_{CONS} \\ w_{FUNC} \end{pmatrix}_{Kendall} = \begin{pmatrix} 39,68\% \\ 33,20\% \\ 27,12\% \end{pmatrix}$$

$RC = 0,000$ $RC = 0,000$

$$\begin{pmatrix} w_{SEG} \\ w_{VEH} \\ w_{MOL} \\ w_{PROP} \end{pmatrix}_{original} = \begin{pmatrix} 44,55\% \\ 13,19\% \\ 31,50\% \\ 10,77\% \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} w_{SEG} \\ w_{VEH} \\ w_{MOL} \\ w_{PROP} \end{pmatrix}_{extendido} = \begin{pmatrix} 56,40\% \\ 0,00\% \\ 43,60\% \\ 0,00\% \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} w_{SEG} \\ w_{VEH} \\ w_{MOL} \\ w_{PROP} \end{pmatrix}_{Kendall} = \begin{pmatrix} 36,92\% \\ 15,76\% \\ 30,08\% \\ 14,54\% \end{pmatrix}$$

$RC = 0,033$ $RC = 0,018$

$$\begin{pmatrix} w_{AIR} \\ w_{ILUM} \\ w_{PAIS} \end{pmatrix}_{original} = \begin{pmatrix} 30,60\% \\ 43,75\% \\ 27,99\% \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} w_{AIR} \\ w_{ILUM} \\ w_{PAIS} \end{pmatrix}_{extendido} = \begin{pmatrix} 29,88\% \\ 44,28\% \\ 25,84\% \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} w_{AIR} \\ w_{ILUM} \\ w_{PAIS} \end{pmatrix}_{Kendall} = \begin{pmatrix} 31,17\% \\ 40,96\% \\ 27,87\% \end{pmatrix}$$

$RC = 0,001$ $RC = 0,000$

$$\begin{pmatrix} w_{SUP} \\ w_{VIV} \\ w_{PERS} \\ w_{CS} \end{pmatrix}_{original} = \begin{pmatrix} 12,60\% \\ 22,71\% \\ 35,66\% \\ 29,04\% \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} w_{SUP} \\ w_{VIV} \\ w_{PERS} \\ w_{CS} \end{pmatrix}_{extendido} = \begin{pmatrix} 4,53\% \\ 25,57\% \\ 37,73\% \\ 32,17\% \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} w_{SUP} \\ w_{VIV} \\ w_{PERS} \\ w_{CS} \end{pmatrix}_{Kendall} = \begin{pmatrix} 16,83\% \\ 20,80\% \\ 35,65\% \\ 26,73\% \end{pmatrix}$$

$RC = 0,010$ $RC = 0,005$

5. PROPUESTA DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA ELECCIÓN DE LAS SOLUCIONES IDÓNEAS DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN CARRETERAS

Puede comprobarse que en todos los casos las **consistencias** resultantes son muy buenas, muy por debajo de los límites establecidos del 5 o del 10% (según sean vectores de tres elementos o más), lo cual permite aprobar los datos utilizados a partir del panel de expertos y ofrece fortaleza a las ponderaciones deducidas.

Puesto que en este caso los pesos verdaderamente influyentes son los que derivan de la agregación de acuerdo con la jerarquía hasta llegar al peso total de cada subcriterio, fueron calculados estos con la idea de poder compararlos y decidir cuál conjunto de pesos proponer para su uso dentro de la metodología. Se presentan en la tabla 5.7.

Tabla 5.7: Ponderaciones de subcriterios para la elección de alternativas contra el ruido en carreteras. Fuente: elaboración propia.

| SUBCRITERIOS | | FAHP original | FAHP extendido | Kendall |
|---------------------|---------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------|
| PERM | Permeabilidad territorial | 4,30% | 3,69% | 4,90% |
| VIS | Visibilidad en carretera | 8,50% | 11,25% | 7,92% |
| VEL | Velocidad del tráfico | 3,38% | 0,85% | 4,11% |
| INV | Costes de 1ª inversión | 6,68% | 6,44% | 6,62% |
| CONS | Costes de conservación | 6,00% | 5,80% | 5,54% |
| FUNC | Costes de funcionamiento | 4,64% | 4,27% | 4,53% |
| SEG | Seguridad vial | 10,18% | 13,44% | 8,34% |
| VEH | Gastos en vehículos | 3,02% | 0,00% | 3,32% |
| MOL | Mejora social de afectados | 7,20% | 10,39% | 6,33% |
| PROP | Valor propiedades colindantes | 2,46% | 0,00% | 3,06% |
| AIR | Calidad del aire | 4,80% | 4,58% | 4,98% |
| ILUM | Calidad de visión/iluminación | 6,86% | 6,79% | 6,55% |
| PAIS | Calidad paisajística | 4,39% | 3,96% | 4,45% |
| SUP | Superficie corregida | 3,59% | 1,29% | 4,94% |
| VIV | Nº viviendas corregidas | 6,47% | 7,29% | 6,11% |
| PERS | Nº personas corregidas | 10,16% | 10,76% | 10,47% |
| CS | Nº centros sensibles corregidos | 8,28% | 9,18% | 7,85% |

Puede observarse que como en total son 17 subcriterios los que influyen en el problema de toma de decisiones, las ponderaciones obtenidas quedan muy repartidas entre los mismos, aunque, independientemente del método escogido, el orden de importancia permanece invariable, destacando como los primeros aquellos relacionados con la seguridad de los usuarios de la vía (seguridad vial, visibilidad) y los que más miden la

afección directa del ruido a las personas (mejora social y personas y centros sensibles corregidos). En el lado contrario, se encuentran como los subcriterios menos importantes los siguientes: superficie, velocidad, gastos en vehículos y valor de las propiedades, llamando la atención que según el FAHP extendido los subcriterios VEH y PROP son eliminadas al otorgarles peso nulo, mientras que el de la velocidad del tráfico queda muy cercano a peso cero.

Para decidir cuáles de las ponderaciones halladas se utilizarán para el análisis multicriterio que sigue en la metodología se emplearon como en la primera fase razones de lógica de los resultados obtenidos, que en este caso se ve que las tres series de pesos guardan, al otorgar los mayores pesos a aquellos atributos de mayor importancia y viceversa. Sin embargo, se observa que en el caso del FAHP que utiliza la media geométrica y *defuzzificación* mediante el centroide ofrece unas ponderaciones más igualitarias, es decir, suaviza las diferencias entre los subcriterios hasta el punto de estar cercano el sistema de pesos a uno plano en que el papel de los atributos evaluados queda bastante diluido entre todos a partes muy parecidas. Por el contrario, los pesos que resultan del FAHP mediante el método extendido y la *defuzzificación* mediante medida de probabilidades marcan mayores diferencias entre ellos, potenciando los más importantes frente a los menos influyentes. A esto debe añadirse, por otro lado, el hecho de que estos últimos simplifican la metodología al eliminar dos subcriterios que de las otras maneras quedaban con ponderaciones muy reducidas, aparte de que se trataba de dos de los atributos cuya evaluación resultaba más complicada en la práctica, lo cual, sin duda, daría valores muy poco fiables al nivel de detalle en que en realidad se están analizando los tramos de carretera. Otro de los subcriterios que queda con un peso muy reducido es el de la velocidad, pero su obtención para cada tramo es tan sencillo como tomarlo del correspondiente plan de aforos, por lo que este razonamiento de eficiencia en el trabajo de planificación (que permitirá a los técnicos que desarrollen los PAR optimizar la dedicación que deben darle a su realización) no precisa discutir sobre su eventual eliminación de la metodología, pese a su escasa importancia.

Por todo ello, en este caso se decidió proponer como ponderaciones las obtenidas mediante el análisis extendido de Chang. A las argumentaciones anteriores se puede añadir la comparación que también fue realizada con los valores calculados modificando la escala

5. PROPUESTA DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA ELECCIÓN DE LAS SOLUCIONES IDÓNEAS DE UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN CARRETERAS

de conversión difusa, como se hizo en la primera fase de la metodología, a la de 9 grados de importancia, que igualmente dieron resultados muy similares a los anteriores en términos absolutos y relativos, y eliminando de la misma manera los subcriterios de gastos en vehículos y valor de las propiedades.

Así, en la tabla 5.8 se resume el total de los **pesos de los 5 criterios y de los 15 subcriterios** para su utilización en los métodos de análisis multicriterio de las alternativas propuestos.

Tabla 5.8: Listado y ponderación de subcriterios para la elección de alternativas contra el ruido. Fuente: elaboración propia.

| CRITERIOS | | PESO | SUBCRITERIOS | | PESO RELATIVO | PESO TOTAL |
|-----------|-------------------------------|--------|--------------|---------------------------------|---------------|------------|
| INFR | Afección a la infraestructura | 15,79% | PERM | Permeabilidad territorial | 23,35% | 3,69% |
| | | | VIS | Visibilidad en carretera | 71,25% | 11,25% |
| | | | VEL | Velocidad del tráfico | 5,40% | 0,85% |
| COST | Costes | 16,51% | INV | Costes de 1ª inversión | 38,98% | 6,44% |
| | | | CONS | Costes de conservación | 35,12% | 5,80% |
| | | | FUNC | Costes de funcionamiento | 25,90% | 4,27% |
| SOC | Social | 23,83% | SEG | Seguridad vial | 56,40% | 13,44% |
| | | | MOL | Mejora social de los afectados | 43,60% | 10,39% |
| AMB | Ambiental | 15,34% | AIR | Calidad del aire | 29,88% | 4,58% |
| | | | VIS | Calidad de visión/iluminación | 44,28% | 6,79% |
| | | | ILUM | Calidad paisajística | 25,84% | 3,96% |
| CORR | Corrección funcional | 28,53% | SUP | Superficie corregida | 4,53% | 1,29% |
| | | | VIV | Nº viviendas corregidas | 25,57% | 7,29% |
| | | | PERS | Nº personas corregidas | 37,73% | 10,76% |
| | | | CS | Nº centros sensibles corregidos | 32,17% | 9,18% |

Para terminar, cabe decir que fueron realizados los mismos cálculos descritos anteriormente sobre las matrices de comparaciones difusas medias por grupos de expertos, es decir, para los pertenecientes a la Administración, a las empresas y a la Universidad por separado, y se observó que los resultados no diferían en exceso de los encontrados. De hecho, los criterios social y funcional siempre aparecían como los más importantes, mientras que el ambiental y el de afección a la infraestructura era valorado como los menos importantes también en los tres casos. Sobre los subcriterios, se pueden reseñar las mismas coincidencias, al menos en el orden de importancia resultante de los pesos así obtenidos,

destacando que nuevamente los subcriterios de velocidad, gastos en vehículos, valor de las propiedades y superficie corregida aparecían como muy poco importantes, hasta el punto que del uso del FAHP extendido también eran eliminados en algunas ocasiones. Todo ello da idea de la **robustez y coherencia de los resultados alcanzados**, así como apoya a las decisiones tomadas acerca de los pesos elegidos para la metodología. No obstante, queda claro cómo las técnicas de ponderación son en todos los casos aproximaciones que permiten inferir grados de importancia relativa a partir de juicios de expertos difusos, lo que aumenta el ambiente de incertidumbre en que se mueve la metodología, de ahí que tampoco se espere una exactitud total de los pesos y que la elección realizada queda como propuesta para ayuda a los técnicos decisores que deban afrontar estos problemas a la hora de elaborar los PAR o sus revisiones.

De acuerdo con todo lo anterior, una vez que fueron obtenidas las ponderaciones para los subcriterios implicados en el **análisis multicriterio de las alternativas**, solo resta aplicar los métodos correspondientes, que como se recordará son el de **la suma ponderada, el TOPSIS y el ELECTRE**, por lo que se deberán seguir los pasos descritos en el capítulo 2 para cada uno de ellos.

Este proceso debe ser realizado aplicándose a casos concretos, puesto que un paso fundamental de todos estos métodos es la valoración de las alternativas respecto de todos los criterios definidos para la toma de decisiones, convenientemente normalizados. Por tanto, en el siguiente capítulo se expondrá un caso de estudio donde podrá observarse la aplicación a un tramo de carretera real y, a partir de los resultados calculados para la metodología completa, discutir las conclusiones obtenidas y compararlas entre ellas.

CAPÍTULO 6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA. CASOS DE ESTUDIO.

6.1. PRESENTACIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO.

Una vez que la metodología propuesta en esta tesis ha sido presentada en sus dos fases, cabe realizar una aplicación práctica de la misma para verificar su utilidad e implementación en casos reales. Ello, así mismo, permitirá extraer interesantes conclusiones sobre los resultados obtenidos al respecto y discutir a partir de ellos estrictamente y de su comparación mutua y con la realidad existente.

Por ello, en primer lugar es preciso definir el ámbito de aplicación en que va a ser probada la metodología y exponer las características generales más importantes de cara al problema de toma de decisiones que se planteará sobre él. Con este objetivo se realizará un acercamiento a los tramos sobre los que se empleará la metodología propuesta y al PAR que ya está formulado para ellos, así como los MER que sirven de base imprescindible para la planificación perseguida, como marca la normativa europea y que, como se ha visto, son de importancia capital para las variables y criterios implicados en la decisión.

6.1.1. La Red de Carreteras Autonómicas en Almería.

De acuerdo con lo anterior, en el presente documento de tesis se propone la aplicación práctica de la metodología a las carreteras autonómicas de la provincia de Almería, es decir, aquellas carreteras dependientes de la Junta de Andalucía en esta provincia.

No hay que olvidar que, como se vio en el apartado 1.1.1, una vez culminados los procesos de transferencias de competencias a las Comunidades Autónomas una vez fueron constituidas, las carreteras se encuentran repartidas, desde el punto de vista de la competencia administrativa, en las de titularidad estatal, la autonómica y la provincial. Así, en el caso concreto de Andalucía, la Red de Carreteras de la Comunidad Autónoma pasó a

estar compuesta por aquellas sobre las que ejerce competencia exclusiva y que, en virtud del Estatuto de Autonomía, conforman itinerarios íntegramente en el territorio andaluz y siempre que no tenga la calificación legal de Interés General del Estado [Ley Orgánica 6/1981, 1982; Ley Orgánica 2/2007, 2007]. Específicamente, la **Red de Carreteras de Andalucía** está formada, aparte de aquellos ejes de titularidad estatal que también discurren por la región (englobadas dentro de la Red de Carreteras del Estado), por las carreteras de titularidad de la Comunidad Autónoma de Andalucía (que conforman la Red Autónoma de Carreteras) y por las carreteras que se integran en las redes provinciales (de titularidad de las respectivas Diputaciones Provinciales en sus correspondientes ámbitos territoriales) [Ley 8/2001 de Andalucía, 2001].

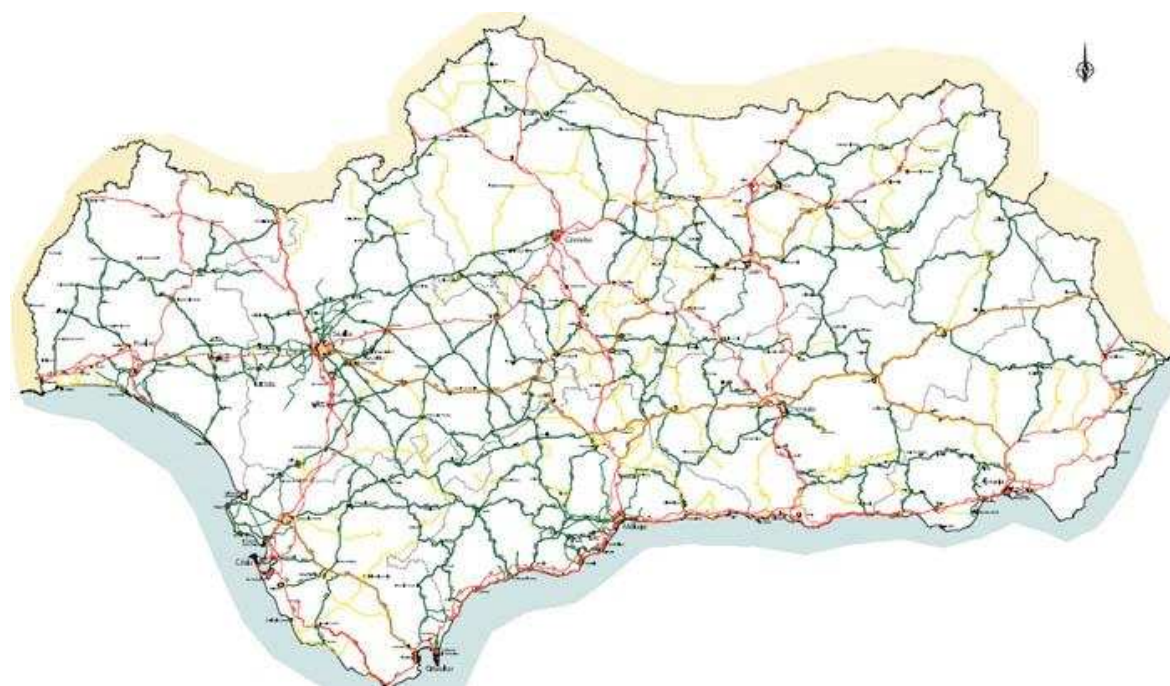


Figura 6.1: Red de Carreteras de Andalucía. Fuente: [CFV, 2014]

Sin embargo, a efectos prácticos, las carreteras autonómicas son aquellas que se encuentran incluidas en el Catálogo de Carreteras de Andalucía dentro de la Red Autónoma [Ley 8/2001 de Andalucía, 2001]. Según él, la longitud de esta red alcanza los 10.407,26 km [CFV, 2014], repartidos según una **clasificación establecida entre Red Básica, Red Intercomarcal y Red Complementaria**, definidas de la siguiente manera [Ley 8/2001 de Andalucía, 2001]:

- La Red Básica constituye, junto con la Red de Carreteras del Estado, la malla viaria soporte de los tráficos de largo y medio recorrido correspondientes a los movimientos generales desarrollados en el territorio. Concretamente su función principal es la de posibilitar una adecuada conexión de los nueve Sistemas de Centros Regionales (áreas metropolitanas de Almería, Bahía de Algeciras, Bahía de Cádiz-Jerez de la Frontera, Córdoba, Granada, Huelva, Jaén, Málaga y Sevilla) entre ellos y con los principales accesos exteriores, así como diversificar las penetraciones a Andalucía desde la red exterior.
- La Red Intercomarcal está constituida por aquellas carreteras que, de manera adicional a la Red Básica, canalizan tráficos interurbanos de medio recorrido entre ámbitos subregionales, posibilitando el acceso de las ciudades medias a la Red Básica, conectarlas entre sí y a los Sistemas de Centros Regionales y, en general, facilitar la conexión entre las principales ciudades de cada provincia, así como proporcionar accesibilidad a las grandes áreas de montaña.
- Finalmente, la Red Complementaria está constituida por aquellas carreteras que conforman el resto de la Red Autonómica, no incluidas en las categorías anteriores, y cuya funcionalidad está relacionada directamente con la movilidad metropolitana (denominada específicamente como Red Complementaria Metropolitana) y con la accesibilidad de las poblaciones y otros puntos estratégicos del territorio al resto de la Red. Dentro de esta categoría se encuadran los ramales de conexión entre otras carreteras o que sirven de acceso a las poblaciones.

A efectos administrativos, en la actualidad le corresponde la gestión de las competencias sobre la Red Autonómica de Carreteras a la Dirección General de Infraestructuras de la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía, que como se ha apuntado anteriormente, organiza sus actuaciones entre unos servicios centrales y unos servicios periféricos (denominados Servicios de Carreteras y ubicados en cada una de las ocho provincias andaluzas) para el desarrollo de sus obligaciones en materia de gestión, planificación, proyección, ejecución de obras, conservación y explotación. Entre ellas, de acuerdo con la normativa presentada en el apartado 1.3, le corresponde la competencia sobre la elaboración de los MER y la formulación del correspondiente PAR

relativos a la Red de Carreteras Autonómica, en sus dos fases previstas y posteriores revisiones.

Precisamente, debido a la propia configuración de la Red y de la organización de dicha Dirección General, como luego se verá, los MER y el PAR se estructuraron de acuerdo a la distribución de carreteras por geografía provincial, con atención separada para aquellos ejes viarios interprovinciales y, debido a sus características singulares y su elevado tráfico, para la red metropolitana. Por esta razón, del estudio del contenido de los documentos publicados al respecto por la Junta de Andalucía, fácilmente puede extraerse la información detallada referente las carreteras autonómicas de cada provincia.

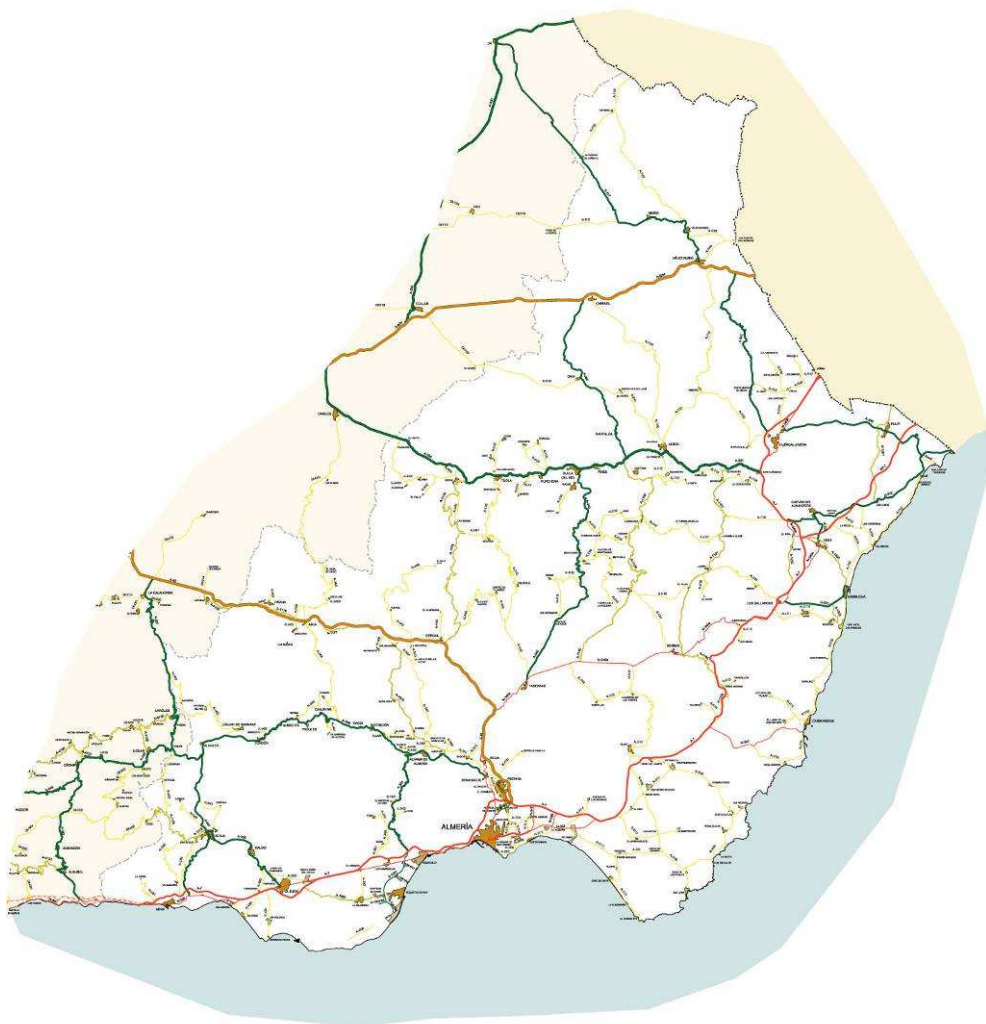


Figura 6.2: Red de Carreteras de la provincia de Almería. Fuente: [CFV, 2014]

Así, en esta investigación se ha seleccionado como caso de estudio de la metodología propuesta el conjunto de carreteras de la **Red Autónoma en la provincia de Almería**, cuya longitud total asciende a 817,65 km, de los cuales 153,58 km corresponden a la Red Básica (solo de tres carreteras: A-92, A-92N y A-334), 351,90 km forman parte de la Red Intercomarcal y, finalmente, 312,17 km suman las pertenecientes a la Red Complementaria (de la cual solo dos carreteras con casi 5,4 km en total pertenecen a la Red Complementaria Metropolitana) [CFV, 2014]. Su elección para aplicación de la metodología obedece especialmente a las especiales características que reúnen los ejes viarios que la componen, que brevemente se citarán a continuación.

Ciertamente la Red Autónoma de Carreteras en Almería es la penúltima de Andalucía en longitud total, solo por encima de Huelva [CFV, 2014], pero en ella es posible encontrar carreteras de muy diversa tipología, desde autovías con muy buenos parámetros de diseño a antiguos trazados con secciones y características muy estrictas, de carreteras de alta montaña a tramos con escaso desnivel a nivel del mar, de ejes más densamente transitados a otros de muy baja intensidad de tráfico... Todas estas singularidades hacen que en la provincia de Almería sea posible localizar ejemplos de tramos de carreteras de muy diferente índole, en los cuales poder realizar un estudio diversificado del estudio metodológico para verificar la amplitud de su aplicabilidad y la validez de los análisis efectuados. A ello se suma la facilidad de acceder físicamente por cercanía geográfica a los tramos implicados, lo cual posibilita obtener los datos necesarios con mayor precisión y fiabilidad, que también redundará en la mayor calidad de la investigación.

De hecho, en general las carreteras de Almería no presentan elevados valores de IMD, salvo en tramos muy concretos [CFV, 2012]. Precisamente, aparte de las grandes autovías y circunvalaciones, suelen ser las redes metropolitanas las que acumulan mayor tráfico, mientras que en el caso almeriense la Red Complementaria Metropolitana es muy reducida (concretamente, la menor de toda Andalucía), a lo que se suman las dimensiones reducidas del área metropolitana de Almería y su densidad de población también inferior a la media de las existentes en Andalucía, por lo que la intensidad de tráfico es también menor [Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Fomento, 2008]. Puede destacarse que la carretera autonómica almeriense con mayor tráfico es un corto tramo de casi 2,4 km

6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA. CASOS DE ESTUDIO

de autovía que constituye la primera fase del acceso desde la Autovía del Mediterráneo (A-7, de titularidad estatal) al municipio de Roquetas de Mar, en el Poniente Almeriense (no en el área metropolitana de Almería, por tanto), denominada A-1051 y que supera los 33.000 veh/día. El siguiente tramo en lo que a IMD se refiere es la otra carretera de la Red Complementaria Metropolitana almeriense, la A-1000, que conecta la citada A-7 y también la autovía A-92 con la antigua N-340, en lo que constituye uno de los principales accesos a la capital y a su área metropolitana, pero que ya solo ronda los 16.000 veh/día (menos de la mitad que la primera). A partir de ahí, solo otros cinco tramos de carreteras superan los 10.000 veh/día, por lo que se comprueba la baja intensidad media de la red tanto en términos absolutos como en relación con las otras provincias andaluzas donde estos datos son mayores. Otras carreteras con intensidades de tráfico superiores pertenecen a la Red Estatal o a la Red Provincial [CFV, 2012].

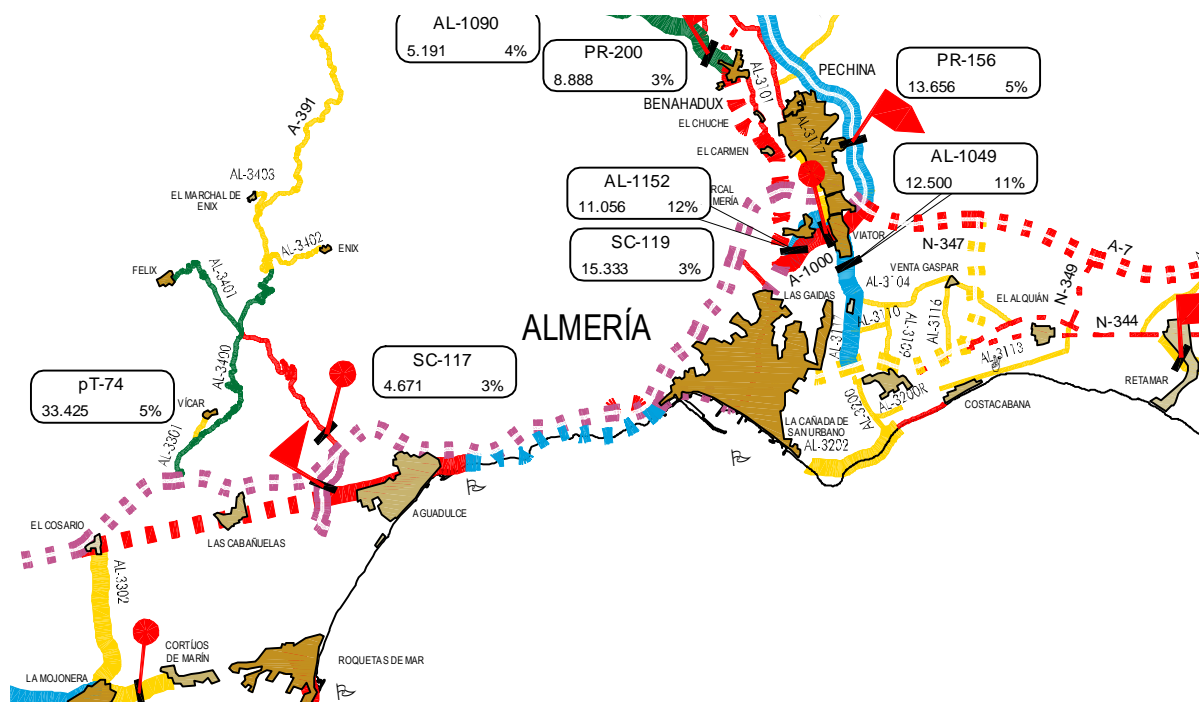


Figura 6.3: Detalle de la Red de Carreteras de la aglomeración urbana de Almería y datos de aforos de las carreteras cercanas. Fuente: [CFV, 2012]

Ello hace que los tramos de carreteras que, de acuerdo con la obligación estricta ofrecida por la normativa, tienen la exigencia de la generación de los MER y, por tanto, la formulación del PAR correspondiente, sean pocos y sumen pocos kilómetros en comparación con otras provincias. Esta circunstancia facilita el objetivo académico de esta

investigación, ya que no se busca alcanzar la planificación total contra el ruido de una Red completa, pero sí la aplicación real de la metodología a un conjunto lógico de tramos que no por ello represente un excesivo trabajo de medición, cálculo y discusión, que no es el verdadero propósito de un caso de estudio.

Esto se concretará en el siguiente apartado, donde se profundizará en los MER publicados por la Junta de Andalucía y se sintetizarán los datos referentes a la provincia de Almería.

6.1.2. Los mapas estratégicos de ruido de la Red de Carreteras Autonómicas en Almería.

Los datos de los MER de la Red de Carreteras de Andalucía se analizarán en sus dos fases, según queda recogido en la Directiva Europea. Recordando la **clasificación de los tramos de carreteras** según los plazos de aplicación de esta normativa (apartado 4.2.1), se detectan, según la IMD del año 2012 (más adelante se explicará por qué se emplean estos datos y no los últimos datos publicados de 2013), los siguientes para Almería [CFV, 2012; CFV, 2014]:

- grupo I (carreteras con $IMD > 16.438$ veh/día): que únicamente comprende la carretera de mayor tráfico de la Red antes mencionada:
 - A-1051, del P.K. 0+000 al 2+350, de Aguadulce (enlace con A-7) a El Parador de las Hortichuelas (fin de tramo e inicio del ramal de conexión A-1051R1).
- grupo II (carreteras con $16.438 \text{ veh/día} \geq IMD > 8.219$ veh/día): en él se integran, además del tramo anterior, los siguientes:
 - A-92, del P.K. 326+650 al 376+000, del límite de provincia con Granada al enlace con la N-340a en Tabernas.
 - A-92N, del P.K. 88+170 al 118+700, de Chirivel (enlace con la A-399) al límite de la Comunidad con la Región de Murcia (inicio de la A-91).

- A-334, del P.K. 56+300 al 70+500, de Olula del Río (enlace con A-349) a Albox (enlace con AL-7102).
- A-348, del P.K. 125+080 al 133+010, de Huéchar (intersección con A-1075) a Benahadux (intersección con N-340a).
- A-349, del P.K. 44+200 al 47+200, de Macael (enlace del polígono industrial) a Olula del Río (enlace con A-334).
- A-352, del P.K. 3+950 al 12+550, de Vera (intersección con antigua A-1200 y antigua N-332) a Garrucha (intersección con A-370).
- A-358, del P.K. 11+390 al 17+900, de Dalías a El Ejido.
- A-370, del P.K. 7+800 al 12+650, de Mojácar (intersección con A-1203) a Garrucha (intersección con A-352).
- A-1000, P.K. 0+000 al 3+000, de Huércal de Almería (intersección con N-340a) a Viator (enlace con A-7), también citada antes.
- A-1050, del P.K. 0+000 al 8+340, de El Ejido (enlace con A-7) a La Mojonera.

Es decir, la carretera incluida en el grupo I tiene solo 2,35 km, mientras que los tramos del grupo II alcanzan en conjunto los 138,66 km.

Sin embargo, si se comprueban los **MER realmente publicados** por la Junta de Andalucía se tiene lo siguiente:

- MER de la primera fase (2007): para el caso de Almería, que se encontraba englobada dentro del conjunto de Andalucía Oriental junto a Granada, Jaén y Málaga, no aparece la carretera A-1051, puesto que precisamente en ese año tuvo lugar su puesta en servicio, por lo que aún no se contaba con datos de tráfico de la misma (aunque sí se previó en un principio estudiar la antigua carretera A-391 a la cual la A-1051 sirve de variante, pero que ya por entonces se encontraba excluida del Catálogo Oficial de Carreteras). No obstante, sí fue analizada la carretera A-1000, ya que en aquel momento su intensidad de tráfico era mayor y superaba el umbral fijado para esta fase (6 millones de vehículos al año) [COPT, 2007].

- MER de la segunda fase (2012). Como ya se comentó en el apartado 1.5.2, la Junta de Andalucía no ha cumplido el plazo marcado por la legislación vigente y no ha publicado aún los MER correspondientes a los ejes viarios de más de tres millones de vehículos al año. De hecho, aún se encuentran en elaboración a partir de datos de tráfico de 2012 y las previsiones es que para mediados de 2015 puedan estar disponibles. Sin embargo, gracias a la colaboración de la Dirección General de Infraestructuras de la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía se ha podido tener acceso a los de la provincia de Almería, ya terminados, para su uso en estos casos de estudio.

Por otro lado, y como luego se profundizará en el siguiente apartado, tampoco se dispone del PAR correspondiente a 2013, al no existir los MER de referencia para el mismo. Además, este PAR debía contar con la revisión del que fue publicado en 2008.

Vistos estos antecedentes, y puesto que la metodología propuesta tiene una base imprescindible en los datos suministrados por los MER de los tramos que deben ser objeto de planificación contra el ruido, se van a tomar como casos reales donde generar la aplicación práctica aquellos relativos a los tramos que comprenderían la **revisión del PAR de 2008 cinco años después**. No obstante, el campo de aplicación se determinará aplicando el diagrama de flujo presentado en la figura 4.2 y que marca el desarrollo de la metodología desarrollada.

Debido a que la segunda fase de los MER (que incluiría la revisión de los relativos las carreteras del grupo I así como los nuevos de las otras del grupo II), que son los que deben ser usados para este caso de estudio, están siendo desarrollados a partir de datos de tráfico de 2012 (no de 2011 como correspondería si no se hubieran retrasado respecto de su fecha obligada por la normativa, ni tampoco los más recientes de 2013, que aún no se encontraban disponibles en el momento de inicio del estudio), se han utilizado anteriormente los datos del **Plan General de Aforos de 2012** para definir los tramos de los grupos I y II, así como para el cálculo de los parámetros de la metodología, y de este modo guardar coherencia en el conjunto de datos empleados.

De esta manera, en el documento hecho público por la Junta de Andalucía y disponible en el Sistema de Información Acústica del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente y su plataforma en Internet (SICAWEB), es posible encontrar los datos de partida utilizados por la empresa encargada de hacer el estudio, a niveles de población y vivienda, usos del suelo y zonificación acústica, cartografía, ordenanzas acústicas de los municipios afectados, meteorología y obtenidos del Plan de Aforos (de 2006 en este caso) [COPT, 2007].

Los **MER presentados** son los siguientes, tanto para los básicos como para los detallados [COPT, 2007]:

- En primer lugar, los mapas de niveles sonoros para toda la longitud de las secciones analizadas y una anchura que incluye al menos la zona correspondiente a los niveles de inmisión $L_{den} > 55$ dB y $L_{noche} > 50$ dB, dando como resultado los siguientes mapas:
 - Mapa de niveles sonoros de L_{den} en dB, a una altura de 4 metros sobre el nivel del suelo, con la representación de líneas isófonas que delimiten los siguientes rangos: 55-59, 60-64, 65-69, 70-74, ≥ 75 .
 - Mapa de niveles sonoros de L_{noche} en dB, a una altura de 4 metros sobre el nivel del suelo, con la representación de líneas isófonas que delimiten los siguientes rangos: 50-54, 55-59, 60-64, 65-69, ≥ 70 .
 - Mapa con los datos de superficies totales (en km²), expuestas a valores de L_{den} superiores a 55, 65 y 75 dB, respectivamente. Se indican además el número total estimado de viviendas (en centenares), y el número total estimado de personas (en centenares) que viven en cada una de esas zonas.
 - Mapa de niveles sonoros de $L_{día}$ en dB, a una altura de 4 metros sobre el nivel del suelo, con la representación de líneas isófonas que delimiten los siguientes rangos: 55-59, 60-64, 65-69, 70-74, ≥ 75 .
 - Mapa de niveles sonoros de L_{tarde} en dB, a una altura de 4 metros sobre el nivel del suelo, con la representación de líneas isófonas que delimiten los siguientes rangos: 50-54, 55-59, 60-64, 65-69, ≥ 70

- Seguidamente, los mapas de exposición al ruido, con estimación a una altura de 4 metros sobre el nivel del suelo y en la fachada más expuesta en la zona correspondiente a los niveles de inmisión $L_{den} \geq 55$ dB y $L_{noche} \geq 50$ dB. Por tanto, la información suministrada corresponde al número total estimado de personas (expresado en centenas) cuya vivienda está expuesta a valores de 55-59, 60-64, 65-69, 70-74 y ≥ 75 para L_{den} y $L_{día}$, y para los intervalos de 50-54, 55-59, 60-64, 65-69 y ≥ 70 en el caso de L_{tarde} y L_{noche} .

La delimitación del área de estudio de los mapas detallados corresponde a zonas urbanas de carácter residencial o con gran presencia de viviendas, y alta densidad de edificación, con distancias entre edificaciones inferiores a 30 metros, así como las zonas sensibles al ruido, es decir, de ámbito docente y hospitalario.

Finalmente, el documento de los MER presenta un estudio de las **zonas de conflicto** para cada tramo analizado en que son rebasados los límites impuestos por la normativa según la zonificación acústica correspondiente. De cada zona de conflicto se presentaban tablas con indicación de carretera, término municipal, uso principal, nivel de exposición, localización de punto kilométrico, longitud y margen de la carretera.

Para el caso de Almería, en la carretera A-1000 fue determinado como tramo conflictivo aquel que como luego se detallará en su caracterización presenta afección del ruido a la población, que está comprendido entre los PP.KK. 0+350 al 0+800, donde además se localizó un centro sensible al ruido, en este caso un colegio [COPT, 2008(a)].

Además, ha de mencionarse que, en cumplimiento de la legislación, tras haber sido aprobados provisionalmente los MER de los más de 600 km de carreteras autonómicas de Andalucía que fueron generados, se sometieron a información pública durante el período de 1 mes, como fue dispuesto en la Resolución de 21 de diciembre de 2007, de la entonces Dirección General de Carreteras, publicada en el BOJA núm. 13 de 18 de enero 2008. Cabe destacar que durante el periodo de información pública no se recibió ninguna alegación y, tras ello, la documentación que era necesario remitir al Ministerio competente en Medio Ambiente para su envío a las autoridades europeas, fue canalizada a través de la Consejería correspondiente [COPT, 2008(a)].

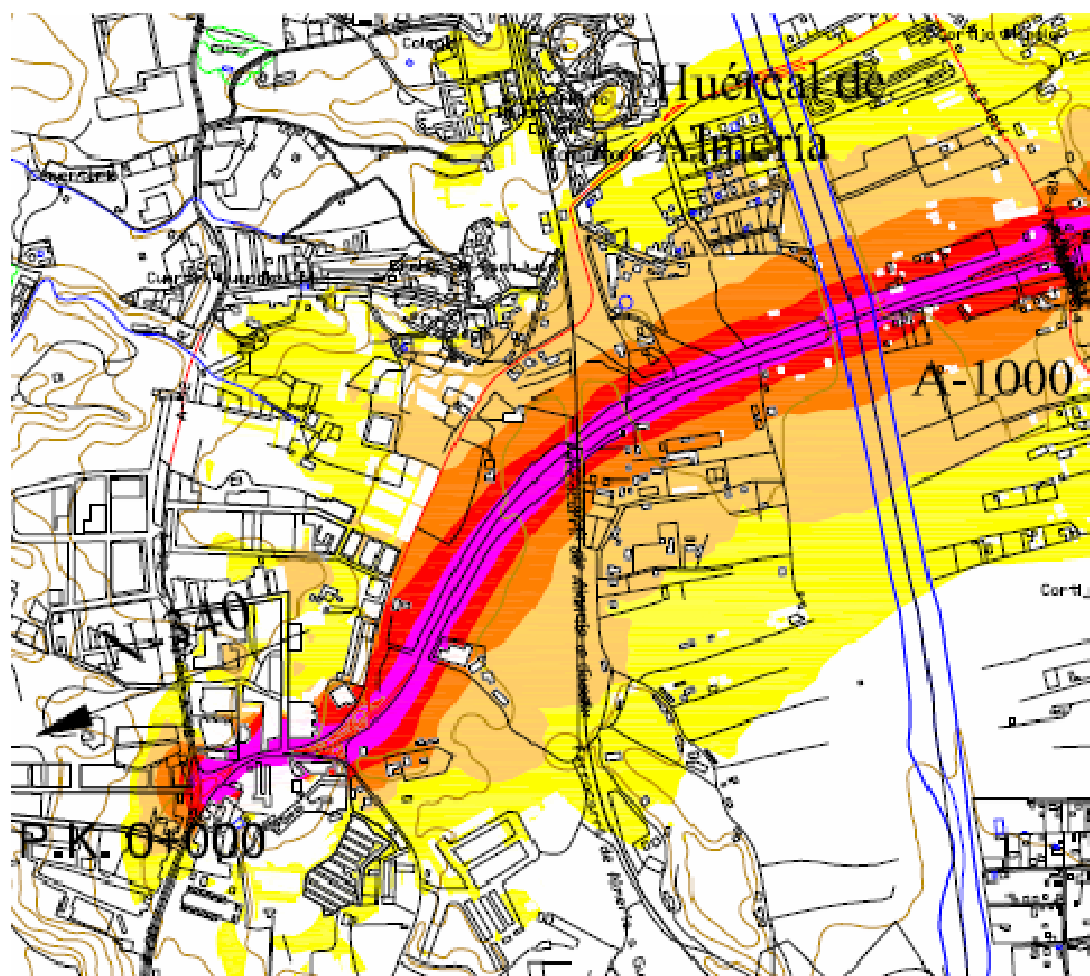


Figura 6.4: Detalle del mapa de L_{den} de la carretera A-1000 obtenido en los MER de la primera fase de aplicación de la Directiva. Fuente: [COPT, 2007].

6.1.3. El Plan de Acción contra el Ruido de la Red de Carreteras Autonómicas en Almería.

Como ya se ha dicho, la Junta de Andalucía solo cuenta en estos momentos con el PAR relativo a la primera fase de generación de los MER, que fue publicado en 2008. Obviamente, se apoyaba en los datos resultantes de dichos MER y su ámbito de actuación fueron las zonas de conflicto detectadas en los tramos donde fue realizada la simulación acústica.

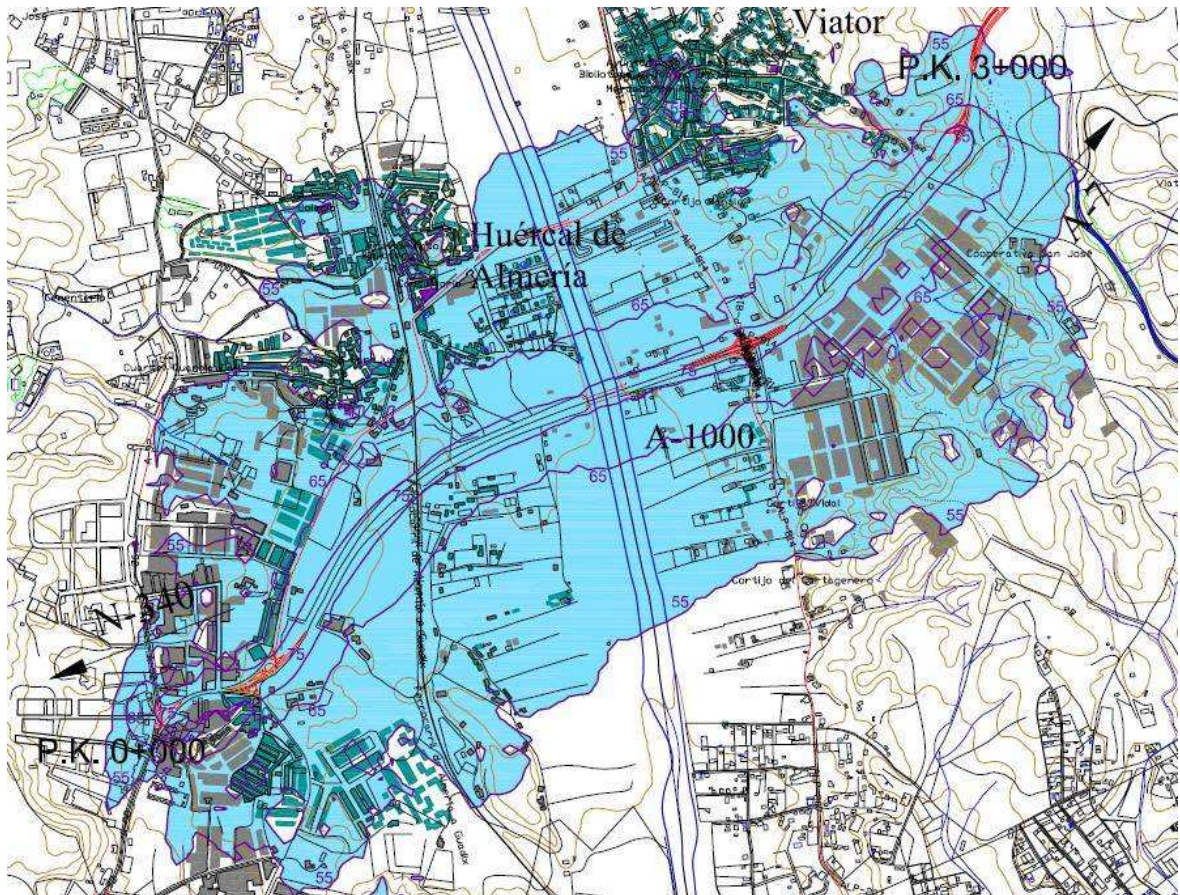


Figura 6.5: Detalle del mapa de afectación acústica de la carretera A-1000 obtenido en los MER de la primera fase de aplicación de la Directiva. Fuente: [COPT, 2007].

Además, como indica el propio documento del PAR, este tenía como fin principal la disminución de la población expuesta a los niveles actuales de ruido y paralelamente la disminución de estos niveles, estableciendo los distintos tipos de actuaciones, su jerarquización y programación temporal [COPT, 2008(a)].

De este modo, para el caso de Almería, solo fue planificada **la carretera A-1000 en su tramo comprendido entre el P.K. 0+350 al P.K. 0+800**, donde el uso principal era el residencial, además de la existencia de un espacio de uso docente, concretamente el Colegio Buenavista de Huércal de Almería. Por tanto, se trata de un tramo de 450 metros de longitud.

Entre las soluciones tratadas en el Plan, directamente fue excluida la posibilidad de plantear actuaciones de aislamiento de fachadas y cualquier otra que excediera el ámbito de actuación de la entonces Dirección General de Carreteras (hoy de Infraestructuras), es

decir, más allá de la zona de dominio público y de las implicaciones derivadas de las servidumbres y exigencias de la legislación de carreteras. Además, en aquellos casos en que se diera confluencia de varias fuentes de ruido también se dejaban fuera del estudio al indicarlos para su inclusión en los correspondientes planes zonales propuestos por las Administraciones Locales [COPT, 2008(a)].

Por tanto, las alternativas utilizadas fueron tan solo los pavimentos fonoabsorbentes y las barreras antirruído. No obstante, casi la totalidad de las actuaciones planificadas correspondieron a pantallas acústicas, mientras que cuando esta solución técnica no era suficiente debido a las características de los tramos en estudio, estos eran englobados dentro de las denominadas «actuaciones complejas», que también se remitían a los planes zonales específicos, que contemplaran estudios concretos sobre las fuentes de ruidos, la organización urbanística, los planes generales de ordenación urbana, las áreas de sensibilidad acústica, etc. En estas «actuaciones complejas» se incluían también los tramos que afectaban a territorios declarados espacio natural.

Así, no fue tenido en cuenta ningún **criterio real para la decisión de las alternativas** contra el ruido y, para el tramo conflictivo de la A-1000 que se estudia, fue planificada una pantalla acústica que abarcaba los 450 m identificados anteriormente. Su presupuesto fue estimado en 550.000 € [COPT, 2008(a)].

En cuanto a la planificación temporal o **priorización de actuaciones**, el PAR establecía 3 fases, descritas de la siguiente forma [COPT, 2008(a)]:

- fase 0: aquellas que ya estaban en ejecución en la red metropolitana de Sevilla.
- fase 1: las calificadas de «urgentes».
- fase 2: el resto de actuaciones incluidas en el PAR.

Para alcanzar esta priorización no fue expuesto ningún criterio ni ningún parámetro analizado que la fundamentara. De hecho, al observar el listado de actuaciones de cada fase, aparte de las que ya estaban ejecutándose en ese momento, resulta evidente que en la fase 1 se incluyó sencillamente una de cada provincia, dejando el resto para la fase 2.

De este modo, como en la provincia de Almería solo existía una actuación dentro del PAR, tuvo la «suerte» de ser contemplada como urgente y quedó englobada en la fase 1. Sin embargo, cabe decir que, a día de hoy, dicha pantalla no ha sido instalada y aún no existe previsión concreta de llevar a cabo esta obra ante la falta de presupuesto real consignado al efecto.

Por su parte, no se tiene constancia, más allá del posible uso que puedan hacer de las recomendaciones formuladas por el Ministerio de Fomento en el documento ya analizado de «Criterios y condiciones técnicas para la elaboración de los mapas estratégicos de ruido de las carreteras de la Red del Estado 2ª fase 2012», de ningún criterio para la elaboración del PAR de la Red de Carreteras de Andalucía que debía haberse aprobado en 2013 y que presumiblemente será desarrollado una vez sean completados los MER de la segunda fase.

Por consiguiente, parece claro, una vez más, que la necesidad de la metodología propuesta en esta tesis es imperiosa, así como la utilidad de las propuestas formuladas como resultado de la investigación realizada. De este modo, se va a aplicar comenzando por la definición del ámbito de estudio.

6.1.4. Definición del campo de aplicación.

Como se vio en el capítulo 4, para la aplicación de la metodología en su conjunto pero más concretamente para la primera fase correspondiente a la ordenación por prioridad de los tramos objeto de un PAR, resulta muy útil seguir el **diagrama de flujo** de la figura 4.2, el cual permitirá a la vez determinar los tramos sobre los que debe centrarse el estudio así como obtener los valores de las RSPV que luego darán como resultado el RSPI.

Queda claro que el conjunto de carreteras utilizado como universo de actuación será la Red de Carreteras Autonómicas de la provincia de Almería, y el objetivo será la formulación de la revisión del PAR resultante de la primera fase de los MER cinco años después de su planificación inicial. Es decir, la planificación buscada se debería centrar en

analizar como punto de partida las carreteras del grupo I, pero con la información actualizada a 2013, basándose sobre todo en los datos del Plan de Aforos de 2012 y los MER que están en proceso de terminación para la segunda fase y a los que se tuvo la oportunidad de acceder para los tramos concretos de Almería, ya elaborados.

Así, los **tramos de estudio para la primera fase de la metodología** son los siguientes [CFV, 2012; CFV, 2014]:

- A-1000, del P.K. 0+000 al 3+000, puesto que, aunque su IMD es de 15.767 veh/día (estación SC-119 situada en el P.K. 2+190, donde los vehículos pesados representan el 3% del tráfico), ligeramente inferior al umbral marcado por la normativa, se entiende que debe ser contemplada para poder establecer comparaciones con lo publicado en el PAR de 2008. De hecho, cabe destacar que el límite establecido en la normativa obedece a criterios orientativos y, por ejemplo, en la generación de los MER de la segunda fase en las carreteras de autonómicas de Andalucía el umbral de tráfico se ha fijado en los 7.500 veh/día en lugar de los 8.219 veh/día que se corresponden estrictamente con los tres millones de vehículos al año.
- A-1051, del P.K. 0+000 al 2+350, puesto que su dato de IMD de 33.611 veh/día (estación de aforo pT-74 ubicada en el P.K. 0+100) supera con creces el umbral dispuesto de los 6 millones de vehículos al año. El porcentaje de pesados es del 5%.
- A-1051R1, del P.K. 0+000 al 0+350, ramal de la A-1051 hasta la antigua A-391. Este tramo, aunque no tiene datos directos de aforos, se considera actualmente como una continuación de la A-1051, ya que esta se encuentra inacabada hasta el punto de inicio de este ramal. Por esta razón, se tratará como un único tramo junto a la propia A-1051.
- A-1201, del P.K. 12+500 al 15+000, tramo comprendido entre las intersecciones con la A-350 y la antigua A-1201R (acceso norte a Pulpí), en el Levante Almeriense, que aunque presente una baja IMD (de 4.116 veh/día y 6% de pesados en la estación que caracteriza este tramo, la AL-1017, situada en el P.K. 16+700), tiene registradas quejas respecto al ruido en las viviendas

6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA. CASOS DE ESTUDIO

colindantes debido al tráfico de la carretera en esa zona, por lo que, de acuerdo con el diagrama de flujo de la figura 4.2, entraría dentro de los tramos analizados por la metodología.

Por tanto, son tres los tramos sobre los que se haría la simulación acústica de los MER y de los que, siguiendo el diagrama citado, se buscarían los datos necesarios para definir los valores de las RSPV que permitirá alcanzar el valor resultante del RSPI para cada uno de ellos. Tras la ordenación, la metodología procedería al análisis multicriterio de las alternativas tramo a tramo.

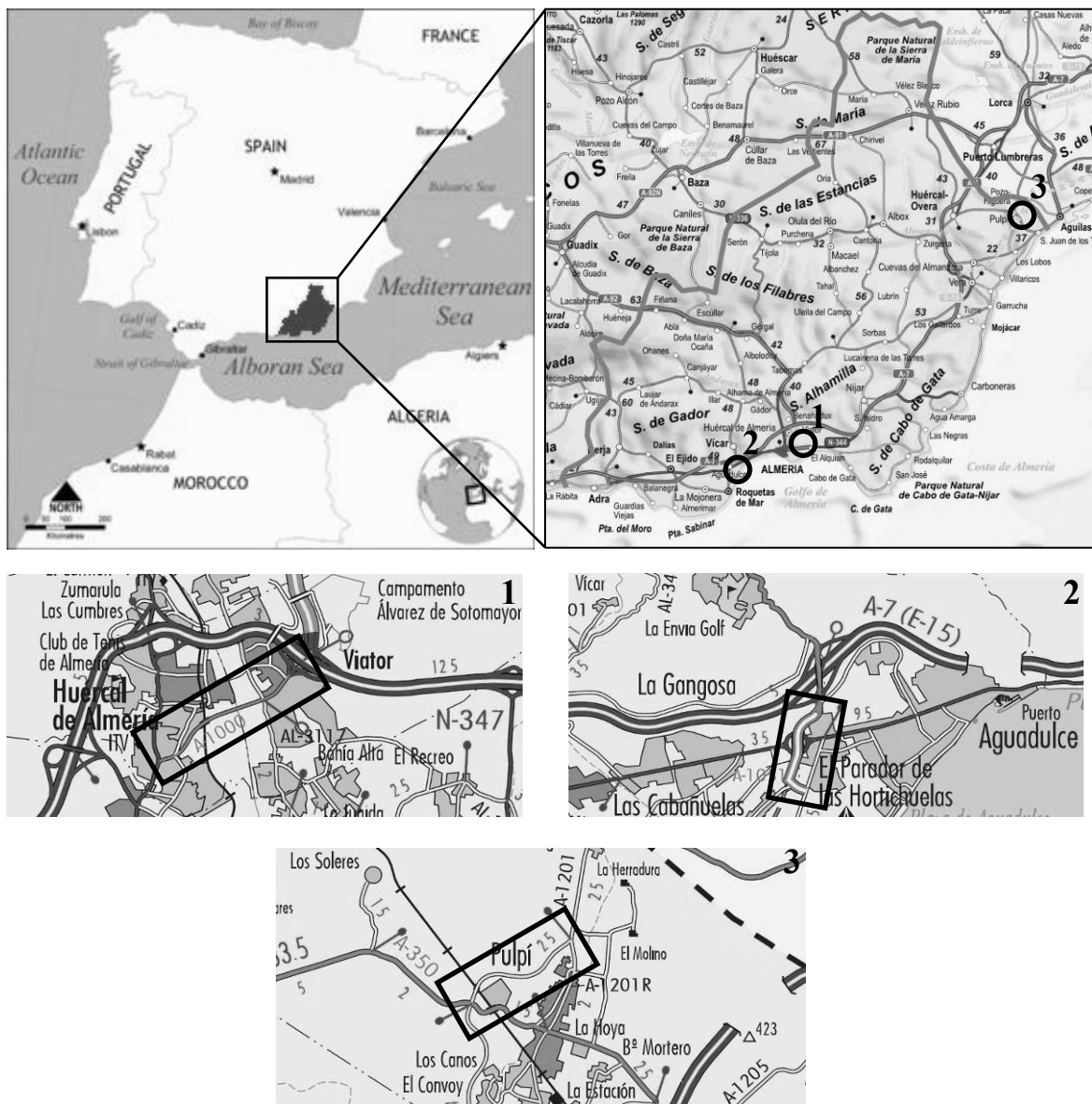


Figura 6.6: Localización de los tramos de carreteras analizados. Fuente: [Ruiz-Padillo et al., 2014].

Antes de ello, se van a describir brevemente los tramos escogidos.

En primer lugar, en **la A-1000**, por la propia geometría del tramo analizado, se pueden distinguir seis subtramos, con las siguientes características [CFV, 2012]:

1. P.K. 0+000 al P.K. 0+150, que abarca desde el inicio del tramo en la intersección con la antigua carretera N-340 hasta una glorieta (llamada de «La Fuensanta») en la intersección con la carretera A-1001, travesía de Huércal de Almería. Se trata de un tramo que discurre por suelo urbano de Huércal de Almería (aunque las edificaciones son de uso industrial/comercial a ambos lados de la carretera, por lo que no existe afección a viviendas) y con numerosos accesos (figuras 6.7 y 6.8). La velocidad media del tramo es de 27 km/h.



Figura 6.7: Vista del inicio del primer subtramo de la carretera A-1000. Fuente: elaboración propia.

La sección tipo correspondiente a este tramo es la siguiente:

- Calzada única compuesta por tres carriles, dos en sentido Viator y uno en sentido Almería.

- Ancho del carril: 3,5 m.
- Ancho del arcén: variable, debido a la existencia de explanadas pavimentadas junto a la carretera que se confunden con él.
- Ancho de la mediana: variable, siendo de unos 8 m en su parte más ancha y en ocasiones solo un cebreado de unos dos metros de anchura.
- Pavimento bituminoso.



Figura 6.8: Vista del final del primer subtramo de la carretera A-1000. Fuente: elaboración propia.

2. P.K. 0+150 al P.K.0+350: en esta parte se encuentra la glorieta de La Fuensanta citada anteriormente, de forma pseudo-elíptica y de calzada anular con dos carriles. En ella intersectan tanto la citada carretera A-1001 como un vial municipal denominado «carretera de Torrecárdenas» (figura 6.9).

3. P.K. 0+350 al P.K. 1+100: este tramo discurre desde la salida de la glorieta de La Fuensanta hasta el viaducto situado sobre la línea de ferrocarril Linares – Almería. La traza de la carretera dibuja una curva suave hacia la derecha y va subiendo paulatinamente de

cota según el avance de los P.K., discurriendo en terraplén con vías de servicio a ambos lados, de modo que no existen accesos al tronco, y separándose paulatinamente en planta y alzado de la A-1001 (figuras 6.10 y 6.11). La velocidad media del tramo alcanza los 55 km/h.



Figura 6.9: Vista de la glorieta de «La Fuensanta» en la carretera A-1000. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a los usos del suelo, una vez se deja atrás en el tramo anterior la zona industrial/comercial, predomina en ambas márgenes de la carretera el agropecuario, aunque también al otro lado de la travesía de la A-1001 hay suelo residencial en el que se incluye suelo docente, sanitario y deportivo/recreativo. De hecho, esta zona cuenta con cuatro colegios en sus inmediaciones, todos ellos de Huércal de Almería (Buenavista, Santa Isabel, Cruz Blanca y Bajo Andarax), así como el Centro de Salud de Huércal de Almería.

Su sección tipo es la siguiente:

- Calzada única compuesta por dos carriles, uno por sentido de circulación.
- Ancho del carril: 3,5 m.

- Ancho del arcén: 1,5 m.
- Pavimento bituminoso.



Figura 6.10: Vista del subtramo 3 de la carretera A-1000 (al fondo) y de la travesía de la A-1001 desde el colegio «Buenavista» de Huércal de Almería. Fuente: elaboración propia.

4. P.K. 1+100 al P.K. 1+750: este tramo está comprendido entre el viaducto anterior y el que existe sobre el lecho del río Andarax, en el límite entre los términos municipales de Huércal de Almería y Viator. La caracterización de los suelos adyacentes es similar a la del tramo anterior, aunque en este caso el suelo residencial se halla muy alejado de la carretera. La velocidad media y la sección tipo son iguales a la del tramo anterior y tampoco existen accesos al mismo.

5. P.K. 1+750 al P.K. 2+100: este tramo finaliza al llegar a la glorieta de intersección con la carretera AL-3115 que da acceso a Viator y a El Alquían, llamada «rotonda de La Juaida». Se mantienen las características anteriores.

6. P.K. 2+100 al P.K. 3+000: este último tramo discurre paralelo al Polígono Industrial de La Juaida, en el término municipal de Viator, con una anchura aproximada de quinientos metros, finalizando en una glorieta anterior a la inferior del enlace bajo la autovía A-7. No hay, por tanto, suelo residencial afectado. La geometría es igualmente

similar a la de los tramos anteriores, aunque sí existen algunos accesos en ambas márgenes, mientras que la velocidad media es de 44 km/h.



Figura 6.11: Vista del subtramo 3 de la carretera A-1000. Fuente: elaboración propia.

Para terminar con la A-1000, destacar que no existen medidas antirruído implantadas ni planificadas con anterioridad a la propia pantalla acústica contemplada en el PAR de estudio y que de los datos recabados en las encuestas a los expertos en relación con las posibles quejas sobre el ruido en este tramo se ha constatado su inexistencia.

En cuanto al tramo compuesto por **la A-1051 y el ramal A-1051R1**, que como se ha dicho constituye una primera fase de esta carretera de gran capacidad de acceso a Roquetas de Mar desde la Autovía del Mediterráneo (A-7), pueden distinguirse los siguientes subtramos:

1. Del P.K. 0+000 al 0+300, que abarca desde su arranque en la glorieta sur del enlace de la A-7 de la que parte la carretera hasta una glorieta de acceso a El Parador de las

Hortichuelas a través de la antigua A-391 y el centro comercial «Vía Park», que da nombre a la rotonda (figura 6.12). En la margen izquierda, en su inicio se encuentran algunas instalaciones comerciales y a continuación un Centro de Conservación de Carreteras del Ministerio de Fomento al que se accede desde la calzada izquierda. Junto a la calzada derecha de la carretera se extiende el citado Centro Comercial. No existe, por tanto, suelo residencial que se vea afectado por el ruido y la velocidad media es relativamente reducida, de 47 km/h.

La sección tipo se puede caracterizar como:

- Doble calzada, cada una compuesta por dos carriles.
- Ancho de los carriles: 3,5 m.
- Ancho del arcén exterior: 2,0 m. Ancho del arcén interior: 1,5 m.
- Ancho de la mediana: estricta de barrera rígida de 1,0 m.
- Pavimento bituminoso.



Figura 6.12: Vista de la glorieta del «Vía Park» en la carretera A-1051. Fuente: elaboración propia.

2. Del P.K. 0+300 al 0+400, aproximadamente. Esta longitud es la correspondiente a la glorieta del Vía Park antes mencionada, de geometría circular con tres carriles. Las únicas edificaciones cercanas son las del propio Centro Comercial, siendo el resto de los terrenos baldíos (figura 6.12).

3. Del P.K. 0+400 al 1+530. Este subtramo comprende desde la glorieta anterior hasta el enlace con la N-340a, desde donde se accede igualmente a El Parador. A partir de este trecho la vía es propiamente una carretera de sección autovía, con restricción de accesos directos al tronco, por lo que la velocidad media sube hasta los 76 km/h. El enlace es del tipo glorieta inferior con ramales de enlace.

La sección tipo, por tanto, es la típica de autovía:

- Doble calzada de dos carriles por sentido de circulación.
- Ancho de los carriles: 3,5 m.
- Ancho del arcén exterior: 2,0 m. Ancho del arcén interior: 1,5 m.
- Ancho de la mediana: 4,2 m, constituida por cuneta central de sección triangular.
- Pavimento bituminoso.

El subtramo se inicia entre los terrenos baldíos que existían junto a la glorieta para más adelante combinar usos agrícolas intensivos de cultivos bajo plástico (invernaderos, fundamentalmente a la derecha) y edificaciones cercanas a la izquierda, correspondientes a la barriada de El Parador de las Hortichuelas, que se encuentra a caballo entre los términos municipales de Roquetas de Mar y Vícar, con uso residencial y algunas de uso comercial/industrial (figura 6.13).

Destaca la existencia de pantalla acústica de unos 470 m junto al arcén exterior de la calzada izquierda hasta llegar al enlace con la antigua nacional, así como también adosado al pretil exterior izquierdo de la estructura sobre la glorieta del enlace en toda su longitud (unos 360 m). Todo el trazado de la carretera que presenta cercanía a edificaciones residenciales cuenta así con esta protección acústica.



Figura 6.13: Vista del subtramo 3 de la carretera A-1051. Fuente: elaboración propia.

4. Del P.K. 1+530 al 2+350. Es la continuación del subtramo anterior a partir del enlace de la N-340a hasta la conexión provisional en el final del tramo construido hasta ahora, enlazando con la glorieta inferior del futuro enlace donde se conecta con un vial municipal denominado «Carretera de Las Losas» y la A-1051R1 (figura 6.14). La velocidad media del tramo es de 79 km/h y la sección tipo puede definirse como sigue:

- Doble calzada de tres carriles por sentido de circulación, aunque en sentido Roquetas de Mar se halla cancelado desde el principio el carril izquierdo, por lo que en realidad solo cuenta con dos carriles.
- Ancho de los carriles: 3,5 m.
- Ancho del arcén exterior: 2,0 m. Ancho del arcén interior: 1,5 m.
- Ancho de la mediana: 4,2 m, constituida por cuneta central de sección triangular.
- Pavimento bituminoso.

Este subtramo entre los dos enlaces discurre también rodeado en su franja más cercana a la carretera por terrenos baldíos o de invernaderos, aunque destaca una finca industrial con una nave de grandes dimensiones a la salida del enlace junto a la calzada derecha, mientras que continúan las edificaciones residenciales de El Parador a la izquierda, aunque cada vez a mayor distancia conforme avanza la carretera.



Figura 6.14: Vista del subtramo 4 de la carretera A-1051. Fuente: elaboración propia.

5. Tramo de la A-1051R1, desde su arranque en la glorieta de la «Carretera de Las Losas» hasta la glorieta final en la antigua A-391. No se dispone de datos de velocidad media en el ramal, pero se encuentra limitado a 60 km/h y en la aproximación a las glorietas a 40 km/h. La tipología también es de gran capacidad:

- Doble calzada de dos carriles por sentido de circulación.
- Ancho de los carriles: 3,5 m.
- Ancho del arcén exterior: 1,0 m. Ancho del arcén interior: 0,5 m.
- Ancho de la mediana: 1,5 m.

- Pavimento bituminoso.

A la derecha del ramal el suelo es baldío sin urbanizar y la izquierda es de uso industrial relacionado con la comercialización de productos hortofrutícolas, con la presencia de una nave de grandes dimensiones prácticamente en toda la longitud. No existe afección, por tanto, a suelo residencial o sensible.

En ninguno de los tramos de estas vías de gran capacidad se tiene constancia en la Administración Autonómica (ni por parte de los expertos que contestaron las encuestas al respecto) de existencia de quejas de ciudadanos sobre el ruido debido al tráfico de la carretera.

Finalmente, el tramo de estudio de **la A-1201** comprende la parte norte de la llamada variante oeste de Pulpí, comprendida entre la glorieta de intersección con la carretera A-350 hacia Huércal-Overa y de acceso al núcleo urbano de Pulpí, hasta la glorieta de intersección con la antigua A-1201R, de acceso norte a Pulpí y a un polígono industrial. El tramo presenta características homogéneas en toda su longitud debido a su relativamente reciente construcción, con lo que mantiene los parámetros de diseño de las variantes de población mediante carretera convencional:

- Calzada única compuesta por dos carriles, uno por sentido de circulación. Dispone de vías de servicio no pavimentadas a ambos lados del eje de modo que no existen accesos directos a la carretera.
- Ancho del carril: 3,5 m.
- Ancho del arcén: 1,5 m.
- Pavimento bituminoso.

No obstante, cabe destacar la presencia de una estructura en el P.K. 12+950 sobre la línea del ferrocarril Almendricos – Águilas, a partir de la cual la carretera abandona la sección en terraplén por otra a nivel del terreno o desmote escaso para luego alcanzar nuevamente una sección de terraplén también poco elevado hasta una segunda estructura de un camino sobre la traza de la carretera en el P.K. 14+150, desde el que vuelve a discurrir adaptada al terreno natural (figura 6.15). El suelo que atraviesa el tramo es en su

totalidad de uso agropecuario, existiendo extensas explotaciones agrícolas a ambos lados del mismo, con presencia aislada de algunas naves de uso primario así como algunas viviendas vinculadas a las parcelas agrarias y ganaderas, de las que provienen las quejas relacionadas con el ruido del tráfico.



Figura 6.15: Vista del tramo de la carretera A-1201 desde la estructura del P.K. 14+150. Fuente: elaboración propia.

La velocidad media del tramo es de 68 km/h y no existen medidas antirruído implantadas, aunque sí las hay planificadas en un proyecto redactado por la Dirección General de Infraestructuras para instalar una pantalla acústica junto a las viviendas citadas. Cabe destacar que, al no existir obligación de la normativa, no existen MER de este tramo de carretera y para analizarlo se utilizarán los datos del estudio acústico realizado en este proyecto, que limita la zona de conflicto al subtramo del P.K. 13+700 al 13+800 debido a que se ha constatado que se superan los valores de nivel de ruido marcados por el objetivo de calidad en las viviendas de los ciudadanos que presentaron sus quejas.



Figura 6.16: Vista de una pantalla acústica instalada en un tramo diferente de la carretera A-1201. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con todo lo anterior, de estos tramos de carreteras analizados, y a la luz de las simulaciones acústicas vinculadas a los mismos, a las que se ha tenido acceso, así como de sus propias características, es posible concretar aquellos **tramos de conflicto** por existirafección sobre la población:

- Subtramo 3 de la carretera A-1000, es decir, del P.K. 0+350 al P.K. 1+100.
- Subtramos 3 y 4 de la carretera A-1051, es decir, entre los PP.KK. 0+400 y 2+350.
- Subtramo del P.K. 13+700 al 13+800 de la A-1201.

6.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ASIGNACIÓN DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN A LOS TRAMOS DEL PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO DE LA RED DE CARRETERAS AUTONÓMICAS EN ALMERÍA.

Una vez presentados, descritos y concretados los tramos que constituyen los casos reales donde se llevará a cabo la aplicación de la metodología, se procede propiamente a

primera fase de la misma, es decir, a determinar las RSPV para cada uno de ellos hasta alcanzar el RSPI. Con ello será posible priorizar entre ellos a la hora de actuar sobre el problema de ruido que presentan y, de este modo, reflejarlo en el PAR correspondiente que la Administración generaría.

Para ello se sigue el diagrama de flujo presentado en la figura 4.2, partiendo de los datos del Plan de Aforos analizado anteriormente y apoyándose en los resultados de los MER y demás parámetros correspondientes a los tramos seleccionados y que han sido resumidos en apartados anteriores.

6.2.1. Valores de las Variables de Prioridad de Tramo.

Así, a partir de los datos extraídos de los MER elaborados en 2014 gracias a la simulación acústica encargada por la Junta de Andalucía para dar cumplimiento a la segunda fase de la publicación de los MER así como de los cálculos acústicos realizados para la proyección de las pantallas antirruído en la carretera A-1201, y a los que se ha tenido acceso, así como de los datos derivados de los usos del suelo adyacente a los tramos y del Plan de Aforos de 2012 se alcanzan los valores numéricos de siete de las nueve RSPV. En cuanto a las dos RSPV que adoptan un valor binario, puede conocerse su valor fácilmente a partir de las características de cada tramo, de la tabla 4.2 y de la información suministrada por los expertos en las preguntas al respecto de los cuestionarios que sirvieron de base para hallar las comparaciones pareadas en el desarrollo de la primera fase de la metodología, lo cual ha sido confirmado en el Servicio de Carreteras de la Delegación Territorial de la Consejería de Fomento y Vivienda en Almería.

De este modo, en las tablas 6.1 a 6.3 se muestran los **datos necesarios** para llegar a los valores de las RSPV, según la aplicación del diagrama de flujo de la figura 4.2, para cada uno de los tramos analizados.

6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA. CASOS DE ESTUDIO

Tabla 6.1: Datos del tramo de la A-1000 para aplicación de la primera fase de la metodología. Fuente: elaboración propia.

| Parámetro | | Dato A-1000 |
|---|--------------------|-------------|
| IMD (veh/día) | | 15767 |
| Porcentaje de vehículos pesados (%) | | 3 |
| Velocidad media de recorrido (km/h) | | 55 |
| Existencia de quejas sobre el ruido del tráfico | | NO |
| Niveles de ruido existentes (dB(A)) | L _{den} | 75 |
| | L _{día} | 75 |
| | L _{noche} | 56 |
| Objetivos de calidad acústica (dB(A)) | L _{día} | 65 |
| | L _{noche} | 55 |
| Superficie expuesta a valores de L _{den} (km ²) | > 75 dB(A) | 0,04 |
| | > 65 dB(A) | 0,28 |
| | > 55 dB(A) | 1,24 |
| Centros sensibles al ruido expuestos a valores de L _{den} (n°) | > 75 dB(A) | 0 |
| | > 65 dB(A) | 0 |
| | > 55 dB(A) | 1 |
| Población expuesta a valores de L _{den} (centenas de personas) | > 75 dB(A) | 1 |
| | > 65 dB(A) | 6 |
| | > 55 dB(A) | 56 |
| Existencia de medidas antirruído instaladas | | NO |
| Planificación de medidas antirruído previstas | | NO |

Tabla 6.2: Datos del tramo de la A-1051 para aplicación de la primera fase de la metodología. Fuente: elaboración propia.

| Parámetro | | Dato A-1051 |
|---|--------------------|-------------|
| IMD (veh/día) | | 33611 |
| Porcentaje de vehículos pesados (%) | | 5 |
| Velocidad media de recorrido (km/h) | | 79 |
| Existencia de quejas sobre el ruido del tráfico | | NO |
| Niveles de ruido existentes (dB(A)) | L _{den} | 68 |
| | L _{día} | 67 |
| | L _{noche} | 56 |
| Objetivos de calidad acústica (dB(A)) | L _{día} | 65 |
| | L _{noche} | 55 |
| Superficie expuesta a valores de L _{den} (km ²) | > 75 dB(A) | 0,10 |
| | > 65 dB(A) | 0,39 |
| | > 55 dB(A) | 1,91 |
| Centros sensibles al ruido expuestos a valores de L _{den} (n°) | > 75 dB(A) | 0 |
| | > 65 dB(A) | 0 |
| | > 55 dB(A) | 0 |
| Población expuesta a valores de L _{den} (centenas de personas) | > 75 dB(A) | 0 |
| | > 65 dB(A) | 2 |
| | > 55 dB(A) | 36 |
| Existencia de medidas antirruído instaladas | | SÍ |
| Planificación de medidas antirruído previstas | | - |

6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA. CASOS DE ESTUDIO

Tabla 6.3: Datos del tramo de la A-1201 para aplicación de la primera fase de la metodología. Fuente: elaboración propia.

| Parámetro | Dato A-1201 | |
|---|--------------------|------|
| IMD (veh/día) | 4116 | |
| Porcentaje de vehículos pesados (%) | 6 | |
| Velocidad media de recorrido (km/h) | 68 | |
| Existencia de quejas sobre el ruido del tráfico | SÍ | |
| Niveles de ruido existentes (dB(A)) | L _{den} | 67 |
| | L _{día} | 66 |
| | L _{noche} | 55 |
| Objetivos de calidad acústica (dB(A)) | L _{día} | 65 |
| | L _{noche} | 55 |
| Superficie expuesta a valores de L _{den} (km ²) | > 75 dB(A) | 0 |
| | > 65 dB(A) | 0,08 |
| | > 55 dB(A) | 0,12 |
| Centros sensibles al ruido expuestos a valores de L _{den} (nº) | > 75 dB(A) | 0 |
| | > 65 dB(A) | 0 |
| | > 55 dB(A) | 0 |
| Población expuesta a valores de L _{den} (centenas de personas) | > 75 dB(A) | 0 |
| | > 65 dB(A) | 0,04 |
| | > 55 dB(A) | 0,08 |
| Existencia de medidas antirruído instaladas | NO | |
| Planificación de medidas antirruído previstas | SÍ | |

Como se ve, el hecho de que el PAR de 2008 previera la instalación de una pantalla acústica para la A-1000 no se ha tenido en cuenta como existencia de medidas antirruído planificadas, ya que esta variable contempla que la Administración competente la haya proyectado fuera del instrumento de planificación que se esté estudiando, y no debe perderse de vista que precisamente se estaría trabajando sobre la revisión del PAR a los cinco años de su elaboración. Sin embargo, no es el caso de la A-1201, que no está incluida en el PAR y ante las quejas presentadas la Junta de Andalucía ha estudiado y proyectado una solución contra el problema de ruido evidenciado.

A partir de estos datos pueden obtenerse los **valores de las RSPV** para los tres tramos, de acuerdo con la definición dada en el apartado 4.2.2, que se resumen en la tabla 6.4. Una vez se han obtenido todos estos valores, solo resta normalizarlos y ponderarlos para calcular el RSPI, operación que se llevará a cabo en el siguiente apartado, con lo que alcanzará la ordenación por prioridad buscada.

Tabla 6.4: Valores de las RSPV de los tramos de carreteras analizados en la primera fase de la metodología.

Fuente: elaboración propia.

| Nº | RSPV | A-1000 | A-1051 | A-1201 | |
|----|--|----------------------|--------|--------|-------|
| 1 | P _{exp} (nº de personas expuestas) | P _{exp,75} | 1 | 0 | 0 |
| 2 | | P _{exp,65} | 6 | 2 | 0,04 |
| 3 | | P _{exp,55} | 56 | 36 | 0,08 |
| 4 | CS _{exp} (nº de centros sensibles expuestos) | CS _{exp,75} | 0 | 0 | 0 |
| 5 | | CS _{exp,65} | 0 | 0 | 0 |
| 6 | | CS _{exp,55} | 1 | 0 | 0 |
| 7 | ΔL (atenuación necesaria en dB(A)) | ΔL_d | 10 | 2 | 1 |
| 8 | | ΔL_n | 1 | 1 | 0 |
| 9 | IMD (veh/día) | | 15767 | 15767 | 33611 |
| 10 | EQ (existencia de quejas) | | 0 | 0 | 0 |
| 11 | v (velocidad media en km/h) | | 55 | 55 | 79 |
| 12 | %vp (% de vehículos pesados) | | 3 | 3 | 5 |
| 13 | E _{MAR} (existencia de medidas antirruído) | | 1 | 1 | 0 |
| 14 | S _{exp} (superficie expuesta en km ²) | S _{exp,75} | 0,04 | 0,10 | 0 |
| 15 | | S _{exp,65} | 0,28 | 0,39 | 0,08 |
| 16 | | S _{exp,55} | 1,24 | 1,91 | 0,12 |

6.2.2. Cálculo del Índice de Prioridad de Tramo.

La metodología dispone que la priorización de los tramos objeto del PAR que se esté elaborando se realice según los valores del RSPI calculado a partir de los valores ponderados de las RSPV normalizadas.

Así, siguiendo la ecuación por la que se definió el RSPI (ec. 4.5), con los valores de las RSPV recogidos en la tabla 6.4 (que deben ser previamente normalizados) y con los pesos obtenidos en el capítulo 4 y que se resumieron en la tabla 4.9, se alcanza de forma sencilla el objetivo marcado.

De este modo, los valores normalizados y ponderados de las RSPV y su suma resultante, el RSPI, aparecen en la siguiente tabla, todos ellos en notación porcentual:

6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA. CASOS DE ESTUDIO

Tabla 6.5: Cálculo del RSPI de los tramos de carreteras analizados en la primera fase de la metodología.

Fuente: elaboración propia.

| Nº | RSPV | | A-1000 | A-1051 | A-1201 |
|-------------|--|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | P _{exp} (población expuesta) | P _{exp,75} | 12,260% | 0,000% | 0,000% |
| 2 | | P _{exp,65} | 4,284% | 1,428% | 0,029% |
| 3 | | P _{exp,55} | 1,825% | 1,173% | 0,003% |
| 4 | CS _{exp} (centros sensibles expuestos) | CS _{exp,75} | 3,720% | 3,720% | 3,720% |
| 5 | | CS _{exp,65} | 1,713% | 1,713% | 1,713% |
| 6 | | CS _{exp,55} | 2,670% | 0,000% | 0,000% |
| 7 | ΔL (atenuación necesaria) | ΔL _d | 2,531% | 0,506% | 0,253% |
| 8 | | ΔL _n | 5,740% | 5,740% | 0,000% |
| 9 | IMD | | 3,419% | 7,288% | 0,893% |
| 10 | E _Q (existencia de quejas) | | 0,000% | 0,000% | 9,050% |
| 11 | v (velocidad media) | | 1,691% | 2,429% | 2,090% |
| 12 | %vp (% de vehículos pesados) | | 1,421% | 2,368% | 2,841% |
| 13 | E _{MAR} (existencia medidas antirruído) | | 6,620% | 0,000% | 0,000% |
| 14 | S _{exp} (superficie expuesta) | S _{exp,75} | 0,843% | 2,107% | 0,000% |
| 15 | | S _{exp,65} | 0,534% | 0,744% | 0,153% |
| 16 | | S _{exp,55} | 0,292% | 0,450% | 0,028% |
| RSPI | | | 49,561% | 29,666% | 20,773% |

De acuerdo con los valores calculados del RSPI para los tres tramos de estudio, el orden en que deberían ser priorizados para su actuación dentro del PAR sería el siguiente:

- En primer lugar, la carretera A-1000, concretamente entre los PP.KK. 0+350 y 1+100.
- A continuación, la autovía A-1051, del P.K. 0+400 al 2+350.
- Finalmente, la carretera A-1201 entre los PP.KK. 13+700 y 13+800.

6.2.3. Discusión de resultados.

El resultado arrojado por la aplicación de la primera fase de la metodología permite argumentar el orden que debería darse a los tramos englobados dentro del PAR de las

carreteras autonómicas de la provincia de Almería en la revisión correspondiente al momento actual, segunda fase de la aplicación de la Directiva de Ruido Ambiental. Es decir, es más prioritario actuar sobre el tramo de la carretera A-1000, que fue el único de la red almeriense que quedó incluido en el PAR de 2008 aunque en estos momentos su intensidad de tráfico ha bajado del umbral del grupo I, seguido del tramo de la nueva autovía A-1051, que aunque debió ser analizada en la primera fase de aplicación de la Directiva no fue así y, por tanto, no quedó contemplada dentro de las necesidades de actuación del PAR. Finalmente se encuentra la carretera A-1201 en el tramo de la Variante Oeste de Pulpí que abarca las viviendas que han presentado repetidas quejas sobre el ruido debido al tráfico, aunque no fuera necesario según la aplicación estricta de la normativa debido a su IMD escasa.

Analizando los resultados numéricos alcanzados por las RSPV y el RSPI en los tres tramos analizados, se puede observar que, puesto que se trata de valores relativos entre los tramos y aparte de la existencia de quejas y medidas antirruído que son de carácter binario, han pesado fundamentalmente sobre la **primera posición de la A-1000** el mayor nivel sonoro alcanzado sobre la población (llegando incluso a existir habitantes por encima de los 75 dB(A)) así como la existencia de un colegio por encima de los 55 dB(A). Sin embargo, es obligado indicar, a partir de la visita realizada a la zona, que la existencia de una franja de terreno que separa las viviendas de la carretera analizada hace que la afección a las mismas vaya disminuyendo conforme avanzan los P.K. Por otro lado, al respecto del colegio expuesto debe destacarse que, de acuerdo con los objetivos de calidad acústica estrictos de la Directiva, que marcan los 60 dB(A) para $L_{\text{día}}$ y L_{tarde} y los 50 dB(A) para L_{noche} en el suelo de carácter sanitario, docente y cultural, estos no son rebasados en la situación actual del colegio según los datos consultados de los MER más recientes, pero su influencia en el RSPI se ha tenido en cuenta como una garantía adicional (aunque en este caso de estudio analizado, si no se hubiera incluido, la priorización obtenida no se vería modificada). Además, visitado el colegio se ha podido constatar la sensación continua de ruido debido al tráfico de la carretera en el mismo, circunstancia que ante su especial disposición espacial (muy elevado y expuesto directamente hacia la carretera) es muy difícil de abordar en su interior y más aun en el patio y exteriores del mismo.

En cuanto al **tramo de la A-1051**, pese a la mayor IMD, porcentaje de pesados y velocidad del tramo y a presentar mayor superficie afectada por niveles sonoros elevados, todo eso aunque ya posee una pantalla acústica en toda su longitud, se queda comparativamente lejos en términos de RSPI de la A-1000, ya que su afección a la población es menor, donde la ponderación obtenida en la metodología es la más importante. De la visita a la carretera ha podido observarse que el número de viviendas cercanas a la misma podría resultar mayor, puesto que además están a menor distancia a la calzada izquierda de la autovía, tanto en planta como en cota (debido a la propia elevación de la autovía en este tramo), pero puede entenderse que el nivel de ruido en ellas sea menor gracias a la pantalla existente y a la propia atenuación geométrica que genera la presencia también de una franja sin urbanizar entre las viviendas y la carretera. No obstante, es destacable la ineficacia que ha resultado de la colocación de la pantalla antirruído existente, ya que no ha conseguido eliminar el problema del ruido, probablemente debido a su escasa altura, que no cumple la premisa básica de interrumpir las ondas sonoras hacia las viviendas cercanas.



Figura 6.17: Vista de un bloque de viviendas junto al tramo de la carretera A-1051 estudiado. Fuente: elaboración propia.

Y en relación a **la A-1201** se comprueba que los principales factores que han contribuido comparativamente en el valor final de su RSPI son la existencia de quejas, sobre todo, y, en menor medida, la velocidad y porcentaje de pesados, que son superiores a los de los otros tramos (salvo a la velocidad de la A-1051, que sí es mayor, aunque no tanto como podría esperarse en un tramo de autovía). Aparte de contar con menor IMD, fundamentalmente la escasa población afectada hace que no sea tan prioritario actuar, aunque no se debe olvidar que ya la Junta de Andalucía tiene proyectadas sendas pantallas para mitigar el ruido existente debido al tráfico en las viviendas situadas junto a este tramo de variante de carretera y que han manifestado sus quejas al respecto. Por esta razón, y aunque fuera en último lugar de prioridad, tiene sentido que sea incluido en el PAR con la intención de programar su inversión real en el período de vigencia del mismo y así garantizar el abordaje de una solución a estos ciudadanos molestos.

Finalmente, es en este momento cuando se pueden **comparar los resultados obtenidos también con aquellos que los expertos indicaron** como respuesta a la ordenación de los tramos que, según su parecer y a la vista de las variables analizadas y su importancia relativa reflejada en las encuestas, ofrecieron al final del cuestionario utilizado para el desarrollo de esta primera fase de la metodología. En el caso de la ordenación de tramos de la provincia de Almería, pudo utilizarse la información facilitada por el experto concreto de Almería (que se manifestó solo sobre estos tres tramos) y los de Andalucía en general (tres que ordenaron todos los tramos de la Red Autonómica, de modo que es posible observar en este listado la posición relativa de los tres tramos estudiados de Almería entre sí). De este modo, al observar las ordenaciones propuestas por estos cuatro expertos resulta que todos ellos coinciden en que el orden relativo de estos tres tramos sea el que ha resultado de la aplicación de la metodología. Se cuenta, por tanto, con otra prueba más de la bondad y consistencia del resultado obtenido.

De todo lo anterior puede concluirse que los resultados alcanzados mediante la aplicación de la primera parte de la metodología propuesta son lógicos y coherentes con la situación acústica de los tramos de carreteras analizados y permiten argumentar de manera objetiva y razonada la priorización que se reflejaría en el PAR correspondiente. Además, la fortaleza de las ponderaciones utilizadas en el análisis multicriterio utilizado a partir de las variables más importantes en el problema del ruido del tráfico rodado y que es presentado

como el RSPI, facilita la justificación ante la propia Administración y los ciudadanos del orden establecido y permite reflejar numérica y comparativamente la afección del ruido de cada tramo.

6.3. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA DEFINICIÓN DEL PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO DE LA RED DE CARRETERAS AUTONÓMICAS EN ALMERÍA.

Recordando el proceso lógico que se seguiría en la elaboración de un PAR y reflejado en la figura 4.2, una vez que los tramos que precisan la planificación de soluciones contra el ruido debido al tráfico de las carreteras han sido priorizados, se pasaría a la elección de las alternativas idóneas para cada tramo, proceso en el que entra en juego la segunda fase de la metodología propuesta, y, posteriormente, realizar la distribución del coste total estimado en las anualidades que comprende el Plan teniendo en cuenta la priorización establecida mediante el RSPI, como se ha establecido en el apartado anterior.

De este modo, para la aplicación práctica de la metodología de análisis multicriterio propuesta, se ha tomado como caso de estudio el tramo de la A-1000, el más prioritario para el PAR que se está elaborando (de acuerdo con los valores del RSPI obtenidos anteriormente), y que, como más adelante se verá, dará opción para comparar diferentes alternativas, las más comunes en los PAR como también pudo comprobarse, y además permitirá comparar el resultado con la solución planteada en el PAR publicado por la Junta de Andalucía en 2008. Con ello se alcanzará el objetivo de probar los distintos métodos de análisis multicriterio propuestos para la segunda fase de la metodología, al nivel académico en que se encuentra este estudio dentro de la aplicación práctica de los resultados de esta tesis doctoral.

Así, como se vio anteriormente, y a la luz de los datos del MER utilizado, el tramo concreto sobre el que se realizará el análisis multicriterio es el que comprende la carretera A-1000 desde el P.K. 0+350 al 0+800, que presenta afección a población y un centro docente de Huércal de Almería y, por tanto, de 450 metros de longitud.



Figura 6.18: Ortofoto de la carretera A-1000 en la zona de estudio. Fuente: Instituto de Cartografía y Estadística de Andalucía (<http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/lineav2/web/>).

6.3.1. Alternativas en análisis.

En primer lugar, es necesario establecer las alternativas que se plantearán como viables para ser analizadas en la metodología en el tramo escogido de la A-1000. Para ello, se parte de las soluciones preseleccionadas en el apartado 5.3.2 (tabla 5.4) y se aplicarán los **diagramas de depuración de alternativas** que fueron presentados en las figuras 5.8 a 5.11, y que, como se ve en las figuras 6.19 a 6.22, de aplicación concreta de los mismos a este tramo, permiten eliminar como posibles las siguientes alternativas:

- según la figura 6.19: la A-1000 en el tramo analizado no tiene la consideración de tramo urbano y tampoco es vía de gran capacidad, por lo que solo se pueden descartar las alternativas 3.1 y 3.3.
- según la figura 6.20: al no tener ninguna medida antirruído previamente implantada, no se puede eliminar ninguna otra alternativa posible.

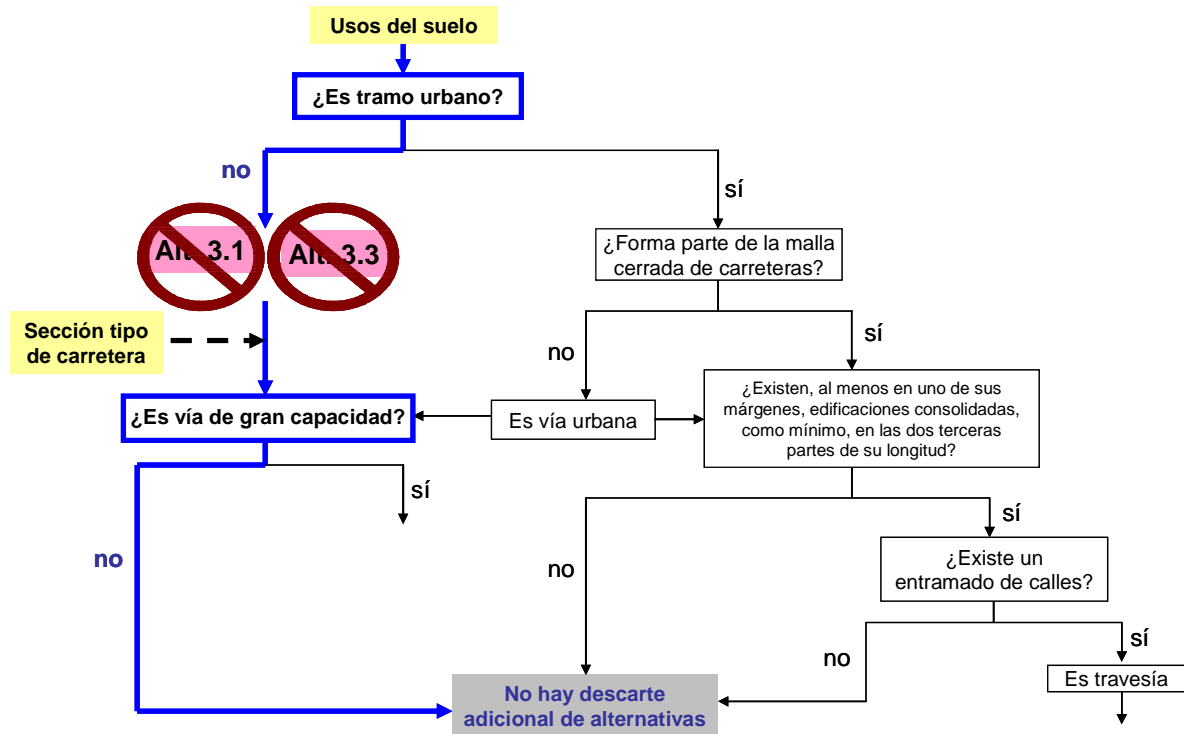


Figura 6.19: Aplicación del diagrama de flujo de depuración de alternativas en la A-1000 según tramos urbanos, vías urbanas o travesías. Fuente: elaboración propia.



Figura 6.20: Aplicación del diagrama de flujo de depuración de alternativas en la A-1000 según existencia previa de medidas antirruído. Fuente: elaboración propia.

- según la figura 6.21: la atenuación necesaria en el caso más desfavorable es superior a los 5 dB(A), como se ha visto en el apartado anterior, de modo que no se pueden plantear las alternativas de pavimentos silenciosos o de gestión del tráfico aisladamente, sino junto a otras como barreras acústicas o aislamiento de ventanas.

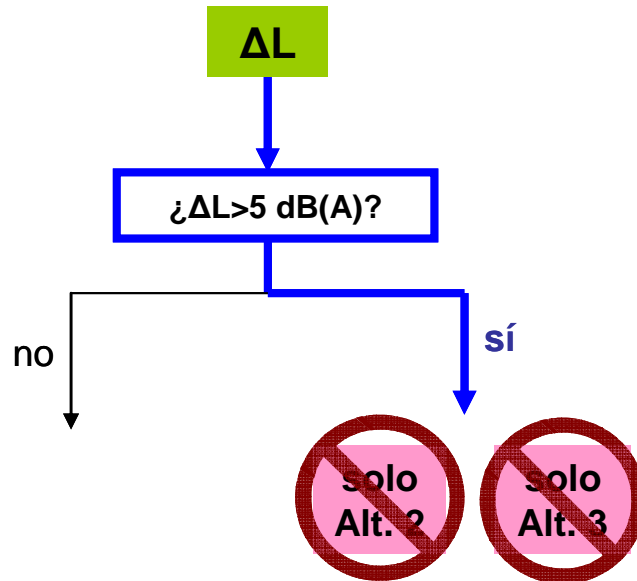


Figura 6.21: Diagrama de flujo de depuración de alternativas en la A-1000 según atenuación necesaria. Fuente: elaboración propia.

- según la figura 6.22: la velocidad media de los vehículos en el tramo es de 55 km/h, superior por tanto a los 50 km/h, de modo que no se puede descartar tampoco ninguna alternativa más.

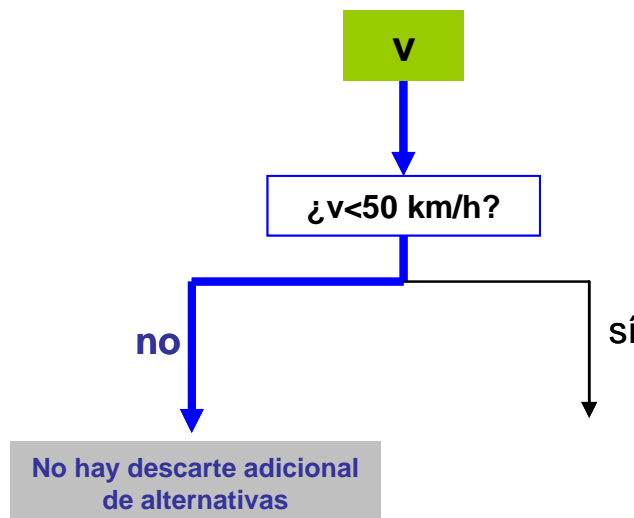


Figura 6.22: Diagrama de flujo de depuración de alternativas en la A-1000 según velocidad media del tramo. Fuente: elaboración propia.

Aparte de esta depuración previa, puesto que la implantación de un firme silencioso debe realizarse mediante un refuerzo de la capa de rodadura y el pavimento existente en la A-1000 es bituminoso, no es conveniente emplear hormigón sobre él solamente en un

tramo relativamente corto de la carretera, así que tampoco se contemplará en el análisis la alternativa 2.3. Por otro lado, por las propias características de la carretera y ya que el problema del ruido presentado no es tan sumamente grave, no tiene sentido plantear la solución de cubrición de la carretera que, además de eso, escapa en su cálculo de las posibilidades de este documento, de modo que tampoco se contará con la alternativa 5.

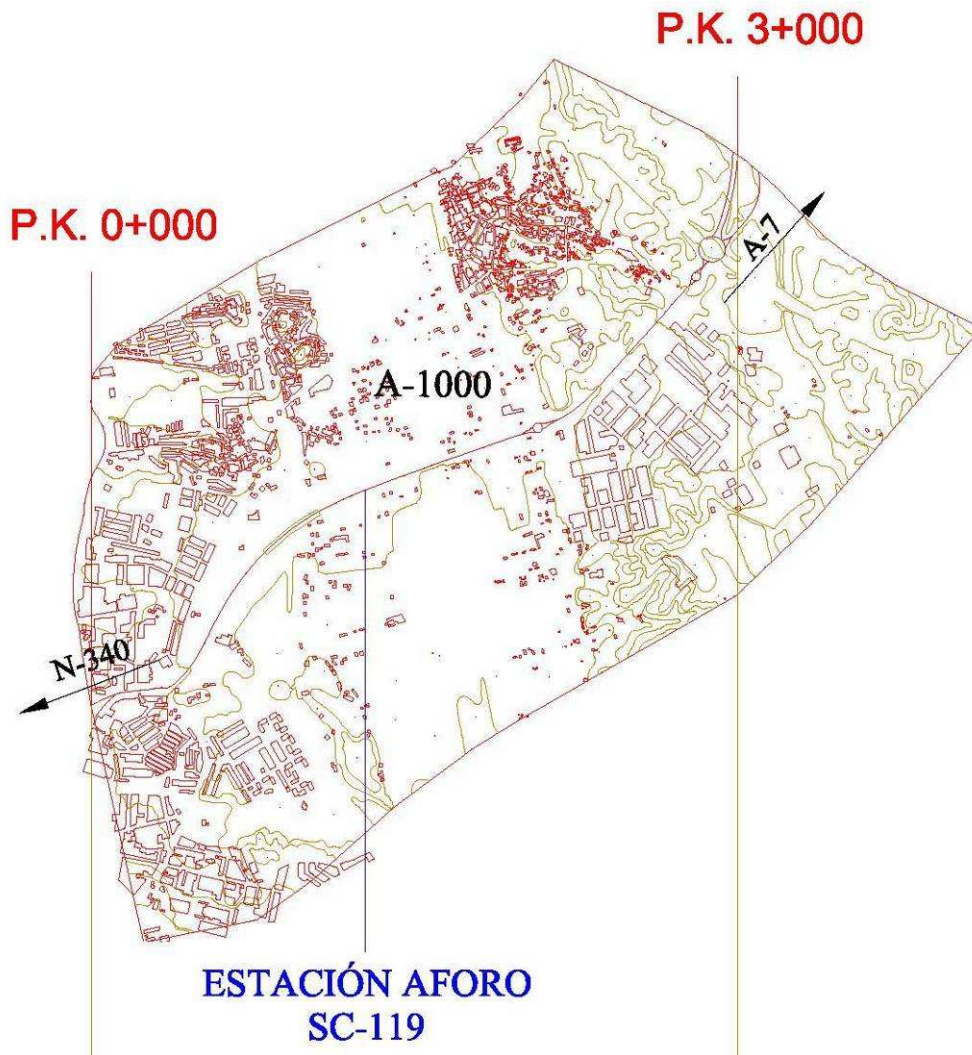


Figura 6.23: Planta de estudio de la carretera A-1000. Fuente: adaptada de [COPT, 2007]

Por tanto, **las alternativas que se plantean para el tramo de la A-1000** son las siguientes:

- Alt. 1.1: pantallas acústicas. Esta fue la solución adoptada por el PAR elaborado en 2008 y puesto que los resultados acústicos alcanzados en la revisión del MER correspondiente difieren poco del que sirvió de base para el cálculo de la

pantalla planteada (para la cual se cuenta incluso con el proyecto de construcción, o sea, con un grado de detalle y corrección mayor), se tomarán sus datos para ilustrar esta alternativa actuando en solitario. La solución definida consiste en una pantalla acústica de 444 metros de longitud y 4 metros de altura, sobre zócalo de hormigón de 50 cm., constituidos por paneles mixtos de hormigón poroso absorbente y de metacrilato reflectante de 2 m de altura y 4 metros de longitud cada uno (111 paneles de cada tipo), montados sobre perfiles metálicos HEB galvanizados en caliente por inmersión en zinc fundido. Estos perfiles se embuten en cimentaciones de tipo *Aistec* con zapatas individuales por poste cilíndricas con diámetro 650 mm y profundidad de 2,4 m [CFV, 2013]. Esta disposición permite minimizar el impacto visual de la pantalla. En el caso de configurar una solución mixta con otras alternativas, la pantalla estará constituida por un único panel de hormigón de 2 metros de altura, con las lógicas modificaciones en la cimentación y estructura metálica.



Figura 6.24: Simulación de la colocación de la pantalla acústica junto al tramo de estudio de la carretera A-1000. Fuente: [CFV, 2013]

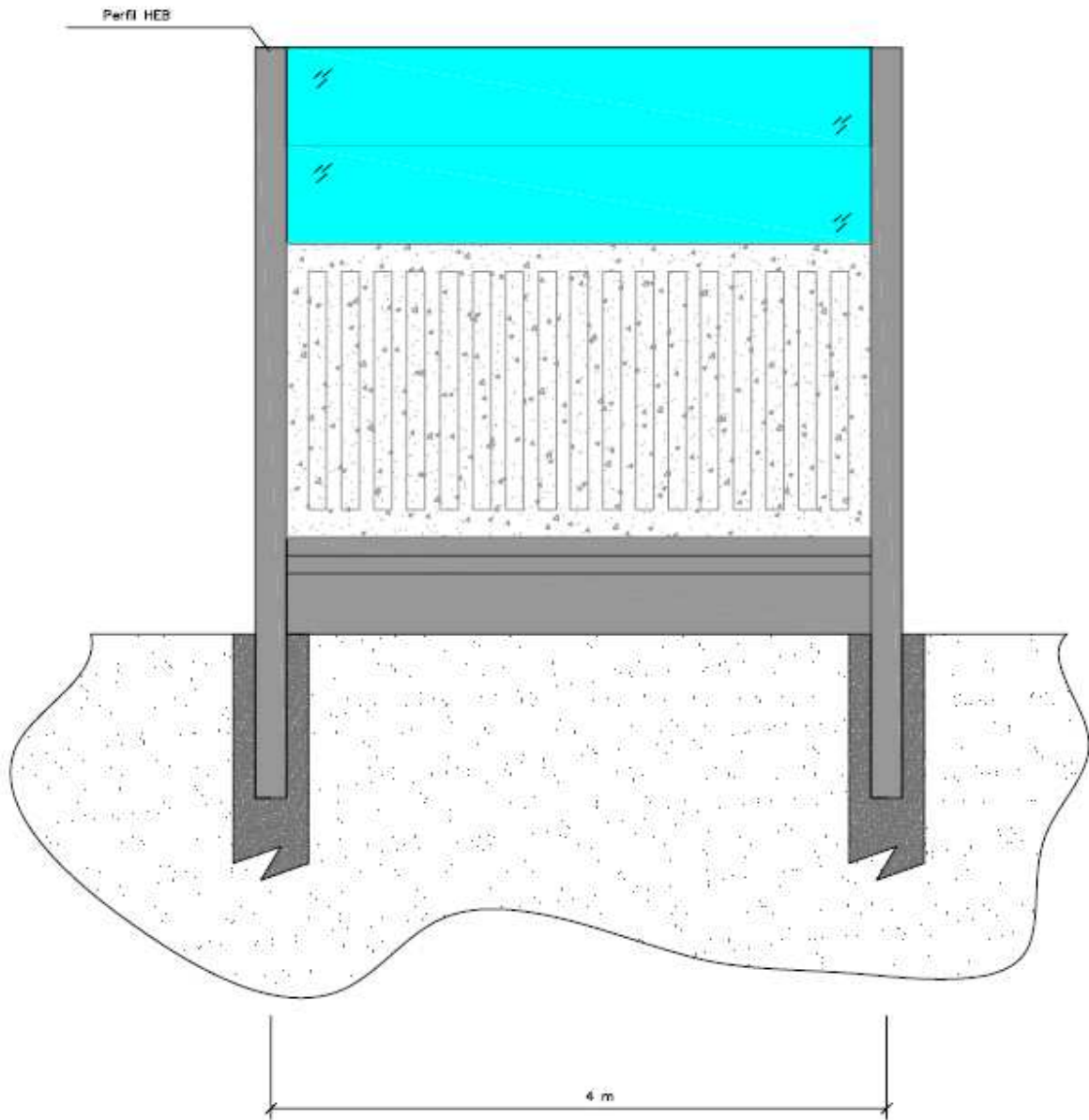


Figura 6.25: Alzado de la pantalla acústica propuesta para el tramo de estudio de la carretera A-1000.
Fuente: [CFV, 2013]

- Alt. 1.2: bermas de tierra. Esta alternativa es factible en nuestro estudio del tramo de conflicto de la A-1000 gracias a la existencia de un espacio libre de anchura suficiente entre la carretera (más concretamente, a partir de la vía de servicio de la margen izquierda) y la travesía de la A-1001 junto a la cual se sitúan las viviendas afectadas. Se proyecta, por tanto, un dique de tierra de altura suficiente como para producir la atenuación en todas las fachadas a partir de la obstaculización de las ondas sonoras, de ahí que por la propia

configuración del tramo tendrá una altura variable (hasta un máximo de 9,90 metros) en una longitud total de 525 metros, con una anchura en coronación de 3 metros para hacer posible el correcto extendido de tierras y con un talud 3/2 que también garantice su estabilidad (figura 6.26). El material será de préstamos tipo S-0 según la ICAFIR, extendido y compactado al 98% de la densidad Próctor Modificado, y sobre ella se dispondrá un relleno de 30 cm de tierra vegetal para favorecer el crecimiento de especies vegetales que permitan una mayor integración paisajística de la estructura. De hecho se prevé también la plantación en coronación de una hilera de arbolado tipo ciprés (*cupressus sempervirens*) de unos 2,50 m de altura y separados 1 metro entre sí, que permitan igualmente ocultar en mayor medida la pantalla acústica (de 2 m de altura) en caso de que la alternativa la contemple. Se ha elegido esta especie por su perfecta integración en el espacio, facilidad de plantación y posterior mantenimiento en el clima semiárido de Almería. En el caso de que la berma de tierra configure una solución mixta con otras soluciones, será de menor altura y, por tanto, ocupará menor superficie y supondrá menor volumen de relleno (figura 6.27).

- Alt. 2.1: mezclas bituminosas drenantes. Esta alternativa consiste en el extendido de una capa de aglomerado asfáltico drenante tipo AC 22 surf con árido ofítico y ligante modificado B50/70 S sobre el pavimento existente para configurar una nueva capa de rodadura de unos 5 cm de espesor con un elevado porcentaje de huecos, como ya fue descrito en el apartado 5.2.4. El refuerzo, obviamente, contará con las partidas correspondientes de *filler* de aportación compuesto por cemento y riego de adherencia mediante emulsión tipo ECR-1 y la correspondiente reposición de la señalización horizontal en todo el tramo, además de los fresados en el inicio y final para garantizar una adecuada transición de la rodadura. Debido a que no es capaz de alcanzar la atenuación necesaria por sí sola, realmente se contemplará en conjunción con las alternativas 1.1, 1.2 y 4.

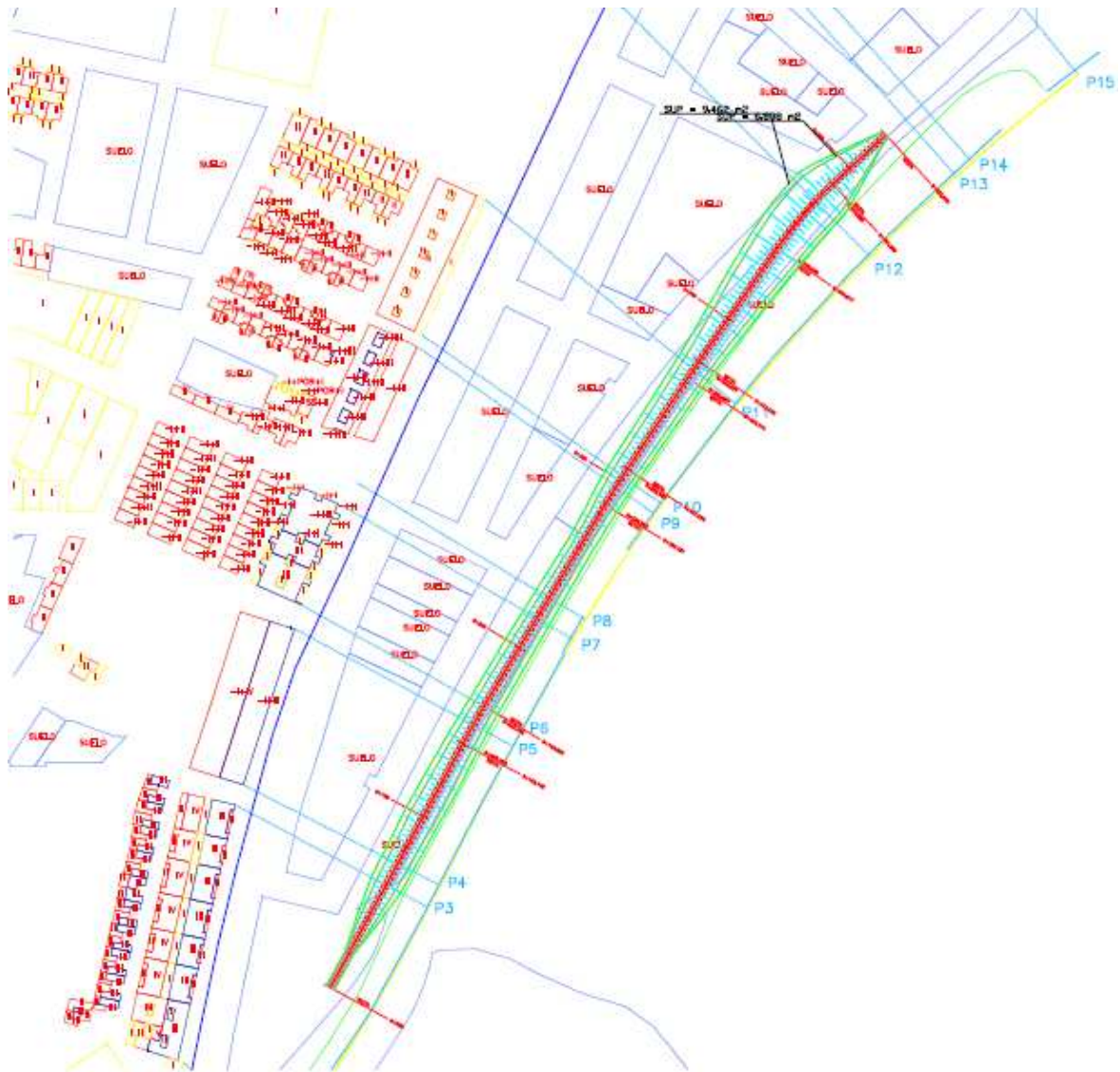


Figura 6.26: Planta de diseño de la berma de tierra propuesta para el tramo de estudio de la carretera A-1000. Fuente: elaboración propia.

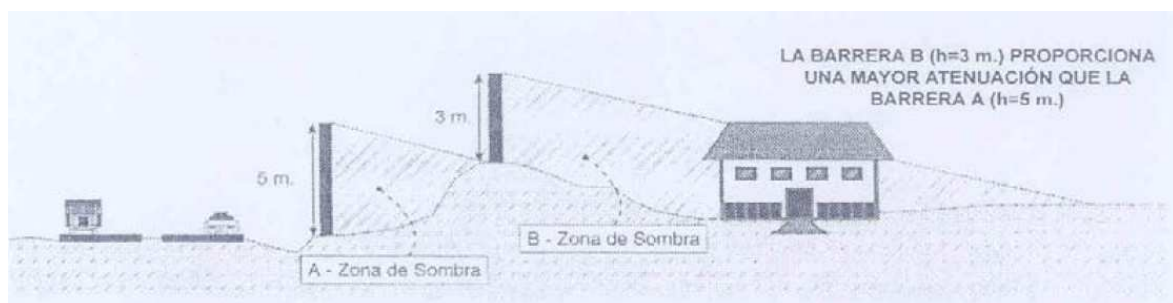


Figura 6.27: Esquema de disposición de pantalla acústica sobre berma de tierra. Fuente: [Alegre Marrades, 2013]

- Alt. 2.2: mezclas bituminosas mejoradas o modificadas con caucho. Se trata de una solución similar a la anterior, pero ejecutando un refuerzo de firme de 5 cm

de espesor mediante una mezcla bituminosa tipo AC 22 surf, pero en este caso con betún asfáltico B50/70 S mejorado con caucho procedente de polvo de NFU, junto con el resto de partidas necesarias. Como la drenante, se estudiará en tres opciones, coordinadamente con las alternativas 1.1, 1.2 y 4.

- Alt. 3.2: acción sobre velocidad del tráfico. Esta solución de gestión del tráfico debe conseguir de manera fehaciente la disminución de la velocidad, que ya de por sí no es muy elevada en la situación actual, de modo que esta reducción no puede ser por debajo de los 40 km/h, o sea, unos 15 km/h menos para poder llegar a una bajada en el nivel sonoro de unos 2 dB(A), que es insuficiente para resolver el problema. Por esta razón, y como se vio con la figura 6.21, se planteará junto a las alternativas 1.1, 1.2 y 4, y concedores de que las limitaciones de velocidad mediante simple señalización no son efectivas y que ya existe una glorieta en el inicio del tramo, la solución que se probará será la de instalación de un semáforo de control de velocidad que a la vez ayude a calmar el tráfico para garantizar una reducción de la velocidad de los vehículos a los 40 km/h (por debajo de este valor es sabido que no es efectivo a efectos acústicos ni tampoco es recomendable para una carretera de este nivel de tráfico y fuera de tramo urbano). El sistema contará con dos semáforos de tres focos cada uno más los otros dos necesarios de preaviso (uno por sentido) de dos focos (ámbar alternativos), incluyendo los báculos, columnas, pantallas de contraste, regulador eléctrico y electrónico con microprocesador, detector electromagnético y espiras de lazo, canalizaciones, cableado, puestas a tierra y señalización vertical coherente, además de la obra civil, arquetas y armarios precisos (figura 6.28).
- Alt. 4: aislamiento de fachadas. Finalmente, se plantea la alternativa de realizar la modificación de las ventanas de las viviendas afectadas a modelos acústicamente aislantes que alcancen la atenuación necesaria. Se consideran dos modelos de ventanas con aislamientos acústicos de 5 dB(A) ($RA_{tr} = 30$ dB(A), equivalente a una de vidrio del tipo 33/12/6 mm) y de 10 dB(A) ($RA_{tr} = 35$ dB(A), equivalente a una del tipo 44/12/6 mm), con lo que en el primer caso serán las que se utilicen para combinar con las alternativas 1.1, 1.2, 2.1 y 2.2, mientras que el segundo tipo solo será necesario para actuar en aquellas

viviendas afectadas cuando solo se plantee esta alternativa y para complementar también a la alternativa 3.2 (figura 6.29).



Figura 6.28: Ejemplo de grupo semafórico de preaviso y gestión del tráfico en una carretera. Fuente: elaboración propia.



Figura 6.29: Tipos de ventanas para aislamiento acústico según datos de RA tr. Fuente: [Jiménez Díaz et al., 2014].

Resumiendo, las opciones que constituyen el **conjunto de alternativas posibles** y eficientes para la aplicación práctica de los métodos de análisis multicriterio propuestos son las siguientes:

- Alternativa A: Alt. 1.1 (pantalla acústica de 4 m de altura).

- Alternativa B: Alt. 1.2 (berma de tierra completa).
- Alternativa C: Alt. 1.1 + Alt. 1.2 (berma de tierra reducida con pantalla acústica sobre ella de 2 m de altura).
- Alternativa D: Alt. 1.1 + Alt. 2.1 (pantalla acústica de 2 m de altura y refuerzo de firme bituminoso poroso).
- Alternativa E: Alt. 1.2 + Alt. 2.1 (berma de tierra reducida y refuerzo de firme bituminoso poroso).
- Alternativa F: Alt. 1.1 + Alt. 2.2 (pantalla acústica de 2 m de altura y refuerzo de firme bituminoso mejorado con caucho).
- Alternativa G: Alt. 1.2 + Alt. 2.2 (berma de tierra reducida y refuerzo de firme bituminoso mejorado con caucho).
- Alternativa H: Alt. 1.1 + Alt. 3.2 (pantalla acústica de 2 m de altura y semáforo de control de velocidad).
- Alternativa I: Alt. 1.2 + Alt. 3.2 (berma de tierra reducida y semáforo de control de velocidad).
- Alternativa J: Alt. 1.1 + Alt. 4 (pantalla acústica de 2 m de altura y aislamiento sencillo de ventanas).
- Alternativa K: Alt. 1.2 + Alt. 4 (berma de tierra reducida y aislamiento sencillo de ventanas).
- Alternativa L: Alt. 4 (aislamiento total de ventanas).
- Alternativa M: Alt. 2.1 + Alt. 4 (refuerzo de firme poroso y aislamiento sencillo de ventanas).
- Alternativa N: Alt. 2.2 + Alt. 4 (refuerzo de firme mejorado con caucho y aislamiento sencillo de ventanas).
- Alternativa Ñ: Alt. 3.2 + Alt. 4 (semáforo de control de velocidad y aislamiento completo de ventanas).

Se cuenta, por tanto, con un total de 15 alternativas, para las que se deberán calcular en primer lugar los valores que adoptan los atributos que son tenidos en cuenta para el análisis multicriterio.

6.3.2. Evaluación de criterios e indicadores.

Para cada una de las 15 alternativas planteadas se han diseñado las soluciones que las definen al nivel que corresponde a la etapa de planificación en que se desarrolla la elaboración de un PAR. Para ello el planteamiento de las alternativas se ha centrado en aquellos datos que son necesarios para calcular el valor de los indicadores especificados para el conjunto de criterios que finalmente fueron introducidos en la metodología.

De este modo, en la tabla 6.6 se han resumido los valores de estos indicadores para todas las alternativas, pero antes se comentan algunos **aspectos comunes a todas o varias de las alternativas al respecto de determinados criterios**:

- En todas las alternativas el subcriterio de permeabilidad territorial (PERM) es nulo, es decir, no hay variación en las distancias que deben recorrer los usuarios para acceder a la carretera, puesto que no existen accesos para vehículos al tramo de carretera estudiado ni tampoco hay tránsito peatonal a través de la carretera debido a su disposición en terraplén con barreras de seguridad y vías de servicio a ambos lados, mientras que la parcela donde se construiría el dique de tierra también se encuentra vallada y, por tanto, sin posibilidad de acceso que pudiera verse afectado. Por tanto, las posibles consecuencias negativas a la permeabilidad territorial son inexistentes por todas las opciones estudiadas (el semáforo, los refuerzos de firme y el aislamiento obviamente tampoco influyen).
- También en todas las alternativas el subcriterio de visibilidad (VIS) es igual a cero, o sea, la distancia de visibilidad existente en el tramo no se ve afectada por las soluciones estudiadas. Esto es así debido a que el trazado en planta y en alzado es muy suave, y la implantación de las barreras acústicas que serían las

únicas que podrían disminuir la visibilidad no tienen efecto al respecto ya que en el carril sentido hacia Almería junto al que se construirían describe curva hacia la izquierda, de modo que la visual no se vería interrumpida por las nuevas estructuras.

- Y el tercer subcriterio de afección territorial, el de la velocidad (VEL), como ya se explicó, presentará valores no nulos solo en las alternativas que incluyan la instalación del semáforo, que es la única actuación que tendrá efectos significativos sobre la velocidad de los vehículos, ya que los refuerzos de firme podrían derivar un cierto aumento de la velocidad, pero que en este caso, debido a la disposición del tramo entre dos intersecciones relativamente cercanas y reguladas mediante glorietas, no se estima importante. El resto de soluciones, al no influir directamente en la calzada de la carretera, tampoco afectan a la velocidad del tráfico.
- En cuanto al subcriterio de coste de inversión (INV) cabe decir que, aparte de la obra o coste que tiene propiamente cada medida, solo existen costes derivados de las expropiaciones en las alternativas que incluyen la construcción de la berma de tierra (completa o reducida), mientras que las demás se desarrollarían sobre el propio dominio público de la carretera o, en el caso del aislamiento de las ventanas, se gestionaría mediante subvención directa a los afectados. Cabe destacar que los terrenos sobre los que se ubicaría la berma de tierra tienen consideración urbanística de suelo urbano de Huércal de Almería, aunque carecen de estudio de planeamiento de detalle y, por tanto, no están urbanizados ni desarrollados, pero a efectos de la valoración que debe realizarse de acuerdo con la Ley del Suelo actualmente vigente esta circunstancia debería tenerse en cuenta, de ahí que el justiprecio calculado para la expropiación necesaria sea elevado (15 €/m²) [RDL 2/2008, 2008].

La valoración económica de la implantación de las distintas alternativas se ha realizado midiendo sus partidas correspondientes (que en el caso del aislamiento consistieron en la superficie de las ventanas de las viviendas afectadas) y aplicando los precios habituales existentes en obra civil y, en concreto para las medidas antirruído, los costes reflejados en la tabla 5.3.

- En relación al subcriterio de costes de conservación (CONS), no se debe olvidar que deben contabilizarse todos los gastos de conservación ordinaria que generaría el tramo tras la implantación de la medida antirruído. Es decir, no solo es el propio mantenimiento de la opción en concreto, sino también de los demás elementos del tramo, para poder contemplar los valores relativos entre alternativas. A este respecto alcanza especial significación el mantenimiento del pavimento y la señalización horizontal, al cual las alternativas que incluyen el refuerzo del firme del tramo redundarán en menores costes de conservación de los mismos al haberse renovado sus características, mientras que en aquellas alternativas que no actúan directamente sobre la calzada de la carretera deben contabilizarse aquellos costes de mantenimiento adicionales debidos a que el pavimento y la pintura del tramo no han sido renovados.

Por otro lado, también cabe destacar que los costes de conservación directos derivados de elementos como las pantallas, el dique de tierra o el aislamiento acústico son o nulos o muy reducidos, por lo que su influencia en este subcriterio es escasa.

- Finalizando dentro del criterio económico, destaca también que solo existen valores no nulos de costes de funcionamiento (FUNC) para las alternativas que suponen la implantación del semáforo o el levantamiento del dique de tierra, ya que las demás soluciones no exigen actuaciones durante su vida útil en cuestión de electricidad, jardinería, gestión, etc., que se sumen a las labores de conservación propias de la carretera. Así, en el caso de la medida de gestión del tráfico hay que tener en cuenta el gasto que supone anualmente la electricidad que precisan los semáforos instalados (contabilizando el consumo eléctrico de las lámparas LED que componen todas las unidades instaladas) y para el dique de tierra los costes de riego (14 veces al año), escarda y abonado (1 vez al año) y limpieza (3 veces al año) de las especies plantadas sobre él.
- El subcriterio de seguridad vial (SEG) evidencia invariabilidad de los accidentes en el tramo cuando se trata de actuaciones fuera de la propia carretera, es decir, las alternativas que incluyen solo la berma de tierra (con o sin pantalla) o el aislamiento de ventanas o la combinación de estas dos. Puesto que se debe realizar una prognosis de la influencia de las alternativas sobre el

número de accidentes estableciendo una comparativa respecto de la situación actual, merece la pena hacer referencia a la accidentalidad que presenta en estos momentos la carretera.

Así, los datos de seguridad vial del tramo de carretera estudiado evidencian que en los últimos cinco años se han producido solo 3 accidentes, con un saldo de 5 heridos leves y 1 víctima mortal, debido fundamentalmente a colisión entre vehículos en marcha a causa de factores concurrentes de distracción de los conductores y velocidad inadecuada.

Por tanto, al no tener representatividad los accidentes por salida de vía en cuya gravedad influye la barrera de seguridad y los elementos adyacentes a la calzada, se deduce que la instalación de una pantalla acústica no va a tener influencia sobre este indicador y, por tanto, no modifica el valor del subcriterio (además todo el tramo posee barrera de seguridad a ambos lados). Por su parte, las actuaciones de refuerzo de firme tienen una influencia positiva en la seguridad vial por la propia mejora de la capa de rodadura de la carretera y la renovación de la señalización horizontal, efectos que son potenciados en el caso de los firmes porosos al aumentar la adherencia de los vehículos y evitar el “aquaplaning” [Llamas Rubio *et al.*, 2008]. Sin embargo, a efectos de seguridad vial la instalación de un semáforo en un tramo de carretera interurbano y ante la tipología y causas de los accidentes dados en el tramo estudiado se valora negativamente, pues puede aumentar la posibilidad de que se dé mayor número de alcances.

- El subcriterio de molestia de los ciudadanos (MOL) se ha calculado según fue definido a partir de la ecuación 1.8 teniendo en cuenta la reducción de L_{den} alcanzado con las alternativas respecto del valor de referencia actual más desfavorable (75 dB(A)). Para evidenciar el inconveniente principal destacado en relación al aislamiento de viviendas contra el ruido, que como se vio en el apartado 5.2 es el hecho de que se corrige la situación interior de las edificaciones pero la situación molesta del ruido se mantiene en exteriores e incluso penetra en las viviendas al abrir las ventanas, en el cálculo de este subcriterio no se ha tenido en cuenta la reducción del nivel sonoro equivalente propiciada exclusivamente por el aislamiento, ya que la molestia general debido

al ruido persiste aunque se corrija la situación acústica en el interior de las viviendas.

- En cuanto al criterio ambiental (AMB) cabe recordar que se realizará una valoración de los tres impactos identificados como subcriterios según la práctica habitual de los estudios de evaluación ambiental (con factores de impacto de compatible, moderado, severo o crítico valorados de 1 a 4 respectivamente, y factor 0 en caso de impacto positivo) y ponderados de acuerdo con los pesos encontrados en el capítulo 5 para ellos.
- Finalmente, para el criterio de corrección funcional (CORR) se contabilizará la reducción sonora para cada dato de los intervalos en que los MER arrojan sus resultados para los cuatro indicadores implicados (superficie, viviendas, personas y centros sensibles) y se sumará su influencia total en cada subcriterio. A este respecto cabe destacar cómo en la superficie no existe mejora por parte del aislamiento de ventanas como tampoco la hay en la franja de superficie más cercana a la carretera debido exclusivamente al dique de tierra por su propia disposición alejada de propia calzada. Para los demás se ha realizado igualmente una estimación de la reducción del indicador en cada franja de decibelios multiplicado por la disminución conseguida de $L_{\text{día}}$ para cada alternativa (ya que es el indicador de ruido más desfavorable).

A partir de los datos recogidos en la tabla 6.6, se procede, en primer lugar a la normalización de los valores de todas las alternativas por cada indicador y, seguidamente, de acuerdo con las ponderaciones relativas obtenidas en el capítulo anterior para cada subcriterio respecto del criterio del que forman parte (tabla 5.8), se agregan y así se alcanzan las evaluaciones que corresponden a cada alternativa respecto de cada criterio. Estos valores, en notación porcentual al estar ya normalizados (puesto que las ponderaciones de los subcriterios están igualmente normalizadas), se resumen en la tabla 6.7, en la que, además, se ha recordado el carácter de coste (C) o beneficio (B) que posee cada criterio respecto del objetivo buscado, ya que es fundamental para su tratamiento posterior en la aplicación de los métodos de análisis multicriterio propuestos para la metodología.

6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA. CASOS DE ESTUDIO

Tabla 6.6: Valores de los indicadores de los subcriterios analizados para las alternativas planteadas en la carretera A-1000. Fuente: elaboración propia.

| E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | Ñ |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| <i>Dique + RF drenante</i> | <i>Pantalla + RF caucho</i> | <i>Dique + RF caucho</i> | <i>Pantalla + semáforo</i> | <i>Dique + semáforo</i> | <i>Pantalla + aislamiento</i> | <i>Dique + aislamiento</i> | <i>Aislamiento</i> | <i>RF drenante + aislamiento</i> | <i>RF caucho + aislamiento</i> | <i>Semáforo + aislamiento</i> |
| 62,5 | 59,5 | 65 | 65 | 67,5 | 62,5 | 62,5 | 65 | 65 | 62 | 62,5 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 |
| 236.957,61 | 421.457,16 | 238.341,16 | 421.465,92 | 238.349,93 | 755.924,44 | 572.808,44 | 470.436,20 | 411.109,12 | 412.493,89 | 509.457,89 |
| 102.570,00 | 0,00 | 102.570,00 | 0,00 | 102.570,00 | 0,00 | 102.570,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2042,24 | 848,71 | 848,71 | 5.791,75 | 5.791,75 | 4.500,00 | 4.500,00 | 0,00 | 3.042,24 | 848,71 | 5.791,75 |
| 4.076,07 | 0,00 | 4.076,07 | 112,34 | 4.188,41 | 0,00 | 4.076,07 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 112,34 |
| -50 | -50 | -50 | +30 | +30 | 0 | 0 | 0 | -62 | -50 | +30 |
| 21,324 | 24,983 | 24,983 | 17,860 | 17,860 | 14,007 | 14,007 | 0,000 | 9,753 | 14,809 | 5,088 |
| 0 | 0 | 0 | 2,5 | 1,5 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 2,5 |
| 1 | 1,5 | 1 | 1,5 | 1 | 1,5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1,5 | 2,5 | 1,5 | 2,5 | 1,5 | 2,5 | 1,5 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 9,2 | 10,22 | 10,16 | 8,7 | 9,1 | 4,8 | 8,3 | 0 | 7,8 | 8,76 | 3,9 |
| 120 | 124 | 126 | 115 | 120 | 120 | 125 | 120 | 120 | 126 | 125 |
| 350 | 368,5 | 368 | 335 | 350 | 350 | 365 | 350 | 350 | 371 | 365 |
| 5 | 5 | 5 | 2,5 | 2,5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |

| CRITERIOS | | SUBCRITERIOS ↓ | | L _{día} después | ALTERNATIVAS → | | | |
|----------------------------------|------|-----------------------------|------|--------------------------|----------------------|-------------------|----------------------------------|--|
| | | | | | A <i>Pantalla</i> | B <i>Dique</i> | C <i>Dique + pantalla</i> | D <i>Pantalla + RF drenante</i> |
| | | | | | 64 | 65 | 63,5 | 62,5 |
| Afección a la infraestructura | INFR | Permeabilidad | PERM | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | Visibilidad | VIS | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | Velocidad | VEL | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Coste | COST | Inversión | INV | Obra | 571.135,15 | 324.570,78 | 581.772,47 | 420.073,61 |
| | | | | Expropiaciones | 0,00 | 141.930,00 | 102.570,00 | 0,00 |
| | | Conservación | CONS | | 4.500,00 | 4.500,00 | 4,500,00 | 3.042,24 |
| | | Funcionamiento | FUNC | | 0,00 | 4.076,07 | 4.076,07 | 0,00 |
| Social | SOC | Seguridad vial | SEG | | 0 | 0 | -62 | -62 |
| | | Molestias de los ciudadanos | MOL | | 19,292 | 17,860 | 19,984 | 21,324 |
| Ambiental | AMB | Aire | AIR | | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | | Iluminación / visión | ILUM | | 2,5 | 1 | 1 | 1,5 |
| | | Paisaje | PAIS | | 3,5 | 2,5 | 3 | 2,5 |
| Corrección funcional | CORR | Superficie | SUP | | 8,88 | 9 | 9 | 9,22 |
| | | Viviendas | VIV | | 116 | 120 | 120 | 118 |
| | | Personas | PERS | | 339 | 350 | 350 | 344 |
| | | Centros sensibles | CS | | 0 | 0 | 0 | 5 |

Tabla 6.7: Valores normalizados de los criterios para todas las alternativas planteadas en la carretera A-1000. Fuente: elaboración propia.

| | CRITERIOS | INFR | COST | SOC | AMB | CORR |
|--------------|---------------------------|------|-------|-------|-------|------|
| | CARÁCTER | C | C | B | C | B |
| ALTERNATIVAS | | | | | | |
| A | Pantalla | 6,31 | 6,14 | 5,89 | 12,08 | 4,39 |
| B | Dique | 6,31 | 9,84 | 5,63 | 5,69 | 4,53 |
| C | Dique + pantalla | 6,31 | 11,01 | 6,01 | 6,37 | 4,53 |
| D | Pantalla + RF drenante | 6,31 | 4,33 | 11,28 | 8,41 | 7,39 |
| E | Dique + RF drenante | 6,31 | 8,16 | 11,28 | 4,34 | 7,46 |
| F | Pantalla + RF caucho | 6,31 | 2,85 | 10,96 | 6,85 | 7,69 |
| G | Dique + RF caucho | 6,31 | 6,67 | 10,96 | 4,34 | 7,71 |
| H | Pantalla + semáforo | 8,11 | 6,33 | 3,20 | 10,76 | 5,80 |
| I | Dique + semáforo | 8,11 | 10,16 | 3,20 | 6,69 | 5,99 |
| J | Pantalla + aislamiento | 6,31 | 7,14 | 4,94 | 8,41 | 7,29 |
| K | Dique + aislamiento | 6,31 | 10,96 | 4,94 | 4,34 | 7,60 |
| L | Aislamiento | 6,31 | 2,53 | 2,43 | 5,23 | 7,10 |
| M | RF drenante + aislamiento | 6,31 | 4,29 | 9,20 | 5,23 | 7,41 |
| N | RF caucho + aislamiento | 6,31 | 2,80 | 9,14 | 3,67 | 7,68 |
| Ñ | Semáforo + aislamiento | 8,11 | 6,81 | 0,91 | 7,57 | 7,43 |

6.3.3. Aplicación de los métodos propuestos.

Como se justificó en capítulos anteriores, se determinó utilizar en la metodología como propuesta de métodos de análisis multicriterio para obtener las alternativas idóneas contra el ruido debido al tráfico de un tramo concreto de carretera los tres siguientes: suma ponderada, ELECTRE y TOPSIS. Para aplicarlos se parte de las evaluaciones de las alternativas respecto de cada criterio (tabla 6.7) y de los pesos asignados a cada criterio como resultado del estudio realizado (tabla 5.8).

Comenzando, por tanto, por el primero de ellos, no debe perderse de vista, antes de realizar **la suma ponderada** de los valores de los criterios, que algunos de ellos son de

6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA. CASOS DE ESTUDIO

carácter «coste» y otros de carácter «beneficio». Así, previamente es necesario convertirlos todos los criterios a tipo beneficio para que así las sumas obtenidas den un resultado que cuanto mayor sea mejor valoración suponga para cada alternativa.

De este modo, en la tabla 6.8 se presentan las evaluaciones ponderadas de este modo y el resultado de su agregación para cada alternativa.

Tabla 6.8: Aplicación del método de la suma ponderada a las alternativas planteadas a la carretera A-1000.

Fuente: elaboración propia.

| | | CRITERIOS | INFR | COST | SOC | AMB | CORR | SUMA |
|--------------|---------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| | | PESO | 15,79% | 16,51% | 23,83% | 15,34% | 28,53% | PONDE- RADA |
| ALTERNATIVAS | | | | | | | | |
| A | Pantalla | 1,10 | 0,95 | 1,40 | 0,50 | 1,25 | 5,21 | |
| B | Dique | 1,10 | 0,59 | 1,34 | 1,07 | 1,29 | 5,40 | |
| C | Dique + pantalla | 1,10 | 0,53 | 1,43 | 0,96 | 1,29 | 5,31 | |
| D | Pantalla + RF drenante | 1,10 | 1,35 | 2,69 | 0,72 | 2,11 | 7,97 | |
| E | Dique + RF drenante | 1,10 | 0,72 | 2,69 | 1,40 | 2,13 | 8,03 | |
| F | Pantalla + RF caucho | 1,10 | 2,05 | 2,61 | 0,89 | 2,19 | 8,84 | |
| G | Dique + RF caucho | 1,10 | 0,87 | 2,61 | 1,40 | 2,20 | 8,19 | |
| H | Pantalla + semáforo | 0,86 | 0,92 | 0,76 | 0,57 | 1,66 | 4,76 | |
| I | Dique + semáforo | 0,86 | 0,57 | 0,76 | 0,91 | 1,71 | 4,82 | |
| J | Pantalla + aislamiento | 1,10 | 0,82 | 1,18 | 0,72 | 2,08 | 5,90 | |
| K | Dique + aislamiento | 1,10 | 0,53 | 1,18 | 1,40 | 2,17 | 6,38 | |
| L | Aislamiento | 1,10 | 2,30 | 0,58 | 1,16 | 2,03 | 7,18 | |
| M | RF drenante + aislamiento | 1,10 | 1,36 | 2,19 | 1,16 | 2,11 | 7,93 | |
| N | RF caucho + aislamiento | 1,10 | 2,08 | 2,18 | 1,66 | 2,19 | 9,21 | |
| Ñ | Semáforo + aislamiento | 0,86 | 0,86 | 0,22 | 0,80 | 2,12 | 4,86 | |

Según estos resultados el orden de las alternativas de mejor a peor de acuerdo con este método es el que se muestra en la tabla 6.9.

El siguiente método en aplicar es el **ELECTRE**. Tomando los datos de partida se siguen los pasos descritos en el apartado 2.6.2, diferenciando también aquellos criterios que buscan ser minimizados y los que buscan ser maximizados a la hora de evaluar cada alternativa respecto de ellos. En las siguientes tablas se presentan las matrices de índices de

concordancia y de índices de discordancia y las matrices de dominancia concordante, de dominancia discordante y de dominancia agregada.

Tabla 6.9: Ordenación de alternativas planteadas a la carretera A-1000 según el método de la suma ponderada. Fuente: elaboración propia.

| ORDEN | ALTERNATIVAS | | VALOR DE AGREGACIÓN |
|-------|--------------|---------------------------|---------------------|
| 1 | N | RF caucho + aislamiento | 9,21% |
| 2 | F | Pantalla + RF caucho | 8,84% |
| 3 | G | Dique + RF caucho | 8,19% |
| 4 | E | Dique + RF drenante | 8,03% |
| 5 | D | Pantalla + RF drenante | 7,97% |
| 6 | M | RF drenante + aislamiento | 7,93% |
| 7 | L | Aislamiento | 7,18% |
| 8 | K | Dique + aislamiento | 6,38% |
| 9 | J | Pantalla + aislamiento | 5,90% |
| 10 | B | Dique | 5,40% |
| 11 | C | Dique + pantalla | 5,31% |
| 12 | A | Pantalla | 5,21% |
| 13 | Ñ | Semáforo + aislamiento | 4,86% |
| 14 | I | Dique + semáforo | 4,82% |
| 15 | H | Pantalla + semáforo | 4,76% |

Tabla 6.10: Matriz de índices de concordancia de aplicación del método ELECTRE a las alternativas planteadas a la carretera A-1000. Fuente: elaboración propia.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | Ñ |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A | | 0,482 | 0,244 | 0,079 | 0,244 | 0,079 | 0,244 | 0,561 | 0,561 | 0,482 | 0,482 | 0,317 | 0,079 | 0,079 | 0,561 |
| B | 0,518 | | 0,540 | 0,232 | 0,079 | 0,232 | 0,079 | 0,550 | 0,715 | 0,471 | 0,482 | 0,317 | 0,079 | 0,079 | 0,550 |
| C | 0,756 | 0,460 | | 0,232 | 0,079 | 0,232 | 0,079 | 0,550 | 0,550 | 0,471 | 0,317 | 0,317 | 0,079 | 0,079 | 0,550 |
| D | 0,921 | 0,768 | 0,768 | | 0,363 | 0,317 | 0,482 | 1,000 | 0,847 | 0,844 | 0,482 | 0,603 | 0,317 | 0,317 | 0,561 |
| E | 0,756 | 0,921 | 0,921 | 0,637 | | 0,471 | 0,394 | 0,835 | 1,000 | 0,756 | 0,559 | 0,756 | 0,756 | 0,317 | 0,835 |
| F | 0,921 | 0,768 | 0,768 | 0,683 | 0,529 | | 0,363 | 1,000 | 0,847 | 0,921 | 0,768 | 0,603 | 0,768 | 0,603 | 1,000 |
| G | 0,756 | 0,921 | 0,921 | 0,518 | 0,606 | 0,637 | | 0,835 | 1,000 | 0,921 | 0,844 | 0,756 | 0,756 | 0,603 | 1,000 |
| H | 0,439 | 0,450 | 0,450 | 0,000 | 0,165 | 0,000 | 0,165 | | 0,363 | 0,165 | 0,165 | 0,238 | 0,000 | 0,000 | 0,482 |
| I | 0,439 | 0,285 | 0,450 | 0,153 | 0,000 | 0,153 | 0,000 | 0,637 | | 0,153 | 0,165 | 0,238 | 0,000 | 0,000 | 0,471 |
| J | 0,518 | 0,529 | 0,529 | 0,156 | 0,244 | 0,079 | 0,079 | 0,835 | 0,847 | | 0,363 | 0,603 | 0,079 | 0,079 | 0,396 |
| K | 0,518 | 0,518 | 0,683 | 0,518 | 0,441 | 0,232 | 0,156 | 0,835 | 0,835 | 0,637 | | 0,756 | 0,518 | 0,079 | 0,835 |
| L | 0,683 | 0,683 | 0,683 | 0,397 | 0,244 | 0,397 | 0,244 | 0,762 | 0,762 | 0,397 | 0,244 | | 0,321 | 0,244 | 0,715 |
| M | 0,921 | 0,921 | 0,921 | 0,683 | 0,244 | 0,232 | 0,244 | 1,000 | 1,000 | 0,921 | 0,482 | 0,679 | | 0,317 | 0,715 |
| N | 0,921 | 0,921 | 0,921 | 0,683 | 0,683 | 0,397 | 0,397 | 1,000 | 1,000 | 0,921 | 0,921 | 0,756 | 0,683 | | 1,000 |
| Ñ | 0,439 | 0,450 | 0,450 | 0,439 | 0,165 | 0,000 | 0,000 | 0,518 | 0,529 | 0,604 | 0,165 | 0,285 | 0,285 | 0,000 | |

6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA. CASOS DE ESTUDIO

Tabla 6.11: Matriz de índices de discordancia de aplicación del método ELECTRE a las alternativas planteadas a la carretera A-1000. Fuente: elaboración propia.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | Ñ | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,629 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,732 |
| B | 0,623 | | 0,469 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,744 | 0,722 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,736 |
| C | 0,917 | 1,000 | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,624 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,681 |
| D | 0,000 | 0,310 | 0,250 | | 0,989 | 1,000 | 1,000 | 0,148 | 0,138 | 0,000 | 0,414 | 0,232 | 0,988 | 1,000 | 1,000 | 0,052 |
| E | 0,259 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | | 1,000 | 1,000 | 0,157 | 0,148 | 0,112 | 0,027 | 0,441 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,090 |
| F | 0,000 | 0,140 | 0,055 | 0,307 | 0,439 | | 0,610 | 0,154 | 0,014 | 0,000 | 0,268 | 0,122 | 0,594 | 1,000 | 1,000 | 0,030 |
| G | 0,073 | 0,000 | 0,000 | 0,618 | 0,307 | 1,000 | | 0,030 | 0,154 | 0,000 | 0,000 | 0,336 | 0,940 | 1,000 | 1,000 | 0,009 |
| H | 1,000 | 1,000 | 0,872 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | | 0,989 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,895 |
| I | 0,801 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| J | 0,273 | 0,530 | 0,398 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,312 | 0,531 | | 0,989 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,134 |
| K | 0,670 | 0,212 | 0,291 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,776 | 0,289 | 1,000 | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,714 |
| L | 0,784 | 0,633 | 0,610 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,217 | 0,146 | 0,788 | 0,430 | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,133 |
| M | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,773 | 1,000 | 1,000 | 0,199 | 0,156 | 0,000 | 0,123 | 0,179 | | 1,000 | 1,000 | 0,004 |
| N | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,700 | 0,576 | 0,890 | 0,680 | 0,201 | 0,201 | 0,000 | 0,000 | 0,028 | 0,064 | | 1,000 | 0,036 |
| Ñ | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,987 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Tabla 6.12: Matriz de dominancia concordante de aplicación del método ELECTRE a las alternativas planteadas a la carretera A-1000. Fuente: elaboración propia.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | Ñ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| B | 1 | | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| C | 1 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| D | 1 | 1 | 1 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| E | 1 | 1 | 1 | 1 | | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| F | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| G | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| H | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| J | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| K | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 0 | 1 |
| L | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 1 |
| M | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | | 0 | 1 |
| N | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 |
| Ñ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 6.13: Matriz de dominancia discordante de aplicación del método ELECTRE a las alternativas planteadas a la carretera A-1000. Fuente: elaboración propia.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | Ñ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B | 1 | | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D | 1 | 1 | 1 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| E | 1 | 1 | 1 | 0 | | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| F | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| G | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| H | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| J | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| K | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| L | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | | 0 | 0 | 1 |
| M | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 0 | 1 |
| N | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 |
| Ñ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

Tabla 6.14: Matriz de dominancia agregada de aplicación del método ELECTRE a las alternativas planteadas a la carretera A-1000. Fuente: elaboración propia.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | Ñ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B | 1 | | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D | 1 | 1 | 1 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| E | 1 | 1 | 1 | 0 | | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| F | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| G | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| H | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| J | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| K | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| L | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 1 |
| M | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | | 0 | 1 |
| N | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 |
| Ñ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

Para determinar las alternativas idóneas, es decir, las que forman el núcleo del conjunto de ellas debe realizarse el grafo ELECTRE, que se presenta en la figura 6.30. Pese a la maraña de líneas que se generan debido al elevado número de alternativas analizadas, puede determinarse fácilmente el núcleo del grafo, es decir, el grupo de alternativas que no son dominadas por ninguna otra, y que han sido destacadas en la figura.

Así, el conjunto de alternativas idóneas es el compuesto por las denominadas F, G y N. Para poder elaborar una ordenación completa de las alternativas de la más a la menos idónea según este método de análisis multicriterio, puede realizarse a partir de unos indicadores que muestran el grado de sobreclasificación de las alternativas, es decir, observando que serán preferibles cuantos menos arcos lleguen a ellas y más partan de ellas en el grafo ELECTRE o, lo que es lo mismo, más valores 1 presenten en la matriz de dominancia agregada por filas y más valores 0 tengan en dicha matriz por columnas. De esta manera, sumando por filas y por columnas los elementos de esta matriz pueden obtenerse unos índices que permiten ordenar las alternativas por idoneidad para alcanzar el objetivo marcado según los criterios evaluados y los pesos obtenidos del estudio anteriormente llevado a cabo.

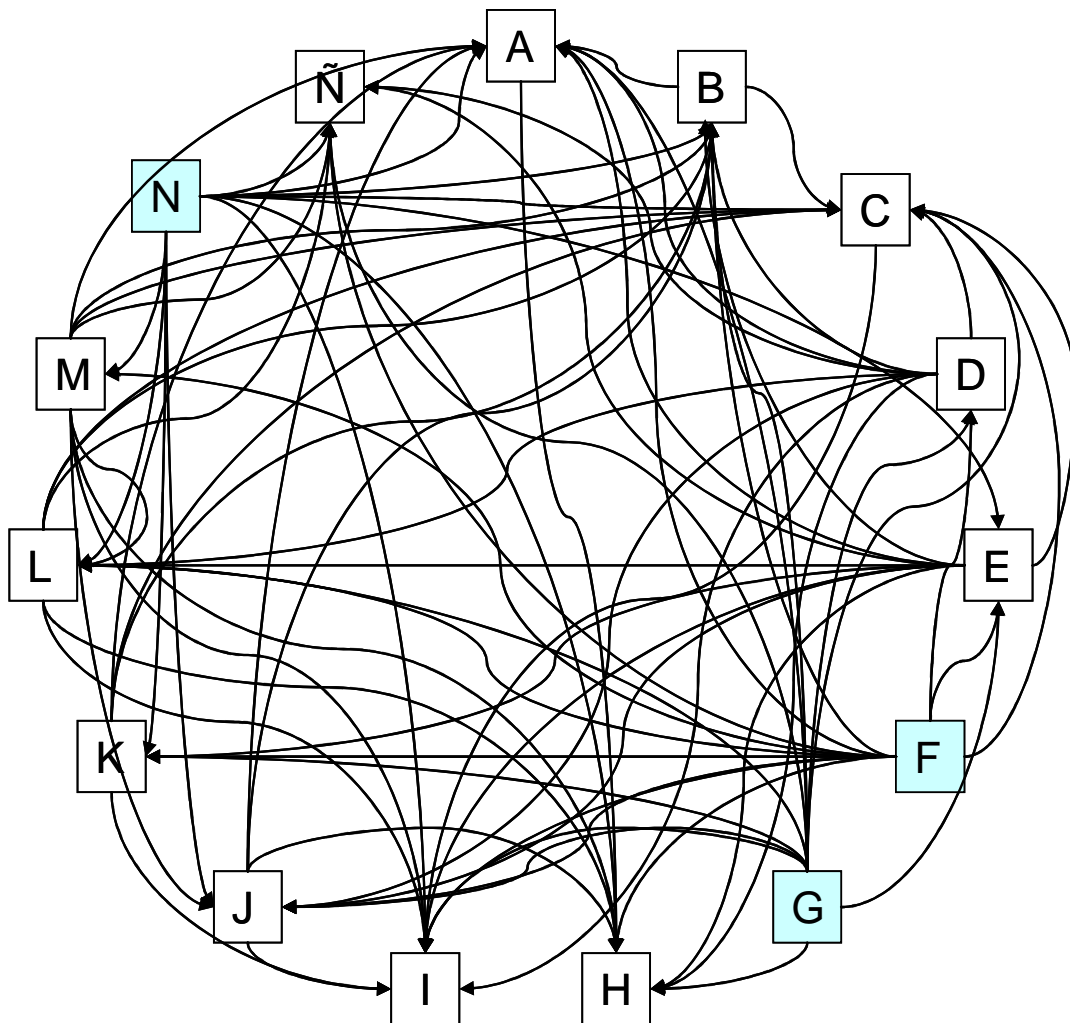


Figura 6.30: Grafo ELECTRE aplicado a las alternativas planteadas en la carretera A-1000. Fuente: elaboración propia.

Siendo así, el orden que arroja este método es el que se presenta en la tabla 6.14. Puede comprobarse que la ordenación no es completa y existen algunas alternativas que aparecen en la misma posición, ya que los valores que alcanzan en ellas los dos indicadores mostrados son iguales. Por tanto, se trata de un orden aproximado.

Tabla 6.15: Ordenación de alternativas planteadas a la carretera A-1000 según el método ELECTRE.

Fuente: elaboración propia.

| ORDEN | ALTERNATIVAS | | Nº DE ALTERNATIVAS QUE LA DOMINAN | Nº DE ALTERNATIVAS QUE DOMINA |
|-------|--------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1 | F | Pantalla + RF caucho | 0 | 12 |
| 2 | G | Dique + RF caucho | 0 | 11 |
| 2 | N | RF caucho + aislamiento | 0 | 11 |
| 4 | D | Pantalla + RF drenante | 2 | 8 |
| 4 | M | RF drenante + aislamiento | 2 | 8 |
| 6 | E | Dique + RF drenante | 3 | 9 |
| 7 | K | Dique + aislamiento | 4 | 4 |
| 8 | J | Pantalla + aislamiento | 6 | 5 |
| 8 | L | Aislamiento | 6 | 5 |
| 10 | Ñ | Semáforo + aislamiento | 7 | 0 |
| 11 | H | Pantalla + semáforo | 8 | 0 |
| 12 | B | Dique | 9 | 2 |
| 13 | A | Pantalla | 9 | 1 |
| 14 | C | Dique + pantalla | 10 | 1 |
| 15 | I | Dique + semáforo | 10 | 0 |

Y, finalmente, se aplica el método **TOPSIS**, para el que, partiendo de los mismos datos que en los anteriores, se procede según la metodología descrita en el apartado 2.7.2. No hay que olvidar que al construir las soluciones ideal y antiideal hay que tener en cuenta

6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA. CASOS DE ESTUDIO

el carácter de los criterios según representen un «coste» o un «beneficio». Como resultados más característicos de las operaciones llevadas a cabo se presentan a continuación las distancias a las soluciones ideales de cada alternativa y, por último, el cálculo de la proximidad relativa a las soluciones ideales mediante el ratio de similaridad al ideal.

Tabla 6.16: Aplicación del método TOPSIS a las alternativas planteadas a la carretera A-1000. Fuente: elaboración propia.

| ALTERNATIVAS | | DISTANCIA A SOLUCIÓN IDEAL POSITIVA | DISTANCIA A SOLUCIÓN IDEAL NEGATIVA | RATIO DE SIMILARIDAD AL IDEAL |
|--------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| A | Pantalla | 0,021 | 0,015 | 0,406 |
| B | Dique | 0,020 | 0,015 | 0,428 |
| C | Dique + pantalla | 0,021 | 0,015 | 0,418 |
| D | Pantalla + RF drenante | 0,008 | 0,029 | 0,786 |
| E | Dique + RF drenante | 0,009 | 0,029 | 0,758 |
| F | Pantalla + RF caucho | 0,005 | 0,030 | 0,859 |
| G | Dique + RF caucho | 0,007 | 0,029 | 0,809 |
| H | Pantalla + semáforo | 0,024 | 0,010 | 0,306 |
| I | Dique + semáforo | 0,024 | 0,011 | 0,313 |
| J | Pantalla + aislamiento | 0,018 | 0,016 | 0,457 |
| K | Dique + aislamiento | 0,021 | 0,018 | 0,467 |
| L | Aislamiento | 0,021 | 0,020 | 0,480 |
| M | RF drenante + aislamiento | 0,006 | 0,027 | 0,809 |
| N | RF caucho + aislamiento | 0,005 | 0,029 | 0,849 |
| Ñ | Semáforo + aislamiento | 0,027 | 0,013 | 0,330 |

Realizando una sencilla operación de ordenación respecto de los valores obtenidos del ratio de similaridad puede alcanzarse un orden según idoneidad de las alternativas a partir de las premisas del método de análisis multicriterio TOPSIS.

Tabla 6.17: Ordenación de alternativas planteadas a la carretera A-1000 según el método TOPSIS. Fuente: elaboración propia.

| ORDEN | ALTERNATIVAS | | VALOR DEL RATIO DE SIMILARIDAD |
|-------|--------------|---------------------------|--------------------------------|
| 1 | F | Pantalla + RF caucho | 0,8589 |
| 2 | N | RF caucho + aislamiento | 0,8491 |
| 3 | M | RF drenante + aislamiento | 0,8091 |
| 4 | G | Dique + RF caucho | 0,8087 |
| 5 | D | Pantalla + RF drenante | 0,7859 |
| 6 | E | Dique + RF drenante | 0,7576 |
| 7 | L | Aislamiento | 0,4804 |
| 8 | K | Dique + aislamiento | 0,4673 |
| 9 | J | Pantalla + aislamiento | 0,4572 |
| 10 | B | Dique | 0,4282 |
| 11 | C | Dique + pantalla | 0,4176 |
| 12 | A | Pantalla | 0,4060 |
| 13 | Ñ | Semáforo + aislamiento | 0,3303 |
| 14 | I | Dique + semáforo | 0,3133 |
| 15 | H | Pantalla + semáforo | 0,3058 |

Con estos resultados todas las alternativas han sido evaluadas y a partir de la aplicación de los métodos multicriterio propuestos se han obtenido las ordenaciones resultantes, por lo que se pueden comparar entre ellas y discutir sobre las propuestas que se derivarían de las mismas para la elaboración del PAR.

6.3.4. Discusión de resultados.

Al comparar los resultados obtenidos con cada uno de los tres métodos de análisis multicriterio elegidos para la metodología se observa que las ordenaciones propuestas difieren entre sí, aunque muestran igualmente semejanzas importantes.

Así, partiendo del núcleo elegido por el método ELECTRE como las alternativas no dominadas y, por tanto, idóneas según el mismo (F, G y N), es fácil ver que las tres se encuentran en la parte más alta de los dos listados ofrecidos por los otros métodos. De hecho, ELECTRE y TOPSIS coinciden en elegir como la mejor alternativa la F (pantalla +

refuerzo de firme de caucho), mientras que la suma ponderada escoge la N (aislamiento de ventanas + refuerzo de firme de caucho), que se encuentra situada como la segunda opción de los otros dos métodos, y deja como segunda mejor opción a la F. La alternativa G (dique + refuerzo de firme de caucho) es la tercera en idoneidad según la suma ponderada y la cuarta para TOPSIS, mientras que ELECTRE la presenta igualada con la N. A continuación, en el listado ELECTRE aparecen las alternativas D, M y E (aunque ya dominadas por las pertenecientes al núcleo), que son propuestas por la suma ponderada en los puestos 5º, 6º y 4º y por TOPSIS en los lugares 5º, 3º y 6º, respectivamente. Todas estas alternativas tienen como elemento común el pavimento silencioso (ya sea drenante o mejorado con caucho), combinado con los dos tipos de barreras acústicas estudiadas y el aislamiento sencillo de ventanas para reducir la afección a aquellos habitantes más expuestos.

Parece claro, por tanto, que **la mejor elección** está entre la F y la N, es decir, realizar el refuerzo de firme con pavimento mejorado con caucho y combinarlo bien con la pantalla acústica de una altura menor junto a la carretera o bien el aislamiento de 5 dB para las ventanas de las viviendas. Como se ve, además, estas alternativas son de las que ofrecen una situación acústica posterior a su implantación más reducida, pero también presentan otra ventaja importante respecto a otras que las hacen especialmente interesantes: pueden implantarse en **dos fases** claramente diferenciadas al tratarse de dos actuaciones independientes y no excluyentes, de modo que parecería lógico ejecutar el refuerzo de firme con pavimento fonoabsorbente en primer lugar, que redundaría en una reducción más general del ruido y además favorece a otros parámetros de la propia carretera como es su regularidad superficial y visibilidad de la señalización horizontal, y posteriormente ejecutar alguna de las otras dos acciones (entre las que incluso podría decidirse más adelante en virtud de una medición más detallada de la situación acústica del tramo y de las viviendas afectadas una vez evaluados los beneficios del pavimento silencioso, y así además afinar mejor las características y longitud de la pantalla o qué viviendas precisan aislamiento por continuar rebasando los objetivos de calidad acústica en su interior).

Por el lado bajo de las tablas, los tres métodos coinciden en ofrecer como **peores alternativas** las denotadas por H, I y Ñ, ya que sus indicadores son los más bajos para la

suma ponderada y TOPSIS mientras que ELECTRE pone en evidencia que no sobreclasifican a ninguna otra alternativa. Estas son las tres que incluyen el semáforo de control de la velocidad del tráfico (combinado con pantalla, dique y aislamiento de ventanas, respectivamente), lo cual es posible ver como un resultado también lógico ya que parece evidente que la colocación de un semáforo en un tramo de estas características ofrecería mayores inconvenientes al tráfico en general que los beneficios acústicos (escasos) que pueda llegar a tener.

Aparte, la metodología también deja fuera de elección la mayoría de las alternativas que contemplaban la construcción del dique de tierra sobre la franja de terreno entre la carretera y la travesía de la población. A priori también parece una recomendación acertada, puesto que los perjuicios que una obra de estas características generaría sobre estos terrenos urbanos pueden ser tan importantes a muchos niveles que la harían inviable. Sin embargo, inquieta pensar que en esta franja puedan levantarse viviendas tan cerca de una carretera de tales características de tráfico y que ya presenta un problema de ruido tan destacable, por lo que otra medida que puede resultar de los MER y el correspondiente PAR para este tramo de vía podría ser la obligación por parte de la Administración Autónoma a los promotores urbanísticos de dichos terrenos y al Ayuntamiento de Huércal de Almería de la adopción de las medidas necesarias para evitar la afección de población al ruido del tráfico. Una opción podría ser diseñar las viviendas disponiendo las habitaciones menos sensibles hacia la travesía en lugar de hacia la A-1000 y evitar la apertura de ventanas en dirección a la carretera o, como mínimo, disponerles de aislamiento acústico adecuado, de modo que la nueva población que resida en estos inmuebles no se vea afectada por el ruido y las nuevas edificaciones funcionen como barrera acústica respecto de las existentes. De este modo, en este punto adopta especial importancia la posibilidad de la Administración Autónoma de definir la correspondiente **servidumbre acústica** sobre dichos terrenos debido a la carretera, tal y como aparece definida en la legislación y fue citado en el apartado 1.3.

Por otro lado, resulta particularmente curioso observar la posición en que ha quedado la alternativa A, que recuérdese que es la **solución planteada por el PAR de Andalucía en 2008**, es decir, la pantalla acústica completa, puesto que en absoluto parece una opción recomendable a la vista de los resultados del análisis multicriterio. Este hecho

pone en evidencia que la costumbre de las Administraciones de proponer directamente y sin criterio soluciones de apantallamiento acústico junto a las carreteras que presentan problemas de afección de ruido no siempre es la mejor alternativa, lo que refuerza aún más la conveniencia de la aplicación de la metodología propuesta en esta tesis.

Por tanto, la metodología brinda al técnico redactor del PAR que se está estudiando un conjunto de alternativas consideradas más idóneas por los diferentes métodos de análisis multicriterio y eso le permitirá ofrecer al decisor una propuesta de elección de la mejor opción para el problema concreto. Por otro lado, también la metodología permite evidenciar que algunas alternativas que en principio podrían ser viables pero que adolecen de bastantes desventajas son marcadas por ella como no idóneas respecto a otras, de modo que también puede resultar muy útil de cara a decisores menos expertos en el tema o presiones de colectivos u personas en concreto sobre la adopción de alguna de estas soluciones para poder argüir ante ellos la inconveniencia de implantarlas. Es decir, la metodología sirve para ayudar al decisor tanto a **elegir entre las alternativas más idóneas** como para darle argumentos que faciliten el **rechazo a otras soluciones no adecuadas**.

En la decisión final, por supuesto, el decisor puede utilizar, además de las evidencias técnicas y numéricas objetivas que arroja la metodología y las que han servido para su desarrollo, aquellas circunstancias más relativas o menos cuantificables que permitan decantar la elección por una u otra alternativa, puesto que, además, se observa que los indicadores que originaron las ordenaciones presentan valores muy cercanos entre sí para estas alternativas más recomendables. La configuración final de la solución del tramo debe establecerse conjuntamente con los demás tramos del PAR y con todo ello generar una planificación temporal y presupuestaria de las medidas necesarias, ya que el hecho de proponer medidas similares a tramos cercanos (como el de la A-1051 en este caso de estudio) y la posibilidad de establecer fases de actuación diferenciadas en función de las actuaciones conjuntas escogidas para cada tramo (como se ha visto en este de la A-1000, que debería combinar el pavimento silencioso con otra medida) permite establecer un plan completo y coherente.

Además, es imprescindible que el PAR resultante esté coordinado con las **demás actuaciones planificadas** por la Administración competente, sobre todo en relación a

aquellas que afecten a los tramos incluidos en el mismo. Así, como se vio en el apartado 5.3.1, es muy importante atender paralelamente a aquellos proyectos u obras que puedan afectar a la situación acústica del tramo analizado, como pueden ser refuerzos de firme que estén previstos y que deberían coordinarse con la actuación planificada contra el ruido (más aun si cabe en este caso en que las alternativas idóneas incluyen el extendido de un pavimento silencioso), o por ejemplo medidas de gestión del tráfico a nivel más general (por ejemplo a una escala metropolitana en que se encuentra el tramo y que pudieran afectar, aunque en este caso es difícil al tratarse de una carretera interurbana y ya en variante). Pero el hecho que verdaderamente podría afectar es la construcción de una nueva carretera o vía que modificara las condiciones de tráfico del tramo estudiado y, por tanto, altere el problema de ruido detectado. En este caso puede destacarse la existencia de un anteproyecto aprobado por la Junta de Andalucía denominado «Acceso Norte a Almería desde el enlace de la A-7 en Viator», que prevé el desdoblamiento de la A-1000 en el subtramo 6 de los descritos en el apartado 6.1.4, para a partir del punto definido por la glorieta de La Juaida describir una nueva autovía en variante hacia Almería, entrando en su término municipal por la zona de Torrecárdenas. La ejecución de este proyecto conllevaría sin duda una reducción muy importante del tráfico en el subtramo estudiado de la A-1000, que quedaría fuera de este acceso principal a Almería, por lo que probablemente el problema del ruido existente en la actualidad podría incluso desaparecer. Así las cosas, es importante que la Administración pudiera tener claros los tiempos de estas obras por si hicieran innecesaria la actuación contra el ruido que debía incluirse en el PAR, de modo que si así fuera debería reflejarse correctamente en la planificación, estableciendo las líneas de coordinación pertinentes. En caso de que el nuevo acceso no pudiera estar en servicio antes de la finalización del período de vigencia del PAR, este debería incluir la alternativa escogida particularmente contra el ruido en la A-1000.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.

7.1. CONCLUSIONES.

Durante el transcurso de esta tesis se ha desarrollado una metodología de ayuda a la toma de decisiones en relación a la priorización de actuaciones contra el ruido debido al tráfico de las carreteras con el objetivo de proponer su aplicación a la elaboración de los Planes de Acción contra el Ruido derivados de los Mapas Estratégicos de Ruido que deben generar periódicamente las Administraciones titulares de las carreteras en cumplimiento de la Directiva Europea de Evaluación y Gestión del Ruido Ambiental.

La metodología propuesta ha sido elaborada a partir de un estudio detallado de la literatura científica relacionada y de la normativa de referencia, así como teniendo en cuenta el escenario donde se busca su aplicación, para asegurar un adecuado fundamento conceptual así como capacidad real de aplicabilidad. Estos son los dos pilares esenciales en los que se ha querido fundamentar la investigación y, en base a ellos, se ha desarrollado la propuesta buscada mediante las herramientas metodológicas más apropiadas de acuerdo al carácter del problema analizado, tanto desde el punto de vista de sus datos de partida y los resultados esperados como de los usuarios potenciales de la metodología y el ambiente en que se desarrolla la toma de decisiones.

Tras el desarrollo llevado a cabo en capítulos anteriores, este capítulo trata de sintetizar y recoger las principales conclusiones obtenidas en esta investigación, a la vista igualmente de los objetivos marcados en el presente documento.

En primer lugar se llevó a cabo un acercamiento al escenario en que tiene lugar la toma de decisiones, las carreteras, y más concretamente las de España (y Andalucía, donde luego se tomarían los casos de estudio), pues el problema que se aborda en cuanto al ruido es fruto de la situación actual como resultado de su evolución histórica, técnica y socioeconómica. A partir de la información analizada en esta Tesis Doctoral, pudo comprobarse que uno de los principales impactos medioambientales que presentan las infraestructuras viarias sobre los ciudadanos y el entorno es el ruido, ya que la red de carreteras se ha densificado, acercándose en muchos casos a las poblaciones, ha progresado

en características técnicas de trazado y rodadura, con lo que el tráfico y la velocidad de los vehículos ha crecido, así como la fracción de vehículos pesados, a todo lo cual también ha colaborado el desarrollo económico del país, con sus peculiares características. En este contexto, fue posible visualizar el problema del ruido en las carreteras, también desde el punto de vista físico y de las magnitudes e indicadores relacionados, que luego servirían para caracterizarlo y poder tratarlo conforme a la normativa de referencia a todos los niveles administrativos presentes en nuestro marco de actuación. De hecho, fueron analizados especialmente los conceptos de Mapa Estratégico de Ruido y Plan de Acción contra el Ruido y se estudiaron los casos reales existentes actualmente en España, especialmente su estructura, los principales datos relacionados con la investigación en curso y las destacadas deficiencias y conclusiones que orientaran las necesidades del objetivo buscado en la tesis. De este modo pudo comprobarse la falta generalizada de criterios de priorización de actuaciones en los Planes de Acción contra el Ruido, tanto a nivel de ordenación de tramos como de idoneidad de soluciones, para las cuales siempre era planteado un reducido espectro de alternativas posibles.

Todo ello puso en evidencia la necesidad de desarrollar una metodología de las características buscadas que se convirtiera principalmente en una herramienta útil al técnico redactor de un Plan de Acción contra el Ruido para afrontar los problemas que precisan solución al respecto de la toma de decisiones en la priorización de sus actuaciones.

Vista, pues, la necesidad de combinar determinados criterios y variables para abordar la toma de decisiones, así como la capital importancia de los pesos asignados a los diferentes parámetros en el proceso, en capítulos siguientes fueron analizadas las diferentes familias y clases de métodos de análisis multicriterio y de ponderación, de modo que a la luz de las peculiaridades del problema se seleccionaron aquellos más adecuados o representativos. Además, dada la complejidad de las decisiones que deben ser tomadas y el ambiente de incertidumbre reinante en el momento y forma de su adopción, se vio, en el caso de la asignación de pesos a las variables y criterios, como el planteamiento más correcto y práctico el utilizar la técnica de jerarquías analíticas en su vertiente difusa aplicada a los resultados obtenidos de unos paneles de expertos convenientemente

establecidos mediante encuestas a especialistas con la debida capacidad y relación con las cuestiones planteadas.

A partir de la aplicación de dichas herramientas metodológicas fueron alcanzados los más importantes resultados de la investigación, como fueron los pesos determinados para las variables que intervienen principalmente en la priorización de los tramos de carreteras incluidos en un Plan de Acción contra el Ruido y para los criterios que sirven de apoyo en la elección de las alternativas idóneas contra el ruido en un tramo de carretera concreto. Para ello fue necesario un importante trabajo previo de búsqueda, definición, análisis, selección y jerarquización de dichos parámetros, sobre los cuales fueron formuladas las preguntas a los expertos en cuestión a su importancia relativa mutua.

Así, en cuanto al problema que fue objeto de la primera fase de la metodología propuesta, esto es, la priorización de tramos, la utilización de la técnica de la suma ponderada sobre los parámetros influyentes en la misma, denominados «Variables de Prioridad de Tramo» (RSPV), junto a los pesos deducidos (tabla 4.8) para las mismas, permitió alcanzar uno de los principales objetivos de esta tesis, la determinación y evaluación del «Índice de Prioridad de Tramo» (RSPI), que permite ordenar de mayor a menor necesidad de actuación los tramos de carretera que deben ser objeto de planificación en un Plan de Acción contra el Ruido.

De manera análoga se procedió en la segunda fase de la metodología con los criterios y subcriterios utilizados para el análisis multicriterio de decisión de las alternativas idóneas contra el ruido de cada tramo, para lo cual fue necesario igualmente un estudio detallado de las diferentes medidas antirruído que ofrece la ingeniería en la actualidad (tabla 5.3), conjuntamente con el fenómeno de atenuación del ruido y sus influencias en la población, la propia carretera y el espacio. De este modo, se alcanzaron unas ponderaciones justificadas y objetivas, claramente lógicas, para la familia de criterios y subcriterios (tabla 5.8) que se ofrecen al decisor para su empleo en el análisis multicriterio, del cual se proponen igualmente los tres métodos más adecuados al problema (suma ponderada, ELECTRE y TOPSIS).

Como una herramienta más para la puesta en práctica de la metodología se han desarrollado varios diagramas de flujo que permiten su aplicación de una manera clara y ordenada, a la vez que establecen el proceso de obtención y aplicación de las distintas RSPV hasta alcanzar el RSPI (figura 4.2), así como facilitan el descarte de algunas de las alternativas preseleccionadas antes de proceder al análisis multicriterio de las mismas.

Precisamente para constatar la bondad y calidad de estos resultados, así como la universalidad de sus posibles usos, de los cuales sea posible obtener consecuencias coherentes y racionales para los problemas abordados, se acometió la aplicación de las dos fases de la metodología a la revisión del Plan de Acción contra el Ruido de las carreteras autonómicas de la provincia de Almería (Andalucía) en la segunda etapa marcada por la Directiva de Evaluación y Gestión del Ruido Ambiental a partir de los Mapas Estratégicos de Ruido igualmente elaborados con tal fin. De hecho, ha podido comprobarse que las propuestas que la metodología ofrece al decisor tanto en la priorización de los tramos como en la selección de las alternativas son procedentes y permiten añadir argumentos muy valiosos desde los puntos de vista de la objetividad y rigurosidad ante el responsable de la aprobación y ejecución del Plan de Acción contra el Ruido así como ante la opinión pública.

Por tanto, las **principales conclusiones que se han obtenido en la presente tesis** son las siguientes:

- El estudio detallado de los Planes de Acción contra el Ruido en carreteras publicados en España ha puesto en evidencia la **falta generalizada de criterios de priorización de las actuaciones** contenidas en ellos, tanto a nivel de ordenación de tramos de conflicto como de idoneidad de soluciones.
- Se propone un esquema conceptual basado en la aplicación de una metodología con el objeto de constituir una herramienta útil y práctica al decisor para el establecimiento de prioridades de actuación en dichos Planes de Acción contra el Ruido. La metodología se apoya en la aplicación de métodos de análisis multicriterio en los que la ponderación de los parámetros que intervienen en ellos se ha alcanzado mediante la **utilización de la técnica de jerarquías**

analíticas en su vertiente difusa (FAHP) aplicada a los resultados de importancia relativa obtenidos de **paneles de expertos**.

- Se propone y define el «**Índice de Prioridad de Tramo**» (**RSPI**), que permite ordenar de mayor a menor necesidad de actuación los tramos de carretera que deben ser objeto de planificación en un Plan de Acción contra el Ruido a partir de la suma ponderada de las denominadas «**Variables de Prioridad de Tramo**» (**RSPV**), permitiendo a los decisores racionalizar y priorizar dichas actuaciones
- El estudio del arte ha permitido incluir en la metodología desarrollada un catálogo detallado de las **diferentes medidas antirruído** que ofrece la ingeniería en la actualidad, con sus principales características de reducción acústica, aplicabilidad y costes, lo cual facilita la toma de decisiones.
- A partir de dicho estudio, se ha desarrollado una **metodología basada en el análisis multicriterio para la elección de las alternativas idóneas contra el ruido** en cada uno de los tramos incluidos o seleccionados en un Plan de Acción. Para ello han sido determinados los principales criterios que influyen en la toma de decisiones y se han generado unas ponderaciones justificadas y objetivas, que se proponen al decisor para su empleo en tres de los métodos de análisis multicriterio más adecuados al problema (suma ponderada, ELECTRE y TOPSIS), así como para facilitar el descarte de algunas de las alternativas preseleccionadas.
- La metodología obtenida incorpora el diseño de **diagramas de flujo** que permiten su aplicación de una manera clara y ordenada así como para su posible simplificación de cara a casos concretos.
- La **aplicación de metodología a casos de estudio** en simulación de la revisión del Plan de Acción contra el Ruido de las carreteras autonómicas de la provincia de Almería (Andalucía), ha permitido alcanzar resultados coherentes así como una discusión acertada de las recomendaciones y propuestas para dicho Plan de Acción contra el Ruido, permitiendo validar los resultados obtenidos con la metodología propuesta.

7.2. LÍNEAS ABIERTAS TRAS ESTA INVESTIGACIÓN.

Por la relativa novedad y aplicación práctica de este tipo de investigación, así como por el carácter transversal de su alcance, al finalizar esta tesis doctoral se abre un considerable número de futuras líneas de investigación que podrán ser abordadas próximamente. Las principales líneas abiertas son las que seguidamente se relacionan:

1. Aplicación de otros métodos de ponderación y comparación de sus resultados con los obtenidos en la tesis.

En el presente documento se ha destacado la gran actualidad, innovación y aplicabilidad que ofrecen las técnicas de ayuda a la decisión y de análisis multicriterio para la resolución de problemas complejos, lo cual hace necesario el constante estudio de las nacientes perspectivas que se abran en el futuro así como la profundización en las existentes y sus variantes o nuevas versiones. Por tanto, se estima muy interesante la implementación de otros métodos de ponderación de criterios con la intención de alcanzar nuevos resultados a partir de los datos recabados mediante panel de expertos o colecciones de valores reales extraídos de experiencias reales al respecto, para comparar sus conclusiones con las obtenidas y expuestas en esta tesis, y así discutir sobre ellas.

2. Estudio de las nuevas técnicas y soluciones contra el ruido debido al tráfico en carreteras.

Por otro lado, la siempre presente modernización y evolución de la técnica y la ingeniería exigen mantenerse al día de las nuevas soluciones contra el ruido que se están desarrollando (algunas de ellas ya apuntadas en este documento), por lo que también puede generar interesantes resultados plantear nuevas soluciones, compararlas con las ya tradicionales, enfrentarlas en base a los criterios analizados y observar su idoneidad relativa así como su eficiencia en resolver un problema de ruido dado.

3. Profundización en el nuevo método CNOSSOS-EU y sus implicaciones.

Precisamente como fruto de esta evolución también en el ámbito normativo se abren en próximas fechas posibles líneas de investigación a partir de la prevista revisión de la Directiva Europea de Gestión y Evaluación del Ruido Ambiental, que se estima que sea

aprobada y publicada durante el año 2015 para modificar el anexo II de la misma (que desarrolla los llamados métodos provisionales de cálculo) y adoptando el método CNOSSOS-EU como procedimiento de generación de los MER a partir de 2019, es decir, obligatoriamente para la cuarta fase de aplicación de la Directiva. Ello obedece a la intención de que la elaboración de los MER responda a criterios claramente definidos, consensuados por todos los países de la Unión Europea para garantizar la consistencia del proceso de comparación de resultados de los mismos y así una evaluación del ruido ambiental armonizada en todos los estados miembros, todo ello dentro de los objetivos del 7º Plan de Acción Medioambiental de la Unión Europea (7EAP). Sin embargo, en el caso de España, los métodos adoptados para la primera y segunda fase de elaboración de los MER han sido dichos «métodos interinos» recomendados por la Comisión Europea al no disponer de un método nacional propio, por lo que no resultará especialmente complicado adoptar el nuevo método armonizado y podría ser recomendado por el Gobierno la adopción de este nuevo método de cara incluso a la tercera fase, aunque también dependerá de que las actualizaciones necesarias en el software comercial para las simulaciones acústicas estén disponibles de forma conveniente. Parece particularmente interesante ahondar en las características de esta nuevo procedimiento de evaluación y las nuevas exigencias de reducción de afección al ruido, con las implicaciones que pueda tener en los resultados de exposición al ruido y, por tanto, de los PAR, aunque en su caso el uso del método CNOSSOS-EU vaya a ser de carácter voluntario.

4. Aplicación de la metodología a otros casos de estudio en carreteras reales para su mejora y desarrollo.

Independientemente del método utilizado para generar los MER, siempre resultará muy ilustrativo continuar con la aplicación de la metodología propuesta en esta tesis a nuevas redes de carreteras y cotejar los resultados obtenidos con los reales ya publicados en la primera y segunda fase, así como entre ellos, es decir, contrastar las ordenaciones de tramos y selección de alternativas de unos PAR a otros con la intención de generar una comparativa de acuerdo a sus características propias. A partir de ello también puede resultar particularmente útil realizar un estudio de influencia de las distintas variables y criterios en los problemas de toma de decisiones con el objetivo de depurar sus

importancias relativas, contrastar los valores numéricos de los pesos a la realidad e, incluso, poder simplificar o mejorar la metodología con vistas a su aplicación práctica.

5. Optimización de soluciones antirruído en carreteras a partir de la mejora de indicadores de los criterios según sus pesos asignados.

A partir de un desarrollo más profundo de la influencia de los criterios y subcriterios en la elección de las alternativas idóneas y de su importancia relativa en la toma de decisiones según los pesos asignados a los mismos, se abre una línea de investigación particularmente interesante con vistas a la mejora de las soluciones concretas contra el ruido en aquellos casos más habituales que se dan en las carreteras españolas. De este modo, se hace posible alcanzar diseños óptimos en los proyectos correspondientes de las medidas escogidas, intensificando esfuerzos en la mejora de sus características en aquellos parámetros que mayor importancia tienen en la corrección del problema, como ha podido constatarse a partir de los resultados de la metodología propuesta.

6. Optimización de la metodología desde el punto de vista computacional y de sistematización informática.

De la misma manera, con total seguridad una línea particularmente sugestiva es la del estudio desde el punto de vista de la computación y costes de implementación de la metodología, analizando los tiempos y la eficiencia de los recursos informáticos empleados para realizar los cálculos necesarios de los diferentes métodos o variantes de los mismos entre sí. Con ello podría obtenerse un punto de vista más a la hora de seleccionar una técnica más eficiente para afrontar un problema que puede llegar a plantearse a gran escala y, por tanto, con un coste computacional presumiblemente elevado. Para ello será necesario con anterioridad generar la programación o sistematización informática de la metodología, lo cual deberá llevarse a cabo mediante una herramienta de procesamiento de datos así como puede presentarse al usuario con una adecuada interfaz o plataforma.

7. Implantación de la metodología mediante SIG.

Continuando con la idea anterior, otra línea futura de desarrollo de la alternativa es la implantación de la metodología mediante un sistema de información geográfica, ya que estas técnicas informáticas permiten la obtención de los datos de forma más ordenada y

sistemática, a la vez que los ofrecen de forma gráfica y visual más atrayente al usuario, con una enorme potencia de aplicación de información vectorial oficial y georreferenciada, a la par que útil y sencilla en su tratamiento.

8. Profundización en el estudio social y estadístico de los resultados de los paneles de expertos.

Finalmente, otra línea transversal a la seguida pero apoyada en los resultados obtenidos de los cuestionarios de los paneles de expertos para el desarrollo de la metodología es la profundización en el estudio de patrones de respuesta y de distribución de opciones escogidas según grupos de expertos. Igualmente otra línea posible de investigación surge a partir de la utilización de diferentes funciones de elección social ("*social choice functions*"), procesando las respuestas como resultados de votación sobre determinadas opciones a modo de candidatos. Por supuesto, las conclusiones obtenidas podrían ser comparadas con las aquí presentadas y discutir convenientemente sobre las ventajas e inconvenientes de ambos procedimientos y sobre la coherencia de las consecuencias derivadas de ellas sobre el problema de toma de decisiones.

CHAPTER 7. CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH LINES.

7.1. CONCLUSIONS.

In this Ph.D. research it has developed a methodology to assist in the decision-making process for the prioritization of actions against road traffic noise. The final aim of this research is that this methodology can be applied to the development of action plans against the noise arising from the strategic noise maps that administration holders of the roads should generate periodically in compliance with the Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise.

The proposed methodology has been developed from a detailed study of the related scientific literature and the legal regulations, as well as taking into account the scenario where we are looking for the application, to ensure both suitable conceptual foundations and actual capacity of applicability. These are the two essential pillars on which the research is laid on and, based on them, it has been developed a proposal obtained by the most appropriate methodological tools according to the nature of the problem analyzed, both from the point of view of their baseline data and the expected results as the point of view of the potential users of the developed methodology and the environment in which they develops the decision-making process.

After the development carried out in previous chapters, this chapter attempts to synthesize and reflect the main findings in this research, from the objectives set out in this Dissertation.

In the first place an approach to the scenario where takes place the decision-making process, i.e., roads, and more specifically roads in Spain (and Andalusia, where then it would be taken the study cases) was carried out, since the current problem regarding to noise that is being addressed here is the result of the historical, technical and socioeconomic evolution. Based on the information considered in this Ph. Thesis, it was ascertained that one of the main environmental impacts that causes the road infrastructure on citizens and environment is just noise. This problem worsen as the road network

densified, approaching in many cases to the inhabited areas, and the progress in technical characteristics of drawing and rolling, with what the traffic flow and the speed of vehicles grows, as well as the fraction of heavy vehicles. The economic development of the country, with its own characteristics, has also collaborated to aggravate this problem. In this context, it was possible to cope with the problem of road noise, both from the physical point of view and from the magnitudes and related indicators, which then they would serve to characterize and be able to treat it according to the regulations at all administrative levels present in our framework. In fact, it was especially analyzed the concepts of Noise Strategic Map and Noise Action Plan, and also real cases currently existing in Spain, especially their structure, the main data related to the ongoing investigation and the outstanding deficiencies and conclusions that will guide the needs of the objective sought in this Thesis. In this way it could be checked the widespread lack of prioritization criteria for actions in the Noise Action Plans, both at the level of management of stretches or suitability of solutions, for which it was always outlined a narrow spectrum of possible alternatives.

Thus, all this previous study detected the need to develop a methodology with a specific desired features to become mainly a useful tool to the technical manager of an action plan against noise, to allow him to deal with problems requiring solution with respect to the decision-making process for the prioritization of their future actions.

Therefore, there was a strong need to combine certain criteria and variables to address the decision-making process, as well as the paramount importance of the weights assigned to the different parameters in the process. Thus, in following chapters were analyzed the different families and classes of multicriteria analysis and weighting methods, so that in the light of the peculiarities of the problem it can be selected those most appropriate or representative. In addition, given the complexity of the decisions that must be taken and the environment of uncertainty existing in the time and the way of its implementation, the more correct and practical approach for the case of the allocation of weights to the variables and criteria was to choose a fuzzy analytic hierarchy process for the survey responses coming from a panel of experts conveniently and carefully chosen (specialists with an appropriate capacity and relation to the raised issues).

From the application of these methodological tools it was achieved the most important results of the research, as the specific weights for the variables that are involved mainly in the prioritization of the road sections or stretches included in a Noise Action Plan and the criteria that serve as support in the choice of the suitable alternatives against the noise in a particular stretch of road. To accomplish this, it was necessary an important previous work of search, definition, analysis, selection and hierarchical structuring of these parameters, and then it was formulated some specific questions to the experts in relation to its relative mutual importance.

As well, in regard to the problem which was the subject of the first phase of the proposed methodology, that is, the prioritization of stretches, the use of the technique of the weighted sum on their influential parameters, called “Road Stretch Priority Variables” (RSPV), together with the weights obtained (table 4.8) for the same ones, allowed us to achieve one of the main objectives of this thesis, i.e., the determination and evaluation of the “Road Stretch Priority Index” (RSPI), which lets us sort from highest to lowest need for action the stretches of road that must be the issue of planning in a Noise Action Plan.

It was proceeded in a similar manner in the second phase of the methodology with the criteria and subcriteria used for the multicriteria analysis for decision among the suitable alternatives against the noise for each stretch. For it, it was also required a detailed study of the different anti-noise measures that offers applied engineering at present (table 5.3), in conjunction with the phenomenon of noise attenuation and its influence on population, the road itself and the space. In this way, it was obtained from a scientific approach a set of weights for the family of criteria and subcriteria (table 5.8) that are offered to the decision maker for their use in a multicriteria analysis. For this multicriteria analysis it was also proposed the use of the most appropriate methods (weighted sum, ELECTRE and TOPSIS).

Keeping in mind the practical use of these developments, as one more tool for the implementation of the methodology it was developed several flow charts that allow its application in a clear and ordered way while establishing the process of obtaining and implementing the various RSPV to get the RSPI (figure 4.2), as well as to facilitate

discarding some of the preset alternatives before proceeding to the multicriteria analysis of the remaining ones.

Precisely in order to test the goodness and quality of these results, as well as the universality of its potential uses, from which it could be possible to obtain consistent and rational consequences to the addressed problems, it was approached the implementation of the two phases of the methodology to a specific study case, i.e., the revision of the Noise Action Plan coming from the strategic noise maps developed in the second phase established by the European Directive 2002/49/EC for the regional-owned roads of the province of Almeria, in Andalusia (Spain). In fact, it has been established that the proposed results the methodology provides to the decision maker, both in the prioritization of the stretches and in the selection of noise control alternatives, are consisting and adequate, and let us draw very valuable conclusions and arguments from the point of view of scientific objectivity to the final person in charge for the approval and implementation of the Noise Action Plan as well as to the public opinion.

Therefore, the main conclusions **that have been obtained in this Ph. D. Thesis** are the following:

- The detailed study of the Noise Action Plans in roads published in Spain has shown the evidence of the **widespread lack of prioritization criteria of the actions** suggested and contained in them, both at the level of prioritization or selection of stretches as well as the suitability of solutions.
- It is proposed a conceptual scheme based on the application of a methodology in order to constitute a useful and practical tool for the decision maker to establish priorities for action in the problematic road stretches identified in the plans against noise in roads. The methodology is supported by the application of multicriteria analysis methods in which the weighting of the different parameters involved in them has been achieved through the use of an **analytic hierarchy process in its fuzzy version (FAHP)** applied to the results obtained from the expert panels.
- It is proposed and defined the **“Road Stretch Priority Index” (RSPI)**, which allows us to sort from highest to lowest priority for action the road stretches that

must be the subject of planning in the Noise Action Plan. This arranging is made from the weighted sum of the so-called “**Road Stretch Priority Variables**” (**RSPV**), allowing the decision-makers to take rational decisions based in evidences and prioritize the actions.

- The study of the state of the art has allowed the inclusion in the proposed methodology of a detailed catalog of **different anti-noise measures** that offers engineering today, together with its main features of acoustic reduction, applicability and cost, which helps to the decision making process.
- On the basis of the above study, it has developed another methodology based on **multicriteria analysis for the selection of the suitable alternatives against the noise** in each of the sections included or selected in the Noise Action Plan. For this purpose it has been determined the main criteria that influence the decision-making process and it has been generated a set of weights in a rigorous way, which are given to the decision maker for their use in any of the three multicriteria analysis methods selected as the most appropriate to this problem, i.e., weighted sum, ELECTRE and TOPSIS, allowing also to facilitate the discarding of some of the preset alternatives.
- The methodology incorporates flow diagrams designed to apply the methodology in a clear and ordered way, as well as to facilitate the possible simplifications in specific cases.
- The **application of the proposed methodology to study cases** in simulation of the revision of the Noise Action Plan of the regional-owned roads of the province of Almeria (Andalusia), has allowed us to achieve consistent results as well as a good analysis of the recommendations and proposals included in the Noise Action Plan. These results also validate the proposed methodology and the suitability of the process.

7.2. RESEARCH LINES FOR FURTHER DEVELOPMENTS AFTER THIS THESIS.

At the end of this Ph. D. Thesis, and due to the relative novelty and the practical application of this type of research, as well as the transversal use of the obtained results, it appears to be open a considerable number of future lines of research that could be addressed in future investigations shortly. In our opinion, the main subjects are:

1. Implementation of other weighting methods and comparison of their results with those obtained in this thesis.

In the present dissertation it has been pointed out the large relevance, innovation and applicability that nowadays the decision-making and multicriteria analysis techniques offer for the resolution of complex problems, which makes it necessary the constant study of the rising perspectives and innovations that will be opened in the future as well as the in-depth study of their existing variants or new versions. Furthermore, it is considered very interesting the implementation of other weighting methods for criteria with the aim of achieving new results from data collected by panel of experts or collections of actual values extracted from actual experiences in this regard, for later performing a comparison of the new findings with those obtained here in a critical way.

2. Study of the new techniques and solutions to fight against road traffic noise.

On the other hand, the constant modernization and evolution of the technique and engineering requires to stay updated of the new solutions against the noise (some of them already outlined in this dissertation), so that it can be also generated interesting results to raise new solutions, comparing them with the already traditional ones on the basis of the criteria discussed in this Dissertation and observing its relative suitability as well as its efficiency in solving a given problem of noise.

3. Deepening in the new CNOSSOS-US European method and its implications.

Precisely as a result of new changes in the regulations in Europe in the matter of noise, it opens new research lines from the planned revision of the Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment

and management of environmental noise, which is expected to be adopted and published during the year 2015 by modifying its annex II (which develops the so-called interim methods of calculation) and adopting the CNOSSOS-EU method to develop Strategic Noise Maps from 2019, that is to say, it is compulsory to apply it for the fourth phase of implementation of the European Directive. This is due to the purpose that the development of the Strategic Noise Maps comes from clearly defined criteria, on agreement with all the countries of the European Union to ensure the consistency of the comparison process of their results and thus achieving an harmonized assessment of the environmental noise in all member states, all within the objectives of the 7th Environmental Action Plan of the European Union (7EAP). However, in the case of Spain, the methods adopted for the first and second phase of development of the Strategic Noise Maps have been those “interim methods” recommended by the European Commission in the absence of a national method itself, so that it will not be particularly complicated to adopt the new harmonized method and could be recommended the use of this new method by the Government even to the third stage of Noise Maps, although it also depends on the necessary updates in commercial software for the acoustic simulations becoming available in a convenient way. It seems particularly interesting to gain insights into the characteristics of this new assessment procedure and its new demands of noise levels reduction in inhabited areas, with the implications that it may have on the results of noise exposure on population and, therefore, on the Noise Action Plans, although the use of the CNOSSOS-EU method is optional in principle for the third phase.

4. Application of the proposed methodology to other study cases of real roads for further development and improvement.

Regardless of the method used to generate the Strategic Noise Maps, it will always be very illustrative to continue with the application of the methodology proposed in this Ph.D. Thesis to new road networks and compare the obtained results with those already published in the first and second stage, as well as between them, i.e. to check the sort of stretches and the selection of alternatives of one Noise Action Plan compared to other one with the purpose of generating a comparison according to their own unique characteristics. From this it can also be particularly useful to conduct a study of the influence of the different variables and criteria used in decision making problems with the objective of

debugging their relative weights, contrasting the numerical values of the assigned weights with the reality, and even being able to simplify or improve the methodology for their practical application.

5. Optimization of soundproofing solutions in roads from the improvement of indicators of criteria according to their assigned weights.

From a more profound development of the influence of the criteria and subcriteria in the choice of the suitable alternatives and their relative importance in the decision-making process according to the weights assigned to them, it opens a line of research particularly interesting with the objective of improving the specific solutions against noise in those most common cases that occur in the Spanish road network. In this way, it becomes possible to achieve optimum designs in the corresponding projects of the selected measures, intensifying efforts in improving the features in those parameters that have greater importance in the noise mitigation problem, as it has been obtained from the results of the proposed methodology.

6. Computing systematization and Optimization of the methodology from a computational point of view.

In the same way, a particular interesting line is the study from the point of view of computation and implementation costs of the methodology, analyzing the times and the efficiency of the computing resources used to perform the necessary calculations of the different methods or variants. With this approach it could be obtained another further point of view to be taken into account to select a more efficient technique to deal with a problem that can arise in large-scale and, therefore, with a presumably high computational cost. To this end, it will be necessary to generate in advance a computational systematization of the methodology, which should be carried out through a data processing tool combined with a interface or platform friendly for the user.

7. Implementation of the methodology using GIS.

Continuing with the previous idea, another line of future development is the implementation of the methodology by using a geographic information system, as these computer techniques allow us to gather the data in a more ordered and systematic way, at

the same time as they offer results in a graphic form, visually more attractive to the user and easy to use, thanks to its huge power of use of official and georeferenced vectorial information.

8. Further in-depth consideration of the social and statistical study of the results from the panels of experts.

Finally, another transversal line to the followed one in this Dissertation but supported by the results obtained from the questionnaires of the expert panels for the development of the methodology, is performing an extension of the analysis for the study of patterns of response and the distribution of choices made by groups of experts. Similarly, another possible line of research comes from the use of different functions of social choice ("*social choice functions*"), by processing the responses as voting results on certain options as if it were candidates for elections. Of course, the findings could be compared with the presented here and conveniently discussed the advantages and disadvantages of both procedures in terms of the consistency of the consequences of decision-making problem addressed here.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.

- Abad Licerias J. M. y Buzarco Samper M. Carreteras y autopistas: visión jurisprudencial. Editorial Dykinson. Madrid, 2007.
- Adamopoulos G. I. and Pappis C. P. A fuzzy-linguistic approach to a multi-criteria sequencing problem. *European Journal of Operational Research*, vol. 92, no. 3 (1996), pp. 628-636.
- Aguarón J. and Moreno-Jimenez J. The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European Journal of Operational Research*, vol. 147, no. 1 (2003), pp. 137-145.
- Águeda F. J. El tratamiento del exceso de materiales de movimiento de tierras como elemento favorable a la protección del medio ambiente: El caso de la M-45. *Carreteras No. 110* (2000), pp. 5-11.
- Alarcón B. Modelo integrado de valor para estructuras sostenibles. E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña, 2006.
- Alarcón Núñez D. B. Modelo Integrado de Valor para Estructuras Sostenibles. Universidad Politécnica de Cataluña, 2005.
- Alegre Marrades D. M. Los Dispositivos reductores de ruido para carreteras y su relación con la seguridad viaria. *Carreteras. Revista técnica de la Asociación Española de Carreteras*, 190 (2013), pp. 50-57.
- Alonzo Salomón L. A. y Rodríguez Rufino G. J. *Carreteras*, volumen 8. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida (México), 2005.
- Anes y Álvarez de Castrillón G., Rubio Celada A., Seco Serrano C., Manso Porto C. y Almagro Gorbea M. *Economía, Sociedad, Política y Cultura en la España de Isabel II*. Real Academia de la Historia. Madrid, 2004.
- Anthony R. N. *Planning and Control Systems: A Framework for Analysis*. Cambridge, MA: Harvard University, 1965.
- Aragonés B. P. y Gómez-Senent M. E. *Técnicas de ayuda a la decisión multicriterio*. Cuaderno de apuntes. ETSII-Universidad Politécnica de Valencia. SPUPV-97. Valencia, 1997.

- Arancibia S., Contreras E., Mella S., Torres P. y Villalba I. Evaluación Multicriterio: aplicación para la formulación de proyectos de infraestructura deportiva. Universidad de Chile, 2003.
- Arena A., Correa E. y De Rosa C. Estudio de las implicancias ambientales relacionadas con la construcción y uso de distintos pavimentos utilizados en calles residenciales de la ciudad de Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 5. Argentina, 2001.
- Arenas J. P. Potential problems with environmental sound barriers when used in mitigating surface transportation noise. *Science of the Total Environment* 405 (2008), pp. 173-179.
- Arfi B. Fuzzy decision making in politics: A linguistic fuzzy-set approach (LFSA). *Political Analysis*, vol. 13, no. 1 (2005), p. 23.
- Arrow K. J. *Social Choice and Individual Values*. John Wiley, New York, 1951.
- Aruldoss M., Miranda Lakshmi T. and Prassana Venkatesan V. A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications. *American Journal of Information Systems* 1, no. 1 (2013), pp. 31-43.
- Ausejo M. and Recuero M. Study and proposal of a prediction equation for traffic noise during working days in Buenos Aires Macrocentre. 8th International Symposium Transport Noise and Vibration. St. Petersburg, Russia, 2006.
- Ausejo M., Tabacchi M., Recuero M., Asensio C., Pagán R and Pavón I. Design of a noise action plan based on a road traffic noise map. *Acta Acustica United with Acustica* 97 (2011), pp. 492-502.
- Awasthi A., Chauhan S. S. and O. Hichem. Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems. *Expert Systems with Applications* 38 (2011), pp. 12270–12280.
- Azqueta D. *Valoración económica de la calidad ambiental*. Editorial Mc Graw-Hill. Madrid, 1994.
- Baldauf R., Thoma E., Khlystov A., Isakov V., Bowker G., Tong L. and Snow R. Impacts of noise barriers on near-road air quality. *Atmospheric Environment* 42 (2008), pp. 7502-7507.

- Bana C., Costa C. A. and Vansnick J. C. The MACBETH approach: Basic ideas, software and an application. In *Advances in Decision Analysis*. N. Meskens and M. Roubens (eds.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 131-157.
- Banai R. Fuzziness in Geographical Information Systems: contributions from the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Geographical Information Systems*, 7, 4 (1993), pp. 315-329.
- Bañón Blázquez L. y Beviá García J. F. *Manual de carreteras. Volumen I: elementos y proyecto*. Universidad de Alicante, 2000.
- Bao Q., Ruan D., Shen Y., Hermans E. and Janssens D. Improved hierarchical fuzzy TOPSIS for road safety performance evaluation. *Knowledge-Based Systems* 32 (2012), pp. 84–90.
- Barba-Romero S. y Pomerol J. C. *Decisiones multicriterio, fundamentos teóricos y utilización práctica*. Colección de Economía. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá de Henares, 1997.
- Bartí Domingo R. *Acústica medioambiental. Volumen I*. Editorial Club Universitario. Alicante, 2010.
- Barzilai J. and Golany B. AHP rank reversal, normalization and aggregation rules. *INFOR*. 32(2) (1994), pp. 57-64.
- Battikha M. Quality management practice in highway construction. *International Journal of Quality & Reliability Management*. Volume 20, Issue 5 (2003), pp. 532-550.
- Bayazit O., Karpak B. and Yagci A. A purchasing decision: selecting a supplier for a construction company. *Jornal of Systems Science and Systems* Volume 15, Number 2 (2006), pp. 217-231.
- Bellman R. E. and Zadeh L. A. Decision-Making in a Fuzzy Environment. *Management Science* 17(4) (1970), pp. 141-164.
- Belton V. and Gear T. On a short-coming of Saaty's method of analytic hierarchies. *OMEGA* 3(11) (1983), pp. 228-230.
- Ben-Arieh D. and Zhifeng C. Linguistic labels aggregation and consensus measure for autocratic decision-making using group recommendations. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part A - Systems and Humans* 36(3) (2006), pp. 558-568.

- Benayoun R., Roy B. and Sussman B. Electre: une méthode pour guider le choix en présence des points de vue multiples. Technical Report 49, Direction Scientifique de la SEMA-METRA International, 1966.
- Bergendahl G. Principles of controlling traffic noise: solving a multi-objective decision problem. *Regional Science and Urban Economics* 6 (1976), pp. 419-437.
- Beynon M. DS/AHP method: A mathematical analysis, including an understanding of uncertainty. *European Journal of Operational Research* 140 (2002), pp. 148-164.
- Biondini F. and Frangopol D. M. *Life-Cycle Civil Engineering*. Taylor & Francis Group. London, 2008.
- Borda J.C. Mémoire sur les élections au scrutin, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. Traduction: De Grazia A., *Mathematical derivation of a election system*. *Isis* 44 (1781), pp. 42-51.
- Boer L. C. d. and Schrotten A. Traffic noise reduction in Europe; health effects, social costs and technical and policy options to reduce road and rail traffic noise. CE Delft (2007), pp. 1-64.
- Bolaños M. J., Lamata M. T. and Moral S. Decision making problems in a general environment. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 25, no. 2 (1988), pp.135-144.
- Bonissone P. P. A fuzzy sets based linguistic approach: Theory and applications. *Approximate Reasoning in Decision Analysis*. In: M.M.Gupta and E.Sanchez, Ed. North-Holland Publishing Company, 1982, pp. 329-339.
- Bonissone P. P. Selecting uncertainty calculi and granularity: an experiment in trading-off precision and complexity. *Uncertainty in Artificial Intelligence*, 4 ed. L. H. Kanal and J. F. Lemmer (Eds), Ed. Amsterdam: North-Holland, 1986, pp. 217-247.
- Bordogna G., Fedrizzi M. and Pasi G. A linguistic modelling of consensus in group decision making based on OWA operators. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. Part A: Systems Humans, 27, no. 1 (1997), pp. 126-133.
- Bordogna G. and Pasi G. A fuzzy linguistic approach generalizing boolean information retrieval: a model and its evaluation. *Journal of the American Society for Information Science*, vol. 44, no. 2 (1993), pp. 70-82.

- Bottero M., Comino E. and Riggio V. Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems. *Environmental Modelling & Software* 26 (2011), pp. 1211-1224.
- Brandt S. and Maennig W. Road Noise Exposure and Residential Property Prices: Evidence from Hamburg. *Transportation Research Part D*, 16 (2011), pp. 23-30.
- Brans J. P. L'ingénierie de la décision. Elaboration d'instruments d'aide à la décision. Méthode PROMETHEE. Colloque d'aide à la d'ecision. Université Laval, Québec (1982), pp. 182-213.
- Brans J. P. and Mareschal B. How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method for MCDM. *European Journal of Operations Research*, 24 (1986), pp. 228-238.
- Brans J. P. and Mareschal B. Prométhée-GAIA: Une méthodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples. Éditions de l'Université de Bruxelles, Bruxelles, 2002.
- Brans J. P., Mareschal B. and Vincke P. Prométhée: a new family of outranking methods in multicriteria analysis. In J. P. Brans (ed.), *MCDM, Operational Research'84*, North-Holland, 1984, pp. 477-490.
- Brans J. P. and Vincke P. A preference ranking organization method. *Management Science*, 31 (1985), pp. 647-656.
- Brennan M. J., Kavanagh A. M. and Sheanan J. N. Case studies of a low-noise road surface. *Internacional Journal of Pavement Engineering*, Vol. 2(2) (2001), pp. 121-134.
- Brugha C. M. Structure of multi-criteria decision making. *European Journal of the Operational Research Society* 55(11) (2004), pp. 1156-1168.
- Brundtland G. H. Report of the World Commission on Environment and Development, General Assembly Resolution 42/187. Oslo, 1987.
- Buckley J. J. Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, Volume 17, Issue 3 (1985), pp. 233-247.
- Bull J. An analytical solution to the design of precast pavements. Department of Civil engineering. Newcastle upon Tyne University, *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, Vol. 10 (1986), pp. 115-123.

- Burbano de Ercilla S., Burbano García E. y Gracia Muñoz C. Física General. Editorial Tébar, S.L. Madrid, 2003.
- Burt M. E. Aspects of highway design and traffic management. *Journal of Sound and Vibration* 15(1) (1971), pp. 23-24.
- Büyüközkan G., Kabraman C. and Ruan D. A fuzzy multi-criteria decision approach for software development strategy selection. *International Journal of General Systems*, 33:2 (2004), pp 259-280.
- Cables Pérez E. H. Selección de personal con técnicas de Soft Computing. Propuesta de Desarrollo y de Software. Universidad de Granada, 2011.
- Cafiso S., Di Graciano A. and Kerali H Multicriteria Analysis Method for pavement Maintenance Management. *Transportation Research Record* 1816, Paper No. 02-3898 (2002), pp. 73-84.
- California Department of Transportation (CALTRANS). Asphalt rubber usage guide. California, 2003.
- Canter L. W. Environmental health impact assessment. Pan American Health Organization. Metepec, Mexico, 1986.
- Canter L. and Sadler B. A tool kit for effective EIA practice review of methods and perspectives on their application. Environmental and Ground Water Institute. University of Oklahoma. Norman, Oklahoma, 1997
- Carlsson C. and Fuller R. Multiple Criteria Decision Making: The Case for Interdependence. *Computers and Operations Research*, 22 (1995), pp. 251-260.
- Carlsson C. and Fuller R. Fuzzy Reasoning in Decision Making Optimization. Alemania: Physica - Verlag, 2002.
- Castillo M., Padilla J. A., Niño F., Zárate A., Bustamante J., Novoa J. L. and Gutiérrez J. C. Analysis and evaluation of technological and operational alternatives for heavy oil gathering systems in the fields of Castilla and Chichime - Colombia. Proceedings of the 10th International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process. Multi-criteria Decision Making. University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2009.
- Castillo Ó., Melin P., Montiel Ross Ó., Sepúlveda Cruz R., Pedrycz W. and Kacprzyk J. (Eds.) Theoretical Advances and Applications of Fuzzy Logic and Soft Computing.

- Advances in Soft Computing n. 42. System Research Institute. Polish Academy of Sciences. ul. Newelska 6, 01-447 Warsaw (Poland). Editorial Springer, Berlin, 2007.
- Cea D'ancona M. A. Metodología cuantitativa: Estrategias y Técnicas de Investigación Social. Síntesis, Madrid, 1998.
 - Cegarra Plane M. La consideración del ruido en el proyecto de las carreteras. Revista de Obras Públicas nº 129 (1982), pp. 723 a 730.
 - Celik M., Er I. D. and Ozok A. F. Application of fuzzy extended AHP methodology on shipping registry selection: The case of Turkish maritime industry. Expert Systems with Applications 36 (2009), pp. 190–198.
 - Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. Madrid, 2007.
 - Chan A. Framework of success criteria for design / build projects. Journal of management in Engineering (2002), pp. 120-127.
 - Chan F. T. S., Au K. C. and Chan P. L. Y. A decision support system for production scheduling in an ion plating cell. Expert Systems with Applications, vol. 30, no. 4 (2006), 727-738.
 - Chan H., Wang X., White G. R. T. and Yip N. An Extended Fuzzy-AHP Approach for the Evaluation of Green Product Designs. IEEE Transactions on Engineering Management, 60 (2) (2013), pp. 327-339.
 - Chang D.-Y. Extend analysis and synthetic Decision, optimization techniques and Applications. World scientific, Volume 1. Singapore, 1992.
 - Chang D.-Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. European Journal of Operational Research. 96 (1996), pp. 649-655.
 - Chang N.-B., Parvathinathan G. and Breeden J. B. Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. Journal of Environmental Management 87 (2008), pp. 139–153.
 - Charnes A. and Cooper W. Management Models and Industrial Applications of Linear Programming. John Wiley, New York, 1961.

- Charnes A. and Cooper W. Deterministic equivalents for optimizing and satisficing under chance constraints. *Operation Research*, 11 (1963), pp. 18-39.
- Chen S.H. Ranking fuzzy numbers with maximizing set and minimizing set. *Fuzzy Sets and Systems*, 17 (1985), pp.113-129.
- Chen S. J. and Hwang C. L. *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making*. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- Chen S. M. Evaluating weapon systems using fuzzy arithmetic operations. *Fuzzy Sets and Systems*, 77 (1996), pp. 265-276.
- Chen C.-T. A fuzzy approach to select the location of the distribution center. *Fuzzy Sets and Systems*, 118(1) (2001), pp. 65-73.
- Cheng C. H. Evaluating naval tactical missile systems by fuzzy-AHP based on the grade value of membership function. *European Journal of Operational Research*, 96 (1996), pp. 343-350.
- Chernof H. *Elementary decision theory*. Dover Publications. New York, 1985.
- Cho K. T. Multicriteria decision methods: An attempt to evaluate and unify. *Mathematical and Computer Modelling*, 37(9-10) (2003), pp. 1099-1119.
- Choi D. H., Ahn B. S. and Kim S. H. Multicriteria group decision making under incomplete preference judgments: using fuzzy logic with a linguistic quantifier. *International Journal of Intelligent Systems* 22(6) (2007), p. 19.
- Choocharukul K. User Perceptions and engineering definitions of highway level of service: an exploratory statistical comparison. *Transportation Research Part A*. Vol. 38. N° 9-10 (2004), pp. 677-689.
- Chu A. T. V., Kalaba R. E. and Spingarn K. A comparison of two methods for determining the weights of belonging to fuzzy sets. *Journal of Optimization theory and Applications* 4(27) (1979), pp. 531-538.
- Churchman C. W., Ackoff R. L. and Arnoff E. L. *Introduction to Operations Research*. Wiley, New York, 1957.
- Chuu S. J. Fuzzy multi-attribute decision making for evaluating manufacturing flexibility. *Production Planning and Control* 16(3) (2005), p. 12.

- Cianfrini C., Corcione M. and Fontana L. Experimental verification of the acoustic performance of diffusive roadside noise barriers. *Applied Acoustics* 68 (2007), pp. 1357-1372.
- Clemen R. T. *Making Hard Decisions. An Introduction to Decision Analysis*. Duxbury Press, 1995.
- Cochrane J. L. and Zenely M. *Multiple Criteria Decision Making*. University of South Carolina Press, Columbia, 1973.
- Coello C. A. *Introducción a la Computación Evolutiva (Notas de Curso)*. Departamento de Ingeniería Eléctrica -Sección Computación- (CINVESTAV-IPN). México, 2004.
- Cogger K. O. and Yu P. L. Eigen weight vectors and least distance approximation for revealed preference in pairwise weight ratios. *Journal of Optimization theory and Applications* 4(46) (1985).
- Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Telecomunicaciones (COITT). *Libro Blanco sobre los efectos del ruido ambiental en la sociedad y su percepción por parte de la ciudadanía*. Madrid, 2008.
- Colson G. and Bruyn C. D. (eds.). *Models and Methods in Multiple Objective Decision Making*. In *Models and Methods in Multi-Criteria Decision Making*. Londres, 1989.
- Comisión de las Comunidades Europeas. *Política futura de lucha contra el ruido*. Libro verde de la Comisión Europea. Bruselas, 1996.
- Condon E. A visualization model based on adjacency data. *Decision Support Systems* 33 (2002), pp. 349-62.
- Condorcet J. A. N., Marquis de Caritat. *Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendus à la pluralité des voix*. Imprimerie Royal, Paris, 1785.
- Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía (CFV). *Plan General de Aforos de Andalucía 2012*. Sevilla, 2012.
- Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía (CFV). *Ampliación de estructura para tránsito peatonal e instalación de pantallas acústicas en la carretera A-1201. Variante Oeste de Pulpí (Almería)*. Almería, 2013.

- Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía (CFV). Actualización de la Red de Carreteras de Andalucía. Sevilla, 2014.
- Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio e Infraestructuras del Gobierno del Principado de Asturias (CMAOTI). Plan de acción de los mapas estratégicos de ruido de las carreteras de la red autonómica del Principado de Asturias con tráfico superior a 3 millones de vehículos al año. Oviedo, 2011.
- Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía (COPT). Dirección General de Carreteras. Plan General de Carreteras: Andalucía. Sevilla, 1987.
- Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía (COPT). Memoria del Plan MAS CERCA. Sevilla, 2004.
- Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía (COPT). Asistencia técnica para la evaluación de la contaminación acústica de la Red Autonómica de Carreteras en las provincias de Almería, Granada, Jaén y Málaga con tráfico superior a seis millones de vehículos al año. Sevilla, 2007.
- Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía (COPT). Plan de Acción Contra el Ruido de la Red Autonómica de Carreteras de Andalucía con tráfico superior a seis millones de vehículos al año. Sevilla, 2008(a).
- Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía (COPT). Plan de Infraestructuras para la Sostenibilidad del Transporte en Andalucía (PISTA 2007-2013). Sevilla, 2008(b).
- Consejería de Obras Públicas y Vivienda de la junta de Andalucía (COPV). Manual de medidas correctoras del ruido en carreteras. Catálogo. Sevilla, 2012.
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía (CMAOT). Ecobarómetro de Andalucía 2013. Sevilla, 2013.
- Contreras López A. y Molero Meneses M. Ciencia y Tecnología del Medioambiente. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid, 2009.
- Coombs C. H. On the use of inconsistency of preferences in psychological measurement. *Journal of Experimental Psychology*, vol. 55 (1958), pp. 1-7.
- Correyero Ruiz B. y Cal R. Turismo: la mayor propaganda de Estado. España: desde los orígenes hasta 1951. Editorial Vision Net. Madrid, 2008.

- Costa Hernández A. Reutilización de residuos en mezclas asfálticas. Jornada Técnica “La Gestión Medioambiental de los contratos de conservación”. Santa Cruz de Tenerife, 2011.
- Cross N. Engineering Design Methods. 2nd edition. Strategies for Product Design. John Wiley & Sons. Chichester, 1994.
- Cvetković D. and Coello C. A. Human Preferences and their Applications in Evolutionary Multi-Objective Optimisation. In Yaochu Jin, editor, Studies in Fuzziness and Soft Computing: Knowledge Incorporation in Evolutionary Computation, pages 479-502. Springer, 2005.
- Dale V. H. and English M. R., eds. Tools to Aid Environmental Decision Making Tools to Aid Environmental Decision Making. Springer-Verlag, New York, 1999
- Damián Hernández S. A. Estudio del ruido generado por la operación del transporte carretero: caso II, Jalisco. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte. México, 2002
- Danish Road Institute. Traffic management and noise reducing pavements: Recommendations on additional noise reducing measures. Ministry of Transport and Energy. Copenhagen, 2004.
- Dasarathy B. V. Smart: Similarity measured anchored ranking technique for the analysis of multidimensional data. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, SMC-6, 10 (1976), pp. 708-711.
- De Boer S. J. Decision Methods and Techniques in Methodical Engineering Design. Ph.D. Thesis De Lier: Academisch Boeken Centrum, 1989.
- De Coensel B., De Muer T., Yperman I. and Botteldooren D. The influence of traffic flow dynamics on urban soundscapes. Applied Acoustics 66 (2005), pp. 175-194.
- De Winne P., Briessinck M. and Vanhooreweder B. How to choose the most sustainable pavement for noise mitigation on the Flanders motorway network? Procedia - Social and Behavioral Sciences 48 (2012), pp. 2121-2129.
- Debreu G. Topological methods in cardinal utility theory. In Mathematical Methods in the Social Sciences, Arrow K. J., Karlin S. and Suppes P. (eds.). Stanford University Press (1960).

- Decreto de 25 de septiembre de 1934 aprobando el Código de la Circulación y sus Anexos. Gaceta de Madrid: Diario Oficial de la República, nº 269, de 26 de septiembre de 1934. Páginas 2634 a 2677.
- Decreto 74/1996, de 20 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento de la Calidad del Aire. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía nº 30, de 7 de marzo de 1996. Corrección de errores en el Boletín Oficial de la Junta de Andalucía nº 48, de 23 de abril de 1996.
- Decreto 326/2003, de 25 de Noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de protección contra la contaminación acústica en Andalucía. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía nº 243, de 18 de diciembre de 2003. Corrección de errores en el Boletín Oficial de la Junta de Andalucía nº 125, de 28 de junio de 2004 y en el Boletín Oficial de la Junta de Andalucía nº 42, de de 3 de marzo de 2006.
- Decreto 6/2012, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía, y se modifica el Decreto 357/2010, de 3 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento para la Protección de la Calidad del Cielo Nocturno frente a la contaminación lumínica y el establecimiento de medidas de ahorro y eficiencia energética. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía nº 24, de 6 de febrero de 2012. Páginas 7 a 37.
- Degani R. and Bortolan G. The problem of linguistic approximation in clinical decision making. *International journal of approximate reasoning*, vol. 2, no. 2 (1988), p. 98.
- Del Val Melus A. Los pavimentos en las carreteras españolas del siglo XX. *Revista de Obras Públicas* Nº. 3482 (2007), pp. 7-24.
- Delgado C., Vassallo J. M. y Sánchez A. Aplicación de indicadores de calidad en concesiones de carreteras en España. *Carreteras* No. 151 (2007), pp. 53-66.
- Delgado M., Verdegay J. L. and Vila M. A. Linguistic decision-making models. *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 7 (1992), pp. 479-492.
- Deutsche Norm - DIN 45687. Acoustics-Software for the calculation of the sound propagation outdoors - Quality requirements and test conditiond. May 2006.
- Díaz Fernández J. A. El sistema de transportes y comunicaciones terrestres en el desarrollo regional de Galicia. Universidad de Santiago de Compostela, 2007.

- Díaz J. Introducción al problema de la vulnerabilidad de las infraestructuras de carreteras. Carreteras No. 106. (2000), pp.7-29.
- Díaz Jiménez, J. Ruido, tráfico y salud. Instituto de Salud Carlos III. Madrid, 2012.
- Díaz M. A., Rodríguez, A. E. y Salado, M. J. Revista Internacional de Sociología nº 85 (1999), pp. 251-275.
- Dieter G. Engineering Design. A Materials and Processing Approach. Tokyo: McGraw-Hill, 1983.
- Directiva 70/157/CEE del Consejo, de 6 de febrero de 1970 relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados Miembros sobre el nivel sonoro admisible y el dispositivo de escape de los vehículos a motor. Diario Oficial de las Comunidades Europeas nº 042 de 23 de febrero de 1970. Páginas 16 a 20.
- Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. Diario Oficial de las Comunidades Europeas nº 189, de 18 de julio de 2002. Páginas 12 a 25.
- Doumpos M. and Zopounidis C. Multicriteria decision aid classification methods. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, 2002.
- Dyer J. Remarks on the Analytic Hierarchy Process. Management Science 36(3) (1990), pp. 249-258.
- Eckenrode R. T. Weighting multiple criteria. Management Science, 3(12) (1965), pp. 180-192.
- Edwards W. and Barron F. H. SMARTS and SMARTER: improves simple methods for multiattribute utility measurement. Organizational Behaviour and Human Decision Processes, vol. 60, no. 1 (1994), pp. 306-25.
- Ehrgott M. and Gandibleux X. Multiple Criteria Optimization: State of the Art Annotated Bibliographic Surveys. Kluwer Academic Publishers. Norwell, Massachusetts, USA, 2002.
- El-Rayes K. Time-Cost-Quality Trade off Analysis for highway Construction. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE (2005), pp. 477-486.

- Ellis J. B., Deutsch J.-C., Mouchel J.-M., Scholes L. and Revitt M. D. Multicriteria decision approaches to support sustainable drainage options for the treatment of highway and urban runoff. *Science of the Total Environment* 334– 335 (2004), pp. 251-260
- Erensal Y. C., Öncan T. and Demircan M. L. Determining key capabilities in technology management using fuzzy analytic hierarchy process: A case study of Turkey. *Information Sciences* 176 (2006), pp. 2755-2770.
- European Commission, DG Environment. Adaptation and revision of the interim computation methods for the purpose of strategic noise mapping. ADR-INTERIM-CM, 2003.
- European Commission. Working paper on the effectiveness of noise measures. July 2005. http://ec.europa.eu/environment/noise/pdf/13825_workingpaper.pdf
- Farina A., Galaverna P. and Truffelli G. Simplified mapping algorithm for fast surveys, requiring minimal input data. 13th International Congress of Sound and Vibration (13ICSV). Vienna, Austria, 2006.
- Federación Española de la Recuperación y el Reciclaje (FER). Experiencia española del caucho NFU en las mezclas asfálticas. Madrid, 2013.
- Fernández J., López J. M., Arroyo P. y Bernal E. El análisis coste-beneficio y su vigencia relativa en la valoración de grandes proyectos hidráulicos. Departamento de Análisis Económico. Universidad de Zaragoza, 1996.
- Filho J. M. A., Lenzi A., Zannin P. H. T. Effects of traffic composition on road noise: a case study. *Transportation Research Part D* 9 (2004), pp. 75-80.
- Fishburn P. C. *Utility Theory for Decision Making*. Wiley. New York, 1970.
- Fishburn P. C. Lexicographic orders, utilities and decision rules: a survey. *Management Science* 11(20) (1974), pp. 1442-1471.
- Flament M. *Glosario Multicriterio*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, UNESCO, 1999.
- Fodor J. and Roubens M. *Fuzzy preference modelling and multicriteria decision support*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, 1994.

- Font Mezquita J. y Dols Ruiz J. F. Tratado sobre automóviles: tecnología del automóvil, Volumen 3. Universidad Politécnica de Valencia, 2004.
- Frax Rosales E. y Madrazo Madrazo S. El transporte por carretera, siglo XVIII-XX. Revista TST (Transportes, Servicios y Telecomunicaciones) nº 1. Madrid, 2001.
- Freitas E., Mendonça C., Santos J. A., Murteira C. and Ferreira J. P. Traffic noise abatement: How different pavements, speeds and traffic densities affect annoyance levels. *Transportation Research Part D* 17 (2012), pp. 321-326.
- Fu G. A fuzzy optimization method for multicriteria decision making: an application to reservoir flood control operation. *Expert Systems with Applications* 34(1) (2008), p. 4.
- Fujiwara K., Hothersall D. C. and Kim C. Noise barriers with reactive surfaces. *Applied Acoustics* 53(4) (1988), pp. 255-272.
- Fujiwara T., Meiarashi S., Namikawa Y. and Hasebe M. Reduction of equivalent continuous A-weighted sound pressure levels by porous elastic road surfaces. *Applied Acoustics* 66 (2005), pp. 766-778.
- García-Cascales M. S. Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y “Soft Computing”. Universidad Politécnica de Cartagena, 2009.
- García-Cascales M. S. and Lamata M. T. A modification of the index of Liou and Wang for ranking fuzzy number. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, vol. 15, no. 4 (2007), pp. 411-424.
- García-Cascales M. S. and Lamata, M. T. Fuzzy analytical hierarchy process in maintenance problem. N.T. Nguyen *et al.* (Eds.): IEA/AIE, LNAI, 5027 (2008), pp. 815-824.
- García-Cascales M. S. and Lamata, M. T. Selection of a cleaning system for engine maintenance based on the analytic hierarchy process. *Computers & Industrial Engineering*, Volume 56, Issue 4 (2009), pp. 1442-1451.
- García-Cascales M. S. y Lamata, M. T. Nueva aproximación al método tópsis difuso con etiquetas lingüísticas. XV Congreso Español Sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy. Huelva, 2010, pp. 619-624.

- García Ortega P. Las concesiones administrativas de carreteras en el ordenamiento jurídico español. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid, 1984.
- García Sanz B. y Garrido F. J. La contaminación acústica en nuestras ciudades. Colección Estudios Sociales nº 12. Fundación “la Caixa”. Barcelona, 2003.
- Gass S. and Rapcsak T. Singular value decomposition in AHP. *European Journal of Operational Research* 154 (2004), pp. 573-584.
- Georgescu-Roegen N. Choice, expectations and measurability. *Quarterly Journal of Economics* 4(68) (1954), pp. 503-541.
- Gjestland T. Assessment of annoyance from road traffic noise. *Journal of Sound and Vibration* 112(2) (1987), 369-375.
- Goicoechea A., Hansen D. and Duckstein L. Multiobjective decision analysis with engineering and business applications. John Wiley & Sons. New York, 1982.
- Gołębiewski R., Makarewicz R., Nowak M. and Preis A. Traffic noise reduction due to the porous road surface. *Applied Acoustics* 64 (2003), pp. 481-494.
- Gomes L. and Lima M. From modelling individual preferences to multicriteria ranking of discrete alternatives: a look at prospect theory and the additive difference model. *Foundations of computing and decision sciences*, vol. 17(3) (1992), pp. 171-184.
- Gómez Delgado M. y Barredo Cano J. I. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Editorial RA-MA. Madrid, 2005.
- González Cabrera V. Física Fundamental. Editorial Progreso. México, 2004.
- Gough J. D. and Ward J. C. Environmental Decision-Making and Lake Management. *Journal of Environmental Management*, 48(1) (1996), pp. 1-15.
- Haghghat F. Application of a Multi-criteria Approach to Road Safety Evaluation in the Bushehr Province, Iran. *Promet – Traffic&Transportation*, Vol. 23, No. 5 (2011), pp. 341-352.
- Haimes Y. Y., Wismer D. A. and Lasdon L. S. On bicriterion formulation of the integrated system identification and system optimization. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, SMC-1 (1971), pp. 196-297.

- Harker P. T. and Vargas L. G. The theory of ratio scale estimation: Saaty's Analytic Hierarchy Process. *Management Science* 33 (1987), pp. 1383-1403.
- Herce Vallejo M. y Magrinyà Torner F. *La Ingeniería en la Evolución de la Urbanística*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 2003.
- Herrera F. and Herrera-Viedma E. Linguistic decision analysis: steps for solving decision problems under linguistic information. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 115 (2002), pp. 67-82.
- Herrera F., Herrera-Viedma E. and Martínez L. A fusion approach for managing multi-granularity linguistic term sets in decision making. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 114, no. 1 (2000), pp. 43-58.
- Herbsman Z., Tong Chen W. and Epstein W. Time is money: Innovative Contracting Methods in Highways Construction. *Journal of construction Engineering and management* (1995), pp. 273-281.
- Ho W., Dey P. K. and Higson H. Multiple criteria decision-making techniques in higher education. *International Journal of Educational Management*, vol. 20, no. 5 (2006), pp. 319-337.
- Hong J. Y. and Jeon J. Y. The effects of audio-visual factors on perceptions of environmental noise barrier performance. *Landscape and Urban Planning* 125 (2014), pp. 28-37.
- Hornikx M. and Forssén J. Noise abatement schemes for shielded canyons. *Applied Acoustics* 70 (2009), pp. 267-283.
- Hothersall D. C., Chandler-Wilde S. N. and Hajmirzae M. N. Efficiency of single noise barriers. *Journal of Sound and Vibration* (1991) 146(2), pp. 303-322.
- Howard R. and Matherson J. *The Principles and Applications of Decision Analysis Strategic Decision Group*. Menlo Park, California, 1984.
- Huey-Ming L. Applying fuzzy set theory to evaluate the rate of aggregative risk in software development. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 79, no. 3 (1996), pp. 323-336.
- Hsu M., Bhatt M., Adolphs R., Tranel D. and Camerer C.F. Neural systems responding to degrees of uncertainty in human decision-making. *Science* 310 (1995), pp. 1680-1683.

- Hwang C. L. and Yoon K. Multiple Attribute Decision Methods and Applications. Springer, Berlin Heidelberg ed., 1981.
- Iglesias Pérez C. Una visión general del Plan Director de Infraestructuras. Revista de Obras Públicas nº 3333 (1994), pp. 7-13.
- Ignizio J. P. Goal Programming and Extensions. Lexington Books. Massachusets, 1976.
- Ignizio J. P. Review of Goal Programming: A Tool for Multiobjective Analysis. Journal of the Operational Research Society, 27 (1978), pp.1109-1119.
- IMAGINE Project. Improved methods for the assessment of the generic impact of noise in the environment. State of the art. IMAGINE report IMA10TR-040423-AEATNL32, 14 October 2004.
- Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Fomento. Atlas Nacional de España. Centro Nacional de información geográfica, 2008.
- Ishikuza T. and Fujiwara K. Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions. Applied Acoustics 65 (2004), pp. 125-141.
- ISO 9613-1:1993(E). International Organization for Standardization. Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 1: Calculation of the absorption of sound in the atmosphere. Geneva, Switzerland, 1993(a).
- ISO 9613-2:1993(E). International Organization for Standardization. Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 2: General Method of Calculation. Geneva, Switzerland, 1993(b).
- Jacquet-Lagreze E. and Siskos J. Assessing a set of additive functions for multicriteria decision-making, the UTA method. European Journal of Operational Research 10 (1982), pp. 151-164.
- Jadhav A. S. and Sonar R. M. Evaluating and selecting softwarepackages: A review. Information and Software Technology, Volume 51, Issue 3 (2009), pp. 555-563.
- Jankowski P. Integrating geographical information system and multiple criteria decision-making methods. International Journal of Geographical Information Systems 9(3) (1995), pp.251-273.

- Jiménez Díaz, Santiago; Romeu Garbí, Jordi; Vega Carrera, Carlos. Plan de acción contra el ruido de actividades de ocio al aire libre. En Calvo-Manzano A. y Pérez-López A. (eds.) (Sociedad Española de Acústica), Publicación oficial del 45º Congreso Español de Acústica, 8º Congreso Ibérico de Acústica, European Symposium on Smart Cities and Environmental Acoustics, Murcia (2014), pp. 601-608.
- Kablan M. M. Decision support for energy conservation promotion: an analytic hierarchy process approach. *Energy Policy*, vol. 32, no. 10 (2004), pp. 1151-1158.
- Kahraman C. (Ed.). *Fuzzy Engineering with Applications*. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 2008(a).
- Kahraman C. (Ed.). *Fuzzy Multi-criteria Decision Making: theory and applications with recent developments*. Springer, Istanbul, Turkey, 2008(b).
- Kahraman C., Cebeci U. and Ulukan Z. Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP. *Logistics Information Management*, 16(6) (2003), pp.382-394.
- Kacprzyk J. and Yager R. R. Linguistic summaries of data using fuzzy logic. *International Journal of General Systems*, vol. 30 (2001), pp. 133-154.
- Kaufmann A. and Gupta M.M. *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*. North Holland, Amsterdam, 1988.
- Keeny R. L and Raiffa H. *Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*. Cambridge University Press. Cambridge, 1993.
- Kendall M. *Rank correlation methods*. 4th edition. Charles Griffin. Londres, 1970.
- King E. and Rice H. The development of a practical framework for strategic noise mapping. *Applied Acoustics* 70 (2009), pp. 1116-1127.
- Klir G. J. and Yuan B. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic*, Prentice Hall PTR, New Jersey ed 1995.
- Knoll A. L. and Engelberg A. Weighting multiple objectives. The Churchman-Ackoff technique revisited. *Computers and Operations Research*. Vol.5 (1978), pp. 165-177.
- Korhonen P., Wallenius J. and Zionst S. Solving the discrete multiple criteria problem using convex cones. *Management Science* 11(30) (1984), pp. 1336-1345.

- Korhonen P. K. A hierarchical interactive method for ranking alternatives with multiple qualitative criteria. *European Journal of Operational Research* 24 (1986), pp. 265-276.
- Korhonen P., Moskowitz H. and Wallenius J. Multiple Criteria Decision Support. A review. *European Journal of Operational Research* 63(3) (1992), pp. 361-375.
- Kosko B. *Neural networks and fuzzy systems*. Prentice Hall, NJ, USA, 1992.
- Koussa F., Defrance J., Jean P. and Blanc-Benon P. Acoustic performance of gabions noise barriers: Numerical and experimental approaches. *Applied Acoustics* 74 (2013), pp. 189-197.
- Kraemer C., Morilla Abad I. y del Val M. A. *Carreteras. Tráfico y Trazado*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Servicio de Publicaciones - Colección Escuelas. Madrid, 2001.
- Kruse R., Gebhardt J. and Klawonn F. *Foundations of Fuzzy Systems*. John Wiley & Sons, 1994.
- Kuhn H. W. and Tucker A. W. *Nonlinear Programming*. In *Proceedings of the second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. University of California Press, Berkeley, 1951.
- Kuo R. J., Chi S. C. and Kao S. S. A decision support system for locating convenience store through fuzzy AHP. *Computers & Industrial Engineering*, 37 (1999), pp. 323-326.
- Lai Y. J., Liu C. L. and Hwang C. L. TOPSIS for MCDM. *European Journal of Operational Research*, vol. 76, no. 3 (1994), pp. 486-500.
- Landeta J. *El método Delphi: Una técnica de previsión para la incertidumbre*. Ariel. Barcelona, 1999.
- Larichev O. and Moshkovich H. ZAPROS: A method and system for ordering multiattribute alternatives on the basis of a decision-maker's preferences. Moscow: Preprint of All Union Institute for Systems Studies, 1991.
- Larichev O., Moshkovich H., Mechitov A. and Olson D. Experiments comparing qualitative approaches to rank ordering of multiattribute alternatives. *Journal of Multicriteria Decision Analysis*, vol. 2 (1993), pp. 5-26.

- Lazcano Acedo J. F., Uriol Salcedo J. I. y Lacleta Muñoz Á. Carreteras. Revista de Obras Públicas nº 3.388 (1999), pp. 152-160.
- Lee D. J. and Hwang J. Decision support for selecting exportable nuclear technology using the analytic hierarchy process: A Korean case. EnergyPolicy, Volume 38, Issue 1 (2010), pp. 161-167.
- Lee S. M. Goal Programming for Decisión Analysis. Auerbach Publishers. Filadelfia, 1972.
- León O. G. Tomar decisiones difíciles. Segunda Edición. Ed. Universidad Autónoma de Madrid, 2001.
- Ley Orgánica 6/1981, de 30 de diciembre, de Estatuto de Autonomía para Andalucía. Boletín Oficial del Estado nº 9, de 11 de enero de 1982. Páginas 517 a 524.
- Ley Orgánica 2/2007, de 19 de marzo, de reforma del Estatuto de Autonomía para Andalucía. Boletín Oficial del Estado nº. 68, de 20 de marzo de 2007. Páginas 11871 a 11909
- Ley 25/1988, de 29 de julio, de Carreteras. Boletín Oficial del Estado nº 182, de 30 de julio de 1988. Páginas 23514 a 23524.
- Ley 7/1994, de 18 de mayo, de protección ambiental. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía nº 79, de 31 de mayo de 1994. Páginas 5774 a 5778.
- Ley 8/2001, de 12 de julio, de Carreteras de Andalucía. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía nº 85, de 26 de julio de 2001. Páginas 12799-12820.
- Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. Boletín Oficial del Estado nº 276, de 18 de noviembre de 2003. Páginas 40494 a 40505.
- Ley 7/2007, de 9 de julio, de gestión integrada de la calidad ambiental. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía nº 143, de 20 de julio de 2007. Páginas 4-48.
- Licitra G., Gallo P., Rossi E. and Brambilla G. A novel method to determine multiexposure priority indices tested for Pisa action plan. Applied Acoustics. Volume 72, Issue 8 (2011), pp. 505-510.
- Linstone H. A. and Turoff M. The Delphi method: techniques and applications. Addison-Wesley. Reading, Massachussets, 1975.

- Llamas Rubio R., Vilanova Martínez-Falero V. y Dominguez Herrera A. Medidas de bajo coste: su eficacia para reducir los accidentes. Actas del I Congreso Ibero-americano de Seguridad Vial. Costa Rica, 2008.
- Lootsma F. A and Schuijt H. The Multiplicative AHP, SMART and ELECTRE in a common context. *Journal of Multicriteria Decision Analysis*, vol. 6 (1997), pp. 185-196.
- Loro M., Arce R. M., Ortega E. and Martín B. Road-corridor planning in the EIA procedure in Spain. A review of case studies. *Environmental Impact Assessment Review* 44 (2014), pp. 11–21.
- Luce D. Semiorders and a theory of utility discrimination. *Econometrica* 24 (1956), pp. 178-191.
- Luce R. D. and Raiffa H. *Games and decision. Introduction and critical survey.* Dover Publications. New York, 1985.
- Macías Muñoz O. El largo despertar: los tiempos de la autarquía (1939-1959). *Revista TST (Transportes, Servicios y Telecomunicaciones)* nº 2. Madrid, 2002.
- Maffei L., Masullo M., Aletta F. and Di Gabriele M. The influence of visual characteristics of barriers on railway noise perception. *Science of the Total Environment* 445-446 (2013), pp. 41-47.
- Mahmoodzadeh S., Shahrabi J., Pariazar M. and Zaeri M. S. Project selection by using fuzzy AHP and TOPSIS technique. *International journal of Humanities and Social Sciences*, 1(3) (2007), pp. 135-140.
- Mak K. L., Lee S. H., Ho K. Y. and Hung W. T. Developing instantaneous tyre/road noise profiles: A note. *Transportation Research Part D* 16 (2011), pp. 257-259.
- Makarewicz R. Air absorption of traffic noise. *Journal of Sound and Vibration* (1993) 161(2), pp. 193-202.
- Manoj K. Criteria Based Decision Support System for selecting Highway alignments. *Journal of Transportation Engineering* 129(1) (2003), pp. 33-41.
- Manvell D. Geometric Post-Processing of GIS Data. *InterNoise*, Seogwipo, Korea, 2003(a).

- Manvell D. Software strategies in Noise Mapping. InterNoise, Seogwipo, Korea, 2003(b).
- Manvell D. and Aflalo E. Implementation of Noise Policy in the 15 Member States of the EU. InterNoise, Seogwipo, Korea, 2003.
- Manvell D. Current Trends in Environmental Noise Calculation Software in Europe. INCE, Japan, 2005.
- Marques Martins G. Uma contribuição ao gerenciamento de risco da segurança dos sistemas de transporte: um modelo fuzzy-hierárquico para a avaliação do nível de ameaça intencional a um sistema. Universidade Federal do Rio do Janeiro, 2008.
- Martín Frechilla J. J. y Texera Arnal Y. Así nos vieron: Cultura, Ciencia y Tecnología en Venezuela 1830-1940). Universidad Central de Venezuela. Caracas, 2001.
- Martín J. y Moreno A. Selección de una tecnología de red de accesoinalámbrica de banda ancha aplicando AHP. Actas del VI Congreso de Investigación y Creación Intelectual en la Unimet. Universidad Metropolitana. Venezuela, 2007.
- Martín-Ramos J. M. Modelos Multicriterio Difusos: Aplicaciones. Universidad de Granada, 2003.
- Martínez Alcubilla M. Diccionario de la Administración Española. Compilación de la novísima legislación de España peninsular y ultramarina. 9 vols. Madrid, 1894.
- Martinez L., Ruan D. and Herrera F. Computing with words in decision support systems: An overview on models and applications. International Journal of Computational Intelligence Systems, 3(4) (2010), pp. 382-395.
- Massam B. H. and Askew I. D. Methods for comparing policies using multiple criteria: An urban example. OMEGA 2(10) (1982), pp. 195-204.
- MathWorks Inc. Fuzzy Logic Toolbox User's Guide. The MathWorks, Inc. USA, 2002.
- McNeill F. M. and Thro E. Fuzzy Logic: A Practical Approach. AP professional, 1994.
- Mei-Tai C., Joseph S., Gwo-Hshiang T. and Rajiv K. Comparison among three analytical methods for knowledge communities group-decision analysis. Expert Systems with Applications, 33 (2007), pp. 1011-1024.

- Meiarashi S, Nakashiba F., Niimi H., Hasebe M. and Nakatsuji T. Quantitative comparison between noise reduction factors of drainage asphalt pavement. *Applied Acoustics* 44 (1995), pp. 165-179.
- Meiarashi S, Ishida M., Nakashiba F., Niimi H., Hasebe M. and Nakatsuji T. Improvement in the effect of drainage asphalt road surface on noise reduction. *Applied Acoustics* 47(3) (1996), pp. 189-204.
- Mellinas Fernández M. J. Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica; AHP y Topsis Fuzzificado. Universidad Politécnica de Cartagena, 2012.
- Menéndez Pidal G. Los caminos en la historia de España. Ediciones Cultura Hispánica. Madrid, 1951.
- Mikhailov L. Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgements. *Fuzzy Sets and Systems*, Volume 134, Issue 3 (2003), pp. 365-385.
- Milani A. S., Shanian A., Madoliat R. and Nemes J. A. The effect of normalization norms in multiple attribute decision making models: a case study in gear material selection. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 29(4) (2004), pp. 312-318.
- Miller G. The magical number 7, plus or minus 2 - some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, vol. 63, no. 2 (1956), pp. 81-97.
- Milford I., Aasebo S. J. and Strommer K. Value for money in road traffic noise abatement. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 48 (2012), pp. 1366-1374.
- Ministerio de Administraciones Públicas. Guía de orientación para la realización de estudios de análisis de la demanda y de encuestas de satisfacción. Madrid, 2006.
- Ministerio de Fomento. Plan Estratégico de Infraestructuras del Transporte. Documento de diagnóstico. Diciembre 2004.
- Ministerio de Fomento de España y Ministério das Obras Públicas, Transportes e comunicações de Portugal. Observatorio Transfronterizo España-Portugal. Documento nº 4. Marzo 2006.
- Ministerio de Fomento. Memoria anual. Año 2008.
- Ministerio de Fomento y Asociación Española de la Carretera. Autopistas y Autovías de España. 2010.

- Ministerio de Fomento. Criterios y condiciones técnicas para la elaboración de los mapas estratégicos de ruido de las carreteras de la Red del Estado 2ª fase 2012. Julio de 2010.
- Ministerio de Fomento. Anuario estadístico. Año 2012.
- Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales. Plan de Modernización de la Red de Carreteras Españolas. 1956.
- Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente (MOPTMA). Reducción del ruido en el entorno de las carreteras. Programa de investigación en carreteras y transportes Road Transport Research. Organización de Cooperación y Desarrollo Económico, OCDE, 1995.
- Ministerio del Interior. Dirección General de Tráfico. Anuario Estadístico General 2009.
- Miranda García F. y Guerrero Navarrete Y. Historia de España III. Medieval: territorios, sociedades y culturas. Sílex Ediciones. Madrid, 2008.
- Mizumoto M. and Tanaka K. The Four Operations of Arithmetic on Fuzzy Numbers. Systems, Computers, Controls 7 (1976), pp. 73-81.
- Mohammd J., Vadiie N. and Ross T. J. Fuzzy Logic and Control. Software and Hardware Applications. Eaglewood Cliffs, NJ:PTR. Prentice Hall, 1993.
- Mon D. L., Cheng C. H. and Lin J. C. Evaluating weapon system using fuzzy analytical hierarchy process based on entropy weight. Fuzzy Sets and Systems, 62 (1994), pp. 127-134.
- Moreno Gallo I. Vías romanas: ingeniería y técnica constructiva. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, CEDEX y CEHOPU. Madrid, 2006.
- Moreno Jiménez A. La medición de las externalidades ambientales: un enfoque espacio-temporal. Universidad Complutense. Madrid, 1995.
- Morihara T., Sato T. and Yano T. Comparison of dose-response relationships between railway and road traffic noises: the moderating effect of distance. Journal of Sound and Vibration 277 (2004), pp. 559-565.
- Möser M. y Barros J. L. Ingeniería Acústica: teoría y aplicaciones. Editorial Springer. Berlín, 2009.

- Murphy E. and King E. A. Strategic environmental noise mapping: Methodological issues concerning the implementation of the EU Environmental Noise Directive and their policy implications. *Environmental International* 36 (2010), pp. 290-298.
- Murphy E. and King E. A. Scenario analysis and noise action planning: Modelling the impact of mitigation measures on population exposure. *Applied Acoustics* 72 (2011), pp. 487-494.
- Naish D. A method of developing regional road traffic noise management strategy. *Applied Acoustics* 71 (2010), pp. 640-652.
- Nash J. F. The bargaining problem. *Econometrica*, 18 (1950), pp. 155-162.
- Nash J. F. Non cooperative games. *Annals of Mathematics*, 54 (1951), pp. 286-295.
- Negi D. S. Fuzzy analysis and optimization. Department of Industrial Engineering, Kansas State University, 1989.
- Nelson P. M. and Abbott P. G. Low noise road surfaces. *Applied Acoustics* 21 (1987), pp. 119-137.
- Nielsen G. and Solberg S. Costs and effects of traffic noise abatement measures: basis for a national programme. *Applied Acoustics* 25 (1988), pp. 149-168.
- Nijkamp P. and Delf A. V. Multi-criteria analysis and regional decision-making. Ed. S. K. B. V. Netherlands, 1977.
- Nijland H. A., Van Kempen E. E. M. M., Van Wee G. P. and Jabben J. Cost and benefits of noise abatement measures. *Transport Policy* 10 (2003), pp. 131-140.
- Nouvelle Méthode de Prevision du Bruit (NMPB) -Routes-96. STRA-CERTU-LCPC-CSTB, 1996.
- Novák Vilém, Perfilieva Irina and Močkoř Jiří. *Mathematical Principles of Fuzzy Logic*. Kluwer Academic Publishers. Massachusetts (EEUU), 1999.
- Ocampo Suárez-Valdés J. *Historia económica mundial y de España*. Universidad de Oviedo, 2006.
- Öhrström E., Skånberg A., Svensson H. and Gidlöf-Gunnarsson A. Effects of road traffic noise and the benefit of access to quietness. *Journal of Sound and Vibration* 295 (2006), pp. 40-59.

- Okubo T. and Yamamoto K. Procedures for determining the acoustic efficiency of edge-modified noise barriers. *Applied Acoustics* 68 (2007), pp. 797-819.
- Oltean-Dumbrava C., Watts G. and Miah A. Transport infrastructure: making more sustainable decisions for noise reduction. *Journal of Cleaner Production* 42 (2013), pp. 58-68.
- Opricovic S. Multi-criteria optimization of civil engineering systems. Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 1998.
- Opricovic S. and Tzeng G. H. Multicriteria planning of postearthquake sustainable reconstruction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 17 (2002), pp. 211-220.
- Orden FOM/3053/2008, de 23 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción técnica para la instalación de reductores de velocidad y bandas transversales de alerta en carreteras de la red de carreteras del Estado. Boletín Oficial del Estado nº 261, de 29 de octubre de 2008. Páginas 42795 a 42801.
- Ortega E. La Dirección de Marketing, ESIC, Madrid, 1987.
- Ortiz J., Del Cerro J. y Moncunill C. Carreteras y sostenibilidad. *Revista técnica de la Asociación Técnica de carreteras* No. 152 (2007), pp. 6-21.
- Ouis D. Annoyance from road traffic noise: a review. *Journal of Environmental Psychology* 21 (2001), pp. 101-120.
- Pacios A. y Martos G. Estimación del índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad en ejemplos de la edificación. *Cemento hormigón*, No. 913 (2008), pp. 70-83.
- Paelink J. H. P. QUALIFLEX, a flexible multiple criteria method. *Economic Letters* 3 (1978), pp. 193-197.
- Pardillo J. M. Respuestas a los usuarios-clientes de la carretera frente a la inseguridad viaria. *Carreteras* No. 143 (2005), pp. 50-62.
- Parrondo Gayo J. L., Velarde Suárez S., González Pérez J., Ballesteros Tajadura R. y Santolaria Morros C. *Acústica ambiental*. Universidad de Oviedo, 2006.

- Pastijn H. and Leysen J. Constructing an outranking relation with ORESTE. *Math1 Comput. Modelling*, 12(10/11) (1989), pp.1255-1268.
- Pavón I. and Recuero M. Noise maps: a tool for the demarcation of risk areas of noise exposure in the surface mining industry. 13th International Congress on Sound and Vibration (ICSV13). Vienna, Austria, 2006.
- Pedrycz W. and Gomide F. *An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design*. MIT Press, 1998.
- Pekelman D. and Sen S. K. Mathematical programming models for the determination of attribute weights. *Management Science* 20 (1974), pp. 1217-1229.
- Pellicer Armiñana T. M. *El sector de la construcción: una perspectiva internacional*. Universidad Politécnica de Valencia, 2004.
- Pendleton Hart H. *Determinación de un sistema de carreteras nacionales*. Ministerio de Obras Públicas. Madrid, 1940.
- Pérez Arriaga J. I., Alexandres Fernández S., García López J. L., Castilla A., Esquirol J. M. *Nuevas tecnologías y futuro del hombre*. Universidad Pontificia de Comillas. Madrid, 2003.
- Pompoli R., Farina A., Fausti P., Bassiano M., Invernizzi S. and Menini L. Intercomparison of traffic noise computer simulations. 18th International Congress for Noise Abatement AICB, Supplement. Bologna, Italy, 1995, pp. 523-559
- Ponte Arrebola V. *Régimen jurídico de las vías públicas en Derecho Romano*. Librería-Editorial Dykinson. Madrid, 2007.
- Pöyhönen M. and Hämäläinen R. P. Theory and Methodology on the covergence of multiattribute weighting methods. *European Journal of Operational Research* vol 129 (2001), pp. 569-585.
- Praticò F. G. and Anfosso Lédée F. Trends and issues in mitigating traffic noise through quiet pavements. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 53 (2012), pp. 203-212.
- Preciado J. M. S. *El planteamiento teórico multiobjetivo/multicriterio y su aplicación a la resolución de problemas medioambientales y territoriales, mediante los SIG Raster*. Espacio, Tiempo y Forma, seria XI, Geografía. Madrid, 1997.

- Pronello C. and Camusso C. A Review of Transport Noise Indicators. *Transport Reviews*, Vol. 32, No. 5 (2012), pp. 599-628.
- Puncel Chornet A. *La Autopista del Mediterráneo*. Universidad de Valencia, 1996.
- Rauscher H. M. Ecosystem management decision support for federal forests in the United States: A review. *For. Ecol. Manage.*, 114 (1999), pp.173-197.
- Real Decreto Legislativo 2/2008, de 20 de junio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de suelo. *Boletín Oficial del Estado*, núm. 154, de 26 de junio de 2008, páginas 28482 a 28504.
- Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental. *Boletín Oficial del Estado*, nº 301, de 17 de diciembre de 2005. Páginas 41356 a 41363.
- Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. *Boletín Oficial del Estado*, nº 254, de 23 de octubre de 2007. Páginas 42952 a 42973.
- Real Decreto 1038/2012, de 6 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de Noviembre, del ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. *Boletín Oficial del Estado* nº 178, de 26 de julio de 2012. Páginas 53556 a 53557.
- Recuero M., Gil C. y Grundman J. *Mapa de ruido de San Sebastián de los Reyes. Metodología de medidas y resultados*. Tecniacústica 1996. Barcelona, 1996.
- Recuero M., Gil C. y Grundman J. *Mapa de ruido de Segovia. Estudio de diferentes ambientes acústicos*. Tecniacústica 1997. Oviedo, 1997.
- Reguera Rodríguez A. T. *Geografía de Estado. Los marcos institucionales de la ordenación del territorio en la España contemporánea, 1800-1940*. Universidad de León, 1998.
- Regulation (EC) 1222/2009 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2009 on the labeling of tyres with respect to fuel efficiency and other essential parameters. *Official Journal of the European Union* 339, 22/12/2009.

- Regulation (EC) 661/2009 of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning type-approval requirements for the general safety of motor vehicles, their trailers and systems, components and separate technical units intended therefor. Official Journal of the European Union 200, 31/07/2009.
- Requeijo González J., Iranzo Martín J. E., Pedrosa Rodríguez M., Salido Herráiz J, Izquierdo Llanes G., Moral Rincón J., Martínez de Dios J., Barquín Gil R. y Arranz Peña N. Economía Española. Delta Publicaciones, 2007.
- Rietveld P. Information systems for regional labour markets. In Information Systems for integrated regional planning. P. Nijkamp and P. Rietveld (eds.). Amsterdam, North Holland Publ. Co, 1984, pp.163-176.
- Ríos S., Rios-Insua S. y Rios-Insua M. J. Procesos de Decisión Multicriterio. Madrid: EUDEMA S.A. Ediciones de la Universidad Complutense, S.A., 1989.
- Ríos S., Bielza C. y Mateos A. Fundamentos de los Sistemas de Ayuda a la Decisión. Rama Editorial, Madrid, 2006.
- Rodríguez J. I. La carretera que nos vio pasar. Revista Tráfico y Seguridad Vial. Dirección General de Tráfico. Ministerio del Interior. Nº 197. Madrid, 2009(a).
- Rodríguez J. I. Veteranos, pero en forma. La construcción de túneles carreteros en el siglo XX. Revista del Ministerio de Fomento nº 586. Julio-agosto 2009(b), pp. 58-75.
- Romero C. Teoría de la decisión Multicriterio: Conceptos, técnicas y aplicaciones. Madrid: Alianza Editorial S.A., 1993.
- Romero C. Análisis de las Decisiones Multicriterio. ISDEFE. Madrid, 1996.
- Romero Pérez J. L. El avance del II Plan General de Carreteras de Andalucía 1997-2007, hacia un modelo de planificación deslizante. I Congreso Andaluz de Carreteras. Construcción de carreteras en climas semiáridos. Tomo I. Asociación Española de la Carretera. Granada, 1998.
- Romeu J., Jiménez S., Genescà M. and Capdevila R. Spatial sampling for night levels estimation in urban environments. Journal of the Acoustical Society of America, 120 (2006), pp. 791-800.
- Roubens M. Preference relations on actions and criteria in multiple criteria decision making. European Journal of Operational Research 10 (1982), pp. 51-55.

- Roy B. Classement et choix en présence de points de vue multiples, la méthode ELECTRE. R.I.R.O., 2(8) (1968), pp. 57-75.
- Roy B. Vers une méthodologie général d'aide à la décision. *Metra*, 14(3) (1975), pp. 459-497.
- Roy B. ELECTRE III: Algorithme de classement basé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples. *Cahiers du C.E.R.O*, 22(1) (1978), pp. 3-24.
- Roy B. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Economica, Paris, 1985.
- Roy B. Decision-Aid and Decision Making. *European Journal of Operational Research*, vol. 45 (1991), pp. 324-331.
- Roy B. and Bertier P. La méthode ELECTRE II. Une application au mediaplanning. In M. Ross, editor, *Operations Research 72*, Dublin 1972, pages 291-302. North-Holland, 1973.
- Roy B. and Bouyssou D. *Aide à la décision: Méthodes et Cas*. Collection Gestion. Economica, Paris, 1993.
- Roy B. and Hugonnard J. Ranking of suburban line extension projects for the Paris metro system by a multicriteria method. *Transportation Research*, 16A (1982), pp. 301-312.
- Roy B. and Skalka J. M. ELECTRE IS: aspects méthodologiques et guide d'utilisation. Document du LAMSADE 30, Université de Paris-Dauphine, Paris, 1984.
- Roy B. and Vanderpooten D. An overview on "The European school of MCDA: Emergence, basic features and current works". *European Journal of Operational Research*, vol. 99, no. 1 (1997), pp. 26-27.
- Rueda Hernanz G. *España 1790-1900: sociedad y condiciones económicas*. Ediciones Istmo. Madrid, 2006.
- Ruiz-Padillo A., Torija A. J., Ramos-Ridao Á. and Ruiz D. P. A methodology for classification by priority for action: selecting road stretches for network noise action plans. *Transportation Research Part D* 29 (2014), pp. 66-78.
- Rylander R. and Björkman M. Road traffic noise influenced by road bumps. *Journal of Sound and Vibration* 250(1) (2002), pp. 157-159.

- Saaty T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 3(15) (1977), pp. 234-281.
- Saaty T. L. Exploring the Interface Between Hierarchies, Multiple Objectives and Fuzzy Sets. *Fuzzy Sets and Systems* 1 (1978), pp. 57-68.
- Saaty T. L. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill. New York, 1980.
- Saaty T.L. Axiomatization of the analytic hierarchy process. In Haimes and Chankong (eds.), 1985, pp. 91-108.
- Saaty T. L. Rank generation, preservation, and reversal in the analytic hierarchy decision process. *Decision Science*. 18(2) (1987), pp. 157-177.
- Saaty T. L. How to Make a Decision. *European Journal of Operational Research*, 48 (1990), pp. 9-26.
- Saaty T. L. *Fundamentals of decision making and priority theory*. Pittsburgh: RWS Publications, 1994.
- Saaty T. L. Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network processes. *European Journal of Operational Research*, 168 (2006), pp. 557-570.
- Saaty T. L. Relative measurement and its generalization in decision making - Why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors: the Analytic Hierarchy/Network Process. *Revista de la Real Academia de Ciencias Serie A: Matemáticas*. Vol. 102(2) (2008), pp. 251-318.
- Saaty T. L. and Sagir M. An essay on rank preservation and reversal. *Mathematical and Computer Modelling*. 49(5-6) (2009), pp. 1230-1243.
- Saaty T. L. and Vargas L. The legitimacy of rank reversal. *OMEGA* 12(5) (1984), pp. 513-516.
- Saaty T. L. and Vargas L. G. Experiments on rank preservation and reversal in relative measurement. *Mathematical and Computer Modelling*. 17(4-5) (1993), pp. 13-18.
- Salo A. and Hämäläinen R. Preference ratios in multiattribute evaluation (PRIME) - Elicitation and decision procedures under incomplete information. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 31(6) (2001), pp. 533-545.

- Sánchez Guerrero G. N. Técnicas participativas para la planeación. Procesos breves de intervención. Fundación ICa. México (2003).
- Sánchez Lázaro T. El vapor y la carretera. Revista de Obras Públicas nº 3.334 (1994), pp. 61-70.
- Sanchís Tarazona E. Carriles en las carreteras. Revista de Obras Públicas nº 1.126 (1897), pp. 420-422.
- Sanz, J. Conferencia de ruido ambiental. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, 2007.
- Sato T., Yano T., Björkman M. and Rylander R. Road traffic noise annoyance in relation to average noise level, number of events and maximum noise level. Journal of Sound and Vibration 223(5) (1999), pp. 775-784.
- Saura López F. J., Sánchez Román M. M. y Crespo del Río R. Evaluación del ruido en infraestructuras viarias. Ingenieros Consultores AEPO Volumen 6. Madrid, 2005.
- Schenkerman S. Avoiding rank reversal in AHP decision-support models. European Journal of Operational Research. 74(3) (1994), pp. 407-419.
- Segués Echazarreta F. y Alegre Marrades D. M. Gestión del ruido en infraestructuras de transporte. Metodología para elaboración de mapas de ruido y técnicas de reducción de los niveles sonoros mediante pavimentos absorbentes y sistemas de apantallamiento. Carreteras. Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera nº 150 (2006), pp. 124-155.
- Segués Echazarreta F. Conceptos básicos de ruido ambiental. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, 2007.
- Shepard R. N. On subjectively optimum selections among multi-attribute alternatives. In Human Judgements and Optimality. Shelley and Bryan. John Wiley, 1964.
- Schwertz E. L. The Local Growth Management Guidebook. Southern Growth Policies Board. Oklahoma State University, Oklahoma, 1979.
- Schoemaker P. J. H. and Waid C. C. An experimental comparison of different approaches to determining weights in additive utility models. Management Science, vol 28 (1982), pp. 182-196.

- Shannon C. E. and Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press. Chicago, 1949.
- Shärling A. *Décider sur plusieurs critères, panorama de l'aide à la décision multicritère*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1985.
- Sinha K. C. and Labi S. *Transportation Decision Making*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2007.
- Siddiqui M. Z., Everett J. W. and Vieux B. E. Landfill siting using Geographic Information Systems: a demonstration. *Journal of Environmental Engineering* 122(6) (1996), pp. 515-523.
- Silence Project. *Silence: Practitioner handbook for local noise action plans*. 2009. <www.silence-ip.org/site>.
- Simon H. A. A behavioral model of rational choice. *Quarterly Journal of Economics*, 69 (1954), pp. 99-118.
- Simon H. A. Rational choice and the structure of the environment. *Psychological Review*, 63 (1956), pp. 129-138.
- Siskos J. L., Lochard J. and Lombard J. A Multi-Criteria Decision Making Methodology under Fuzziness Applications to the Evaluation of Radiological Protection in Nuclear Power Plants. In: *TIMS/Studies in the Management Sciences*, Zimmermann, H.J. (Ed.). Elsevier, North Holland, 1984, pp. 261-283.
- Simon H. A. *The New Science of Management Decision*. New York: Harper and Row, 1960.
- Slovic P. and Lichtenstein S. Comparison of bayesian and regression approaches to the study of information processing in judgement. *Organization of Behaviour and Human Performance* 6(6) (1971), pp. 649-744.
- Smith R., Mesa O., Dyrner I., Jaramillo P., Poveda G. y Valencia D. *Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre*. 2ª edición. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia (2000).
- Solymosi T. and Dombi J. A method for determining the weights of criteria: The centralized weights. *European Journal of Operational Research* 26 (1986), pp. 35-41.

- Sommerhoff J., Recuero M. and Suárez E. Community noise survey of the city of Valdivia, Chile. *Applied Acoustics* 65 (2004), pp. 643-656.
- Soto Carmona Á. *El trabajo industrial en la España contemporánea: (1874-1936)*. Editorial Anthropos, Promat, S.C.L. Barcelona, 1989.
- Srinivasan V. and Shocker A. D. Estimating the weights for multiple attributes in a composite criterion using pairwise judgements. *Psychometrika* 38 (1973), pp. 473-493.
- Stapelfeldt H. and Shilton S. GIS and noise mapping - Recent solutions. *International Congress in Sound and Vibration ICSV13*. Vienna, Austria, 2006.
- Steele C. A critical review of some traffic noise prediction models. *Applied Acoustics* 62 (2001), pp. 271-287.
- Suárez E. y Recuero M. *Análisis comparativo sobre programas computacionales de predicción de ruido en exteriores*. Tecniacústica 2000. Madrid, 2000.
- Sur A&C and Omron Electronics, S.A. *Lógica Fuzzy para Principiantes*. Ed. I. Hernández, 1997.
- Tang S. K. and Tong K. K. Estimating traffic noise for inclined roads with freely flowing traffic. *Applied Acoustics* 65 (2004), pp. 171-181.
- Terano T., Asai K. and Sugeno M. *Fuzzy Systems Theory and Applications*. Academic Press. San Diego, California, 1992.
- Thorsson P. J. and Ögren M. Macroscopic modeling of urban traffic noise - influence of absorption and vehicle flow distribution. *Applied Acoustics* 66 (2005), pp. 195-209.
- Tochtermann K. Greening the super highway: practical steps to sustainability in the information society. *Foresight*, Volume 3, Issue 2 (2001), pp. 113 - 121.
- Togerson W. S. *Theory and Methods of Scaling*. John Wiley, New York, 1958.
- Tong M. and Bonissone P. P. A linguistic approach to decision making with fuzzy sets. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 10, no. 11 (1980), pp. 716-723.
- Tong R. and Bonissone P. P. Linguistic solutions to fuzzy decision problems. In *TIMS/Studies in the Management Science*. H. J. Zimmermann, Ed. Elsevier Science Publishers B.C., North-Holland, 1984, pp. 323-334.

- Torija A. J., Genaro N., Ruiz D. P., Ramos-Ridao, Á., Zamorano M. and Requena I. Priorization of acoustic variables: Environmental decision support for the physical characterization of urban sound environments. *Building and Environment* 45 (2010), pp.1477-1489.
- Torija A. J., Ruiz D. P., Alba-Fernández V. and Ramos Ridao Á. Noticed sound events management as a tool for inclusion in the action plans against noise in medium-sized cities. *Landscape and Urban Planning* 104 (2012), pp. 148-156.
- Torra V. Negation functions based semantics for ordered linguistic labels. *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 11, no. 11 (1996), pp. 975-988.
- Torra V. Aggregation of linguistic labels when semantics is based on antonyms," *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 16, no. 4 (2001), pp. 513-524.
- Triantaphyllou E. *Multi-criteria decision making methods: a comparative study*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/Boston/London, 2000.
- Tsita K. G. and Pilavachi P. A. Evaluation of alternative fuels for the Greek road transport sector using the analytic hierarchy process. *Energy Policy* 48 (2012), pp. 677-686.
- Tsoukiás A. *De la théorie de la décision à l'aide à la décision. Concepts et méthodes pour l'aide à la décision*, sous la direction de D. Bouyssou, D. Dubois, M. Pirlot et H. Prade. Lavoisier, Paris, 2006.
- Tung S. L. and Tang S. L. Comparison of the Saaty's AHP and modified AHP for right and left eigenvector inconsistency. *European Journal of Operational Research* 106 (1998), pp. 123-128.
- Turban E. and Aronson J. E. *Decision support systems and intelligent systems*. Fifth Edition. Prentice Hall. New Jersey, 1998.
- Tversky A. Intransitivity of preferences. *Psychological Review* 1(76) (1969), pp. 31-48.
- Tversky A. On the elicitation of preferences: descriptive and prescriptive considerations. In D. Bell, R. L. Keeney and H. Raiffa (eds.), *Conflicting objectives in Decisions*. John Wiley, New York, 1977.
- Uriol Salcedo J. I. *Historia de los caminos de España. Volúmenes I y II*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 2001.

- Vacik H. and Lexer M. J. Application of a spatial decision support system in managing the protection forests of Vienna for sustained yield of water resources. *Forest Ecology and Management* 143(1) (2001), pp. 65-76.
- Vallin P. and Vanderpooten D. *Aide à la Décision. Une approche par les cas*. Ellipses, France, 2002.
- Van Laarhoven P. J. M. and Pedrycz W. A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems*, Volume 11, Issues 1-3 (1983), pp.199-227.
- Van Renterghem T. and Botteldooren D. On the choice between walls and berms for road traffic noise shielding including wind effects. *Landscape and Urban Planning* 105 (2012), pp. 199-210.
- Van Renterghem T., Botteldooren D. and Verheyen K. Road traffic shielding by vegetation belts of limited depth. *Journal of Sound and Vibration* 331 (2012), pp. 2404-2425.
- Vansnick J. C. On the problem of weights in Multiple Criteria Decision Making (The Noncompensatory Approach). *European Journal of Operational Research* 24 (1986), pp. 288-294.
- Vargas G. An overview of the Analytic Hierachy Process and its Applications. *European Journal of Operational Research*, vol. 48 (1990), pp. 2-8.
- Versfeld N. J. and Vos J. A-weighted equivalent sound level as a predictor of the annoyance caused by road traffic consisting of various proportions of light and heavy vehicles. *Journal of sound and vibration* (2002) 253(2), pp. 389-399.
- Vincke P. *L'aide multicritère à la décision*. Éditions de l'Université de Bruxelles, Bruxelles, 1989.
- Von Neumann J. and Morgenstern O. *Theory of games and economic behaviour*. Princeton: Princeton University Press, 1944.
- Voogd H. *Multicriteria Evaluation for Urban and regional planning*. Pion Limited. London, 1983.
- Wang Y.M. and Luo Y. On rank reversal in decision analysis. *Mathematical and Computer Modelling* 49(5-6) (2009), pp. 1221-1229.

- Watson S. R. and Freeling A. N. S. Assessing attribute weights. *OMEGA* 6(10) (1982), pp. 582-583.
- Watts G. R. Acoustic performance of parallel traffic noise barriers. *Applied Acoustics* 47(2) (1996(a)), pp. 95-119.
- Watts G. R. Perception of exterior noise from traffic running on concrete and bituminous road surfacings. *Journal of Sound and Vibration* (1996(b)) 191(3), pp. 415-430.
- Watts G. R., Chandler-Wilde S. N. and Morgan P. A. The combined effects of porous asphalt surfacing and barriers on traffic noise. *Applied Acoustics* 58 (1999), pp. 351-377.
- Weck M., Klocke F., Schell H. and Ruenauer E. Evaluating alternative production cycles using the extended fuzzy AHP method. *European Journal of Operational Research*, 100(2) (1997), pp. 351-366.
- WG-AEN. European Commission Working Group. Assessment of exposure to noise. Good practice for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure. Version 2. August, 2007.
- WG-AEN. European Commission Working Group. Assessment of exposure to noise. Presenting Information to the Public. March, 2008.
- Williams T. E. H. Highway engineering and the influence of geometric design characteristics on noise. *Journal of Sound and Vibration* 15(1) (1971), pp. 17-22.
- Winterfeldt D. and Edwards W. *Decision Analysis and Behavioral Research*. Cambridge University Press, 1986.
- Wooldridge M. *An introduction to MultiAgent Systems*. Second Edition. Department of Computer Science, University of Liverpool, 2009.
- Wong J. and Li H. Application of the analytic hierarchy process (AHP) in multi-criteria analysis of the selection of intelligent building systems. *Building and Environment*, Volume 43, Issue 1 (2008), pp. 108-125.
- World Health Organisation. *Burden of disease from environmental noise*. WHO and JRC, Bonn, 2011.

- Xu Z. S. A method based on linguistic aggregation operators for group decision making with linguistic preference relations. *Information Sciences*, vol. 166, no. 1-4 (2004), pp. 19-30.
- Xu Z. S. Deviation measures of linguistic preference relations in group decision making. *Omega* 33(3) (2005), pp. 249-254.
- Yager R. R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 18(1) (1988), pp. 183-190.
- Yager R. R. Families of OWA operators. *Fuzzy Sets and Systems*, 59 (1993), pp. 125-148.
- Yager R. R. Aggregation operators and fuzzy systems modeling. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 67, no. 2 (1994), pp. 129-145.
- Yager R. R. An approach to ordinal decision making. *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 12, no. 3-4 (1995), pp. 237-261.
- Yoon K. A Reconciliation among Discrete Compromise Solutions. *Journal of the Operational Research Society*, 38(3) (1987), pp. 277-286.
- Yu W. Aide multicritère à la décision dans le cadre de la problématique du tri: concepts, méthodes et applications. Université de Paris-Dauphine, France, 1992.
- Zadeh L. A. Optimality and Non-Scalar-Valued performance criteria. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-8, 59 (1963).
- Zadeh L. A. Fuzzy Sets. *Information and Control* (1965), pp. 338-353.
- Zadeh L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics SMC-3* (1973), pp. 28-44.
- Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning: Part 1. *Information Sciences*, vol. 8, no. 3 (1975a), pp. 199-249.
- Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning: Part 2. *Information Sciences*, vol. 8, no. 4 (1975b), pp. 301-357.
- Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning: Part 3. *Information Sciences*, vol. 9, no. 1 (1975c), pp. 43-85.

- Zadeh L. A. Soft computing and fuzzy logic. *IEEE Software* 11(6) (1994), pp. 48-56.
- Zadeh L. A. Fuzzy logic = computing with words. *IEEE transactions on fuzzy systems*, vol. 4, no. 2 (1996), pp. 103-111.
- Zadeh L. A. Applied Soft Computing; Foreword. *Applied soft computing*, vol. 1, no. 1 (2001), p. 1.
- Zadeh L. A. Toward a generalized theory of uncertainty (GTU) - An outline. *Information Sciences* 172 (2005), pp. 1-40.
- Zadeh L. A. and Kacprzyk J. Computing with words in Information/Intelligent Systems. Heidelberg and New York: Physica-Verlang (Springer-Verlang), 1999.
- Zeleny M. Compromise programming. In: Multiple criteria decision making. J. L. Cochrane and M. Zeleny (Eds.). University of South Carolina Press, Columbia, South Carolina, 1973, pp. 263-301.
- Zeleny M. Linear Multiobjective Programming. Springer Verlag. New York, 1974.
- Zeleny M. Multiple criteria decision making. McGraw - Hill. New York, 1982.
- Zimmermann H. Fuzzy Set Theory and Its Applications. 2d ed. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993.
- Zionts S. A multiple criteria method for choosing among discrete alternatives. *European Journal of Operational Research* 7 (1981), pp. 143-147.
- Zorio Blanco V. Breve historia de las carreteras. *Revista de Obras Públicas* nº 3.254 (1987), pp. 27-38.

FORMULARIO DE INVESTIGACIÓN**ESTABLECIMIENTO DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN EN TRAMOS DE CARRETERAS INCLUIDOS EN UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO**

Por favor, rellene las cuestiones que se preguntan a continuación. La encuesta es anónima y no se publicará el nombre de ningún encuestado.

El formulario consta de 54 preguntas, agrupadas en las sucesivas pestañas de este libro Excel, en las que se destacan sobre fondo gris los campos para rellenar o bien se realiza la respuesta mediante la selección dentro de una lista desplegada. Por favor, no modifique otros campos.

El tiempo estimado para completar esta encuesta es de 45 min. Por favor, tómese el tiempo necesario para meditar las respuestas, puesto que las mismas son de capital importancia para el desarrollo de la investigación que se sustenta en ellas.

Cuando acabe cada cuestión, verifique que ha completado todas las celdas resaltadas y que ha seleccionado la respuesta deseada en todas las listas y continúe a las siguientes preguntas presionando en "CONTINUAR".

Si, por el contrario, desea regresar a la pestaña anterior para modificar sus respuestas o ha detectado un error que le obliga a retroceder, pulse en "VOLVER"

Por favor, no dude en contactar con el autor del estudio en caso de cualquier duda o necesidad de aclaración.

[CONTINUAR](#)

1. Ordene según la importancia del 1 al 9 (siendo el 1 el más importante y 9 el menos importante) que usted cree debe tener cada una de las siguientes variables en el problema de establecer prioridades de actuación entre los tramos de carreteras con problemas de ruido debido al tráfico, independientemente de la cantidad que alcance la variable y de los fondos económicos de los que se dispusiera para tratar dicho problema.

A continuación se relacionan las variables implicadas en el estudio junto a una breve descripción de las mismas.

Si tiene alguna duda, lea de nuevo las instrucciones:

[VOLVER A INSTRUCCIONES](#)

Por favor, no dude en contactar con el receptor de la encuesta en caso de cualquier consulta o necesidad de aclaración en relación con las mismas.

| SÍMBOLO | VARIABLES | SIGNIFICADO |
|---------|--|---|
| a | Atenuación necesaria | Exceso del nivel de ruido medido en el entorno de la carretera respecto del objetivo de calidad acústica definido para el mismo |
| b | Población expuesta | Número de personas expuestas a niveles de ruido superiores al objetivo de calidad acústica definido para el entorno de la carretera |
| c | Superficie expuesta | Área adyacente a la carretera expuesta a niveles de ruido superiores al objetivo de calidad acústica definido para el entorno de la misma |
| d | IMD | Intensidad media diaria de vehículos según el Plan de Aforos para el tramo de carretera estudiado |
| e | % vehículos pesados | Porcentaje de vehículos pesados según el Plan de Aforos para el tramo de carretera estudiado |
| f | Velocidad media de vehículos | Velocidad media de los vehículos según el Plan de Aforos para el tramo de carretera estudiado |
| g | Existencia de quejas | Existencia de quejas de ciudadanos vecinos a la carretera estudiada registradas en relación con el ruido provocado por el tráfico de la misma |
| h | Existencia de centros sensibles | Existencia de centros sensibles al ruido (docentes, culturales u hospitalarios) en el área expuesta a ruido excesivo debido al tráfico de la carretera |
| i | Medidas anti-ruido existentes o planificadas | Existencia o planificación insuficiente o ineficiente de medidas anti-ruido (pantallas acústicas, pavimentos fonoabsorbentes...) en el tramo de carretera estudiado |

Para ordenar las variables, escriba en las celdas sombreadas el carácter asignado a cada una de ellas (de la "a" a la "i") según la importancia que quiera asignarles, sin repetir ninguno de ellos

| ORDEN | VARIABLES | SÍMBOLO |
|-------|-----------|-----------------------------|
| 1 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 2 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 3 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 4 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 5 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 6 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 7 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 8 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 9 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |

2. Aparte de las variables anteriormente consideradas, ¿considera que es necesario contemplar alguna otra en el problema de establecer prioridades de actuación entre los tramos de carreteras con problemas de ruido debido al tráfico?

SÍ NO

Por favor, antes de continuar marque una respuesta en la pregunta nº 2.

3. Por favor, verifique que el orden deseado según importancia de las variables es el que se muestra a continuación. Recuerde que esta decisión es de suma importancia para las siguientes preguntas y el desarrollo de la investigación.

| ORDEN | VARIABLES |
|--------------|------------------|
| 1 | «VARIABLE 1» |
| 2 | «VARIABLE 2» |
| 3 | «VARIABLE 3» |
| 4 | «VARIABLE 4» |
| 5 | «VARIABLE 5» |
| 6 | «VARIABLE 6» |
| 7 | «VARIABLE 7» |
| 8 | «VARIABLE 8» |
| 9 | «VARIABLE 9» |

Si todas las celdas están rellenas, está de acuerdo y no existe ningún mensaje de error, pulse en "CONTINUAR":

[CONTINUAR](#)

Si quiere modificar el orden anterior o aparece algún mensaje de error, pulse en "VOLVER":

[VOLVER](#)

4-11. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a las 8 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con el establecimiento de prioridades de actuación entre los tramos de carreteras con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de las cantidades que alcanzaran las variables.

| ORDEN | VARIABLES |
|-------|--------------|
| 1 | «VARIABLE 1» |
| 2 | «VARIABLE 2» |
| 3 | «VARIABLE 3» |
| 4 | «VARIABLE 4» |
| 5 | «VARIABLE 5» |
| 6 | «VARIABLE 6» |
| 7 | «VARIABLE 7» |
| 8 | «VARIABLE 8» |
| 9 | «VARIABLE 9» |

VOLVER

| NIVELES DE IMPORTANCIA | |
|------------------------|-------------------------------|
| 1 | Igualmente importante |
| 2 | Moderadamente más importante |
| 3 | Más importante |
| 4 | Mucho más importante |
| 5 | Extremadamente más importante |

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 1» sobre la variable «VARIABLE 2»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 1» sobre la variable «VARIABLE 3»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 1» sobre la variable «VARIABLE 4»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 1» sobre la variable «VARIABLE 5»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 1» sobre la variable «VARIABLE 6»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 1» sobre la variable «VARIABLE 7»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 1» sobre la variable «VARIABLE 8»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 1» sobre la variable «VARIABLE 9»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

CONTINUAR

12-18. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a las 7 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con el establecimiento de prioridades de actuación entre los tramos de carreteras con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de las cantidades que alcanzaran las variables.

- ORDEN VARIABLES
- 1 «VARIABLE 1»
 - 2 «VARIABLE 2»
 - 3 «VARIABLE 3»
 - 4 «VARIABLE 4»
 - 5 «VARIABLE 5»
 - 6 «VARIABLE 6»
 - 7 «VARIABLE 7»
 - 8 «VARIABLE 8»
 - 9 «VARIABLE 9»

- NIVELES DE IMPORTANCIA
- 1 Igualmente importante
 - 2 Moderadamente más importante
 - 3 Más importante
 - 4 Mucho más importante
 - 5 Extremadamente más importante

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 2» sobre la variable «VARIABLE 3»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 2» sobre la variable «VARIABLE 4»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

VOLVER

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 2» sobre la variable «VARIABLE 5»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 2» sobre la variable «VARIABLE 6»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 2» sobre la variable «VARIABLE 7»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 2» sobre la variable «VARIABLE 8»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 2» sobre la variable «VARIABLE 9»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

CONTINUAR

19-24. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a las 6 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con el establecimiento de prioridades de actuación entre los tramos de carreteras con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de las cantidades que alcanzaran las variables.

- ORDEN VARIABLES
- 1 «VARIABLE 1»
 - 2 «VARIABLE 2»
 - 3 «VARIABLE 3»
 - 4 «VARIABLE 4»
 - 5 «VARIABLE 5»
 - 6 «VARIABLE 6»
 - 7 «VARIABLE 7»
 - 8 «VARIABLE 8»
 - 9 «VARIABLE 9»

[VOLVER](#)

NIVELES DE IMPORTANCIA

- 1 Igualmente importante
- 2 Moderadamente más importante
- 3 Más importante
- 4 Mucho más importante
- 5 Extremadamente más importante

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 3» sobre la variable «VARIABLE 4»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 3» sobre la variable «VARIABLE 5»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 3» sobre la variable «VARIABLE 6»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 3» sobre la variable «VARIABLE 7»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 3» sobre la variable «VARIABLE 8»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 3» sobre la variable «VARIABLE 9»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

[CONTINUAR](#)

25-29. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a las 5 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con el establecimiento de prioridades de actuación entre los tramos de carreteras con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de las cantidades que alcanzaran las variables.

- ORDEN VARIABLES
- 1 «VARIABLE 1»
 - 2 «VARIABLE 2»
 - 3 «VARIABLE 3»
 - 4 «VARIABLE 4»
 - 5 «VARIABLE 5»
 - 6 «VARIABLE 6»
 - 7 «VARIABLE 7»
 - 8 «VARIABLE 8»
 - 9 «VARIABLE 9»

- NIVELES DE IMPORTANCIA
- 1 Igualmente importante
 - 2 Moderadamente más importante
 - 3 Más importante
 - 4 Mucho más importante
 - 5 Extremadamente más importante

[VOLVER](#)

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 4» sobre la variable «VARIABLE 5»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 4» sobre la variable «VARIABLE 6»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 4» sobre la variable «VARIABLE 7»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 4» sobre la variable «VARIABLE 8»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 4» sobre la variable «VARIABLE 9»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

[CONTINUAR](#)

30-33. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a las 4 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con el establecimiento de prioridades de actuación entre los tramos de carreteras con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de las cantidades que alcanzaran las variables.

- ORDEN VARIABLES
- 1 «VARIABLE 1»
 - 2 «VARIABLE 2»
 - 3 «VARIABLE 3»
 - 4 «VARIABLE 4»
 - 5 «VARIABLE 5»
 - 6 «VARIABLE 6»
 - 7 «VARIABLE 7»
 - 8 «VARIABLE 8»
 - 9 «VARIABLE 9»

- NIVELES DE IMPORTANCIA
- 1 Igualmente importante
 - 2 Moderadamente más importante
 - 3 Más importante
 - 4 Mucho más importante
 - 5 Extremadamente más importante

VOLVER

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 5» sobre la variable «VARIABLE 6»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 5» sobre la variable «VARIABLE 7»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 5» sobre la variable «VARIABLE 8»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 5» sobre la variable «VARIABLE 9»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

CONTINUAR

34-36. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a las 3 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con el establecimiento de prioridades de actuación entre los tramos de carreteras con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de las cantidades que alcanzaran las variables.

- ORDEN VARIABLES
- 1 «VARIABLE 1»
 - 2 «VARIABLE 2»
 - 3 «VARIABLE 3»
 - 4 «VARIABLE 4»
 - 5 «VARIABLE 5»
 - 6 «VARIABLE 6»
 - 7 «VARIABLE 7»
 - 8 «VARIABLE 8»
 - 9 «VARIABLE 9»

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 6» sobre la variable «VARIABLE 7»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 6» sobre la variable «VARIABLE 8»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

[VOLVER](#)

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 6» sobre la variable «VARIABLE 9»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

[CONTINUAR](#)

- NIVELES DE IMPORTANCIA
- 1 Igualmente importante
 - 2 Moderadamente más importante
 - 3 Más importante
 - 4 Mucho más importante
 - 5 Extremadamente más importante

37-38. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a las 2 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con el establecimiento de prioridades de actuación entre los tramos de carreteras con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de las cantidades que alcanzaran las variables.

| ORDEN | VARIABLES |
|-------|--------------|
| 1 | «VARIABLE 1» |
| 2 | «VARIABLE 2» |
| 3 | «VARIABLE 3» |
| 4 | «VARIABLE 4» |
| 5 | «VARIABLE 5» |
| 6 | «VARIABLE 6» |
| 7 | «VARIABLE 7» |
| 8 | «VARIABLE 8» |
| 9 | «VARIABLE 9» |

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 7» sobre la variable «VARIABLE 8»?

Igualmente importante ▲

Moderadamente más importante

Más importante

Mucho más importante

Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 7» sobre la variable «VARIABLE 9»?

Igualmente importante ▲

Moderadamente más importante

Más importante

Mucho más importante

Extremadamente más importante ▼

[VOLVER](#)

[CONTINUAR](#)

NIVELES DE IMPORTANCIA

- 1 Igualmente importante
- 2 Moderadamente más importante
- 3 Más importante
- 4 Mucho más importante
- 5 Extremadamente más importante

39. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a la pregunta que se muestra a continuación mediante la lista desplegada, en relación con el establecimiento de prioridades de actuación entre los tramos de carreteras con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de las cantidades que alcanzaran la variables.

ORDEN VARIABLES

- 1 «VARIABLE 1»
- 2 «VARIABLE 2»
- 3 «VARIABLE 3»
- 4 «VARIABLE 4»
- 5 «VARIABLE 5»
- 6 «VARIABLE 6»
- 7 «VARIABLE 7»
- 8 «VARIABLE 8»
- 9 «VARIABLE 9»

1 ¿Qué importancia tiene la variable «VARIABLE 8» sobre la variable «VARIABLE 9»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

[CONTINUAR](#)

[VOLVER](#)

NIVELES DE IMPORTANCIA

- 1 Igualmente importante
- 2 Moderadamente más importante
- 3 Más importante
- 4 Mucho más importante
- 5 Extremadamente más importante

40. Teniendo en cuenta que cuando se analizan las áreas afectadas por el ruido provocado por el tráfico de las carreteras en su entorno, se diferencia entre los períodos diurno y nocturno para las mediciones de ruido y sus límites, responda a la pregunta que se muestra a continuación mediante la lista desplegada, en relación con el establecimiento de prioridades de actuación entre los tramos de carreteras con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de las cantidades que alcanzaran la variables.

NIVELES DE IMPORTANCIA

- 1 Igualmente importante
- 2 Moderadamente más importante
- 3 Más importante
- 4 Mucho más importante
- 5 Extremadamente más importante

1 ¿Qué importancia tendría la variable «Atenuación necesaria durante el período nocturno» sobre la variable «Atenuación necesaria durante el período diurno»?

| | |
|-------------------------------|---|
| Igualmente importante | ▲ |
| Moderadamente más importante | |
| Más importante | |
| Mucho más importante | |
| Extremadamente más importante | ▼ |

[VOLVER](#)

[CONTINUAR](#)

41-43. Teniendo en cuenta que cuando se analizan las áreas afectadas por el ruido provocado por el tráfico de las carreteras en su entorno, se diferencia entre los siguientes intervalos de Lden (nivel de intensidad acústica) 56-65, 66-75 y >75 dB(A), responda a las 3 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con el establecimiento de prioridades de actuación entre los tramos de carreteras con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de las cantidades que alcanzaran las variables.

$$\begin{aligned} \text{SUPERFICIE TOTAL EXPUESTA A VALORES EXCESIVOS DE RUIDO} &= \text{SUPERFICIE EXPUESTA A Lden}>55 \text{ dB(A)} \\ &+ \text{SUPERFICIE EXPUESTA A Lden}>65 \text{ dB(A)} \\ &+ \text{SUPERFICIE EXPUESTA A Lden}>75 \text{ dB(A)} \end{aligned}$$

NIVELES DE IMPORTANCIA

- 1 Igualmente importante
- 2 Moderadamente más importante
- 3 Más importante
- 4 Mucho más importante
- 5 Extremadamente más importante

VOLVER

1 ¿Qué importancia tendría la variable «Superficie expuesta a Lden>75 dB(A)» sobre la variable «Superficie expuesta a Lden>65 dB(A)»?

- ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- ▼

1 ¿Qué importancia tendría la variable «Superficie expuesta a Lden>75 dB(A)» sobre la variable «Superficie expuesta a Lden>55 dB(A)»?

- ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- ▼

1 ¿Qué importancia tendría la variable «Superficie expuesta a Lden>65 dB(A)» sobre la variable «Superficie expuesta a Lden>55 dB(A)»?

- ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- ▼

CONTINUAR

44-46. Teniendo en cuenta que cuando se analiza la población afectada por el ruido provocado por el tráfico de las carreteras en su entorno, se diferencia entre los siguientes intervalos de Lden (nivel de intensidad acústica) 56-65, 66-75 y >75 dB(A), responda a las 3 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con el establecimiento de prioridades de actuación entre los tramos de carreteras con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de las cantidades que alcanzaran las variables.

$$\begin{aligned} \text{POBLACIÓN TOTAL EXPUESTA A VALORES EXCESIVOS DE RUIDO} = & \text{POBLACIÓN EXPUESTA A Lden}>55 \text{ dB(A)} \\ & + \text{POBLACIÓN EXPUESTA A Lden}>65 \text{ dB(A)} \\ & + \text{POBLACIÓN EXPUESTA A Lden}>75 \text{ dB(A)} \end{aligned}$$

NIVELES DE IMPORTANCIA

- 1 Igualmente importante
- 2 Moderadamente más importante
- 3 Más importante
- 4 Mucho más importante
- 5 Extremadamente más importante

VOLVER

1 ¿Qué importancia tendría la variable «Población expuesta a Lden>75 dB(A)» sobre la variable «Población expuesta a Lden>65 dB(A)»?

- ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- ▼

1 ¿Qué importancia tendría la variable «Población expuesta a Lden>75 dB(A)» sobre la variable «Población expuesta a Lden>55 dB(A)»?

- ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- ▼

1 ¿Qué importancia tendría la variable «Población expuesta a Lden>65 dB(A)» sobre la variable «Población expuesta a Lden>55 dB(A)»?

- ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- ▼

CONTINUAR

47-49. Teniendo en cuenta que cuando se analizan los centros sensibles al ruido afectados por el tráfico de las carreteras en su entorno, se diferencia entre los siguientes intervalos de Lden (nivel de intensidad acústica) 56-65, 66-75 y >75 dB(A), responda a las 3 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con el establecimiento de prioridades de actuación entre los tramos de carreteras con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de las cantidades que alcanzaran las variables.

NÚMERO TOTAL DE CENTROS SENSIBLES EXPUESTOS A VALORES EXCESIVOS DE RUIDO =
(docentes, hospitalarios, culturales)
 NÚMERO DE CENTROS SENSIBLES EXPUESTOS A Lden>55 dB(A)
 + NÚMERO DE CENTROS SENSIBLES EXPUESTOS A Lden>65 dB(A)
 + NÚMERO DE CENTROS SENSIBLES EXPUESTOS A Lden>75 dB(A)

NIVELES DE IMPORTANCIA

- 1 Igualmente importante
- 2 Moderadamente más importante
- 3 Más importante
- 4 Mucho más importante
- 5 Extremadamente más importante

[VOLVER](#)

1 ¿Qué importancia tendría la variable «Nº centros sensibles expuestos a Lden>75 dB(A)» sobre la variable «Nº centros sensibles expuestos a Lden>65 dB(A)»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tendría la variable «Nº centros sensibles expuestos a Lden>75 dB(A)» sobre la variable «Nº centros sensibles expuestos a Lden>55 dB(A)»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tendría la variable «Nº centros sensibles expuestos a Lden>65 dB(A)» sobre la variable «Nº centros sensibles expuestos a Lden>55 dB(A)»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

[CONTINUAR](#)

La normativa europea que regula los estudios y actuaciones necesarias en relación con el ruido provocado por el tráfico de las carreteras establece que en 2007 debían analizarse aquellos tramos de carretera cuyo tráfico medio anual superara los 6 millones de vehículos.

VOLVER

Teniendo en cuenta ese criterio, y de acuerdo con los datos del Plan General de Aforos de Andalucía, los tramos de carreteras autonómicas que superaban ese tráfico son los que se relacionan a continuación.

38

50. ¿Tiene constancia de la existencia de quejas de ciudadanos en relación con el ruido provocado por el tráfico de estos tramos de carreteras o partes de ellos?
 Por favor, escriba en las celdas sombreadas "S" en caso afirmativo o "N" en caso negativo. No deje ninguna celda sombreada sin rellenar ni escriba otros caracteres distintos.

| Nº TRAMO | CARRETERA | PK INICIO | PK FINAL | SITUACIÓN | EXISTENCIA DE QUEJAS |
|----------|-----------|-----------|----------|--|------------------------------|
| 1 | A-92 | 176+500 | 296+100 | LIM. MALAGA (A-92M) - GUADIX (A-92N) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 2 | A-92 | 145+600 | 152+500 | A-343 - A-45 | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 3 | A-92 | 0+000 | 106+500 | SEVILLA (SE-30) - ESTEPA (A-318) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 4 | A-92G | 0+000 | 8+950 | SANTA FE (A-92) - GRANADA (N-432) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 5 | A-92M | 0+000 | 25+870 | ESTACIÓN DE SALINAS (A-92) - VILLANUEVA DE CAUCHE (PTO. DE LAS PEDRIZAS, A-45) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 6 | A-381 | 82+000 | 88+120 | LOS BARRIOS (CA-9207) - ALGECIRAS (A-7) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 7 | A-316 | 56+240 | 76+060 | JAÉN (J-12) - TORREDONJIMENO (A-306) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 8 | A-356 | 44+500 | 48+550 | VELEZ MALAGA (MA-3116) - TORRE DEL MAR (A-7) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 9 | A-357 | 46+800 | 69+070 | ZALEA (MA-3302) - MÁLAGA (A-7) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 10 | A-376 | 0+000 | 25+310 | SEVILLA (SE-30) - UTRERA (A-362) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 11 | A-382 | 0+000 | 20+000 | JEREZ (AP-4) - ARCOS DE LA FRONTERA (A-382a) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 12 | A-395 | 0+000 | 4+000 | GRANADA (A-44) - HUÉTOR VEGA (A-4028) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 13 | A-398 | 0+000 | 5+700 | ALCALA DE GUADÁIRA (A-92) - MAIRENA DEL ALCOR (VTE. A-398) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 14 | A-404 | 28+000 | 29+550 | CHURRIANA - MA-21 | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 15 | A-431 | 0+000 | 5+850 | CORDOBA - VILLARUBIA (CO-3314) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 16 | A-474 | 0+000 | 3+000 | CASTILLEJA DE LA CUESTA (A-49) - BORMUJOS (A-8056) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 17 | A-480 | 22+000 | 26+990 | A-2078 - JEREZ (N-IV) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 18 | A-491 | 24+700 | 27+600 | EL PUERTO DE STA Mª (A-2001) - CA-31 | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 19 | A-492 | 0+000 | 3+130 | LOS CORRALES (A-497) - BELLAVISTA (A-5077) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 20 | A-497 | 0+000 | 16+810 | HUELVA - PUNTA UMBRÍA (A-5050) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 21 | A-1000 | 0+000 | 3+000 | HUÉRCAL DE ALMERÍA (N-340a) - VIATOR (A-7) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 22 | A-1051 | 0+000 | 2+300 | A-7 - PARADOR | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 23 | A-3050 | 0+000 | 5+450 | RONDA OESTE DE CÓRDOBA | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 24 | A-4028 | 0+000 | 1+250 | GRANADA (A-395) - HUÉTOR VEGA (A-4027) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 25 | A-5056 | 0+000 | 4+730 | LEPE (N-431) - LA ANTILLA (A-5055) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 26 | A-7052 | 7+350 | 9+750 | A-7057 - A-357 | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 27 | A-7282 | 9+200 | 14+130 | ACCESO A ANTEQUERA (A-7283 - A-343) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 28 | A-8004 | 0+500 | 1+800 | A-8009 - SAN JOSE DE LA RINCONADA | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 29 | A-8006 | 19+600 | 24+380 | LA ALGABA (A-8079) - SEVILLA (SE-020) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 30 | A-8009 | 0+000 | 3+500 | SEVILLA (SE-020) - SAN JOSÉ DE LA RINCONADA (A-8004) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 31 | A-8028 | 0+000 | 4+460 | SEVILLA (SE-30) - TORREBLANCA (A-92) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 32 | A-8057 | 0+000 | 2+790 | S. J. AZNALFARACHE (A-8058) - MAIRENA (A-8068) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 33 | A-8058 | 0+000 | 9+500 | SEVILLA (SE-30) - CORIA DEL RÍO (A-8051) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 34 | A-8062 | 0+000 | 1+800 | BORMUJOS (A-474) - GINES (A-8076) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 35 | A-8076 | 0+000 | 5+200 | GINES (A-8062) - ESPARTINAS (A-8075) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 36 | A-8077 | 0+000 | 2+400 | CAMAS (A-66a) - CASTILLEJA DE GUZMÁN (SE-3402) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 37 | A-8082 | 0+000 | 1+940 | CAMAS (LA PAÑOLETA) - SAN JUAN DE AZNALFARACHE | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |
| 38 | A-8082R | 0+000 | 0+680 | SAN JUAN DE AZNALFARACHE (A-8082) - TOMARES (A-8066) | COMPLETE LA CELDA SOMBRREADA |

51. Aparte de estos tramos, ¿existe en esta provincia algún otro tramo de carretera del que tenga constancia de quejas de ciudadanos en relación con el ruido provocado por el tráfico?

sí NO

Por favor, antes de continuar marque una respuesta en la pregunta nº 51.

54. Para finalizar, y teniendo en cuenta las variables que intervienen en este estudio y la importancia dada a las mismas anteriormente, escriba el orden de prioridad partiendo del número 1 (siendo el 1 el más prioritario) que usted cree debe tener cada uno de los tramos de carreteras analizados en su provincia a la hora de actuar en los problemas de ruido debido al tráfico que pudieran presentar.

Recuerde que las variables ordenadas según la importancia dada son las siguientes:

| ORDEN | VARIABLES |
|-------|--------------|
| 1 | «VARIABLE 1» |
| 2 | «VARIABLE 2» |
| 3 | «VARIABLE 3» |
| 4 | «VARIABLE 4» |
| 5 | «VARIABLE 5» |
| 6 | «VARIABLE 6» |
| 7 | «VARIABLE 7» |
| 8 | «VARIABLE 8» |
| 9 | «VARIABLE 9» |

Por favor, numere según la prioridad que piensa deben las actuaciones necesarias en los tramos en relación con el problema de ruido debido al tráfico:

| Nº TRAMO | CARRETERA | PK INICIO | PK FINAL | SITUACIÓN | ORDEN |
|----------|-----------|-----------|----------|--|-----------------------------|
| 1 | A-92 | 176+500 | 296+100 | LIM. MALAGA (A-92M) - GUADIX (A-92N) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 2 | A-92 | 145+600 | 152+500 | A-343 - A-45 | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 3 | A-92 | 0+000 | 106+500 | SEVILLA (SE-30) - ESTEPA (A-318) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 4 | A-92G | 0+000 | 8+950 | SANTA FE (A-92) - GRANADA (N-432) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 5 | A-92M | 0+000 | 25+870 | ESTACIÓN DE SALINAS (A-92) - VILLANUEVA DE CAUCHE (PTO. DE LAS PEDRIZAS, A-45) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 6 | A-381 | 82+000 | 88+120 | LOS BARRIOS (CA-9207) - ALGECIRAS (A-7) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 7 | A-316 | 56+240 | 76+060 | JAÉN (J-12) - TORREDONJIMENO (A-306) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 8 | A-356 | 44+500 | 48+550 | VELEZ MALAGA (MA-3116) - TORRE DEL MAR (A-7) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 9 | A-357 | 46+800 | 69+070 | ZALEA (MA-3302) - MÁLAGA (A-7) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 10 | A-376 | 0+000 | 25+310 | SEVILLA (SE-30) - UTRERA (A-362) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 11 | A-382 | 0+000 | 20+000 | JEREZ (AP-4) - ARCOS DE LA FRONTERA (A-382a) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 12 | A-395 | 0+000 | 4+000 | GRANADA (A-44) - HUÉTOR VEGA (A-4028) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 13 | A-398 | 0+000 | 5+700 | ALCALA DE GUADAÍRA (A-92) - MAIRENA DEL ALCOR (VTE. A-398) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 14 | A-404 | 28+000 | 29+550 | CHURRIANA - MA-21 | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 15 | A-431 | 0+000 | 5+850 | CÓRDOBA - VILLARUBIA (CO-3314) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 16 | A-474 | 0+000 | 3+000 | CASTILLEJA DE LA CUESTA (A-49) - BORMUJOS (A-8056) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 17 | A-480 | 22+000 | 26+990 | A-2078 - JEREZ (N-IV) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 18 | A-491 | 24+700 | 27+800 | EL PUERTO DE STA Mª (A-2001) - CA-31 | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 19 | A-492 | 0+000 | 3+130 | LOS CORRALES (A-497) - BELLAVISTA (A-5077) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 20 | A-497 | 0+000 | 16+810 | HUELVA - PUNTA UMBRÍA (A-5050) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 21 | A-1000 | 0+000 | 3+000 | HUÉRCAL DE ALMERÍA (N-340a) - VIATOR (A-7) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 22 | A-1051 | 0+000 | 2+300 | A-7 - PARADOR | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 23 | A-3050 | 0+000 | 5+450 | RONDA OESTE DE CÓRDOBA | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 24 | A-4028 | 0+000 | 1+250 | GRANADA (A-395) - HUÉTOR VEGA (A-4027) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 25 | A-5056 | 0+000 | 4+730 | LEPE (N-431) - LA ANTILLA (A-5055) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 26 | A-7052 | 7+350 | 9+750 | A-7057 - A-357 | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 27 | A-7282 | 9+200 | 14+130 | ACCESO A ANTEQUERA (A-7283 - A-343) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 28 | A-8004 | 0+500 | 1+800 | A-8009 - SAN JOSE DE LA RINCONADA | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 29 | A-8006 | 19+600 | 24+380 | LA ALGABA (A-8079) - SEVILLA (SE-020) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 30 | A-8009 | 0+000 | 3+500 | SEVILLA (SE-020) - SAN JOSÉ DE LA RINCONADA (A-8004) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 31 | A-8028 | 0+000 | 4+460 | SEVILLA (SE-30) - TORREBLANCA (A-92) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 32 | A-8057 | 0+000 | 2+790 | S. J. AZNALFARACHE (A-8058) - MAIRENA (A-8068) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 33 | A-8058 | 0+000 | 9+500 | SEVILLA (SE-30) - CORIA DEL RÍO (A-8051) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 34 | A-8062 | 0+000 | 1+800 | BORMUJOS (A-474) - GINES (A-8076) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 35 | A-8076 | 0+000 | 5+200 | GINES (A-8062) - ESPARTINAS (A-8075) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 36 | A-8077 | 0+000 | 2+400 | CAMAS (A-68a) - CASTILLEJA DE GUZMÁN (SE-3402) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 37 | A-8082 | 0+000 | 1+940 | CAMAS (LA PAÑOLETA) - SAN JUAN DE AZNALFARACHE | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 38 | A-8082R | 0+000 | 0+680 | SAN JUAN DE AZNALFARACHE (A-8082) - TOMARES (A-8066) | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |

Si ha rellenado todas las celdas sombreadas sin repetir ningún valor, está satisfecho con sus respuestas y no existe ningún mensaje de error, guarde el archivo y reenvíelo a la dirección de correo electrónica indicada en el e-mail que le fue enviado con el formulario.

MUCHAS GRACIAS POR SU COLABORACIÓN.

FORMULARIO DE INVESTIGACIÓN**ANÁLISIS MULTICRITERIO DE DECISIÓN DE ALTERNATIVAS DE ACTUACIÓN EN TRAMOS DE CARRETERAS INCLUIDOS EN UN PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO**

Por favor, rellene las cuestiones que se preguntan a continuación. La encuesta es anónima y no se publicará el nombre de ningún encuestado.

El formulario consta de 43 preguntas, agrupadas en las sucesivas pestañas de este libro Excel, en las que se destacan sobre fondo gris los campos para rellenar o bien se realiza la respuesta mediante la selección dentro de una lista desplegada. Por favor, no modifique otros campos.

El tiempo estimado para completar esta encuesta es de 20 min. Por favor, tómese el tiempo necesario para meditar las respuestas, puesto que las mismas son de capital importancia para el desarrollo de la investigación que se sustenta en ellas.

Cuando acabe cada cuestión, verifique que ha completado todas las celdas resaltadas y que ha seleccionado la respuesta deseada en todas las listas y continúe a las siguientes preguntas presionando en "CONTINUAR".

Si, por el contrario, desea regresar a la pestaña anterior para modificar sus respuestas o ha detectado un error que le obliga a retroceder, pulse en "VOLVER".

Por favor, no dude en contactar con el autor del estudio en caso de cualquier duda o necesidad de aclaración.

CONTINUAR

1. Ordene según la importancia del 1 al 5 (siendo el 1 el más importante y 5 el menos importante) que usted cree debe tener cada uno de los siguientes grupos de criterios en el problema de toma de decisiones sobre la alternativa más idónea para actuación sobre un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico.

A continuación se relacionan los grupos de criterios utilizados en el estudio junto a una breve descripción de los mismos.

Si tiene alguna duda, lea de nuevo las instrucciones:

[VOLVER A INSTRUCCIONES](#)

Por favor, no dude en contactar con el receptor de la encuesta en caso de cualquier consulta o necesidad de aclaración en relación con los mismos.

| SÍMBOLO | GRUPOS DE CRITERIOS | SIGNIFICADO |
|---------|-----------------------------------|--|
| a | Afección a la infraestructura | Afección generada a la carretera por la medida anti-ruido implantada ("efectos colaterales" sobre los vehículos que discurren por ella) Incluye afección a la facilidad del usuario para cruzar o acceder a la carretera, visibilidad de los conductores y velocidad del tráfico |
| b | Coste económico | Costes añadidos a la infraestructura con motivo de la implantación de la medida anti-ruido Incluye costes de primera implantación así como de mantenimiento y funcionamiento posterior de dicha medida |
| c | Efectos sociales | Consecuencias, adicionales a la propia reducción del ruido, que la medida anti-ruido tiene sobre la población usuaria de la carretera y del entorno Incluye afección a la seguridad vial, gastos adicionales en los vehículos y cambios en la calidad de vida y en el valor de las propiedades colindantes a la carretera |
| d | Efectos ambientales | Cambios en condiciones ambientales del entorno de la carretera, adicionales a la reducción del ruido, que genera la medida implantada en la misma Incluye afección en la calidad del aire, calidad de visión e iluminación de la carretera y calidad paisajística del entorno de la misma |
| e | Corrección funcional del problema | Mejora en los indicadores de ruido según normativa del ruido ambiental Comprendido por la población, viviendas, área afectada y centros sensibles en los que el ruido se reduce gracias a la medida implantada |

Para ordenar los grupos de criterios, escriba en las celdas sombreadas el carácter asignado a cada uno de ellos (de la "a" a la "e") según la importancia que quiera asignarles, sin repetir ninguno de ellos:

| ORDEN | GRUPOS DE CRITERIOS | SÍMBOLO |
|-------|---------------------|-----------------------------|
| 1 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 2 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 3 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 4 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 5 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |

Si ha rellenado todas las celdas sombreadas, está satisfecho con sus respuestas y no existe ningún mensaje de error, continúe:

[CONTINUAR](#)

2. Por favor, verifique que el orden deseado según importancia de los grupos de criterios es el que se muestra a continuación. Recuerde que esta decisión es de suma importancia para las siguientes preguntas y el desarrollo de la investigación.

| ORDEN | GRUPOS DE CRITERIOS | |
|--------------|----------------------------|------------|
| 1 | «CRITERIO 1» | Criterio 1 |
| 2 | «CRITERIO 2» | Criterio 2 |
| 3 | «CRITERIO 3» | Criterio 3 |
| 4 | «CRITERIO 4» | Criterio 4 |
| 5 | «CRITERIO 5» | Criterio 5 |

Si todas las celdas están rellenas, está de acuerdo y no existe ningún mensaje de error, pulse en "CONTINUAR":

[CONTINUAR](#)

Si quiere modificar el orden anterior o aparece algún mensaje de error, pulse en "VOLVER":

[VOLVER](#)

3-6. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a las 4 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con la elección de la alternativa idónea de actuación en un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico.

| ORDEN | GRUPOS DE CRITERIOS | SIGNIFICADO |
|-------|---------------------|-------------|
| 1 | «CRITERIO 1» | Criterio 1 |
| 2 | «CRITERIO 2» | Criterio 2 |
| 3 | «CRITERIO 3» | Criterio 3 |
| 4 | «CRITERIO 4» | Criterio 4 |
| 5 | «CRITERIO 5» | Criterio 5 |

VOLVER

NIVELES DE IMPORTANCIA

- 1 Igualmente importante
- 2 Moderadamente más importante
- 3 Más importante
- 4 Mucho más importante
- 5 Extremadamente más importante

1 ¿Qué importancia tiene el grupo «CRITERIO 1» sobre el grupo «CRITERIO 2»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el grupo «CRITERIO 1» sobre el grupo «CRITERIO 3»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el grupo «CRITERIO 1» sobre el grupo «CRITERIO 4»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el grupo «CRITERIO 1» sobre el grupo «CRITERIO 5»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

CONTINUAR

7-9. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a las 3 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con la elección de la alternativa idónea de actuación en un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico.

| ORDEN | GRUPOS DE CRITERIOS | SIGNIFICADO |
|-------|---------------------|-------------|
| 1 | «CRITERIO 1» | Criterio 1 |
| 2 | «CRITERIO 2» | Criterio 2 |
| 3 | «CRITERIO 3» | Criterio 3 |
| 4 | «CRITERIO 4» | Criterio 4 |
| 5 | «CRITERIO 5» | Criterio 5 |

[VOLVER](#)

NIVELES DE IMPORTANCIA

- 1 Igualmente importante
- 2 Moderadamente más importante
- 3 Más importante
- 4 Mucho más importante
- 5 Extremadamente más importante

1 ¿Qué importancia tiene el grupo «CRITERIO 2» sobre el grupo «CRITERIO 3»?

- ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el grupo «CRITERIO 2» sobre el grupo «CRITERIO 4»?

- ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el grupo «CRITERIO 2» sobre el grupo «CRITERIO 5»?

- ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

[CONTINUAR](#)

10-11. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a las 2 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con la elección de la alternativa idónea de actuación en un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico.

| ORDEN | GRUPOS DE CRITERIOS | SIGNIFICADO |
|-------|---------------------|-------------|
| 1 | «CRITERIO 1» | Criterio 1 |
| 2 | «CRITERIO 2» | Criterio 2 |
| 3 | «CRITERIO 3» | Criterio 3 |
| 4 | «CRITERIO 4» | Criterio 4 |
| 5 | «CRITERIO 5» | Criterio 5 |

[VOLVER](#)

NIVELES DE IMPORTANCIA

- 1 Igualmente importante
- 2 Moderadamente más importante
- 3 Más importante
- 4 Mucho más importante
- 5 Extremadamente más importante

1 ¿Qué importancia tiene el grupo «**CRITERIO 3**» sobre el grupo «**CRITERIO 4**»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el grupo «**CRITERIO 3**» sobre el grupo «**CRITERIO 5**»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

[CONTINUAR](#)

12. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a la pregunta que se muestra a continuación mediante la lista desplegada, en relación con la elección de la alternativa idónea de actuación en un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico.

| ORDEN | GRUPOS DE CRITERIOS | SIGNIFICADO |
|-------|---------------------|-------------|
| 1 | «CRITERIO 1» | Criterio 1 |
| 2 | «CRITERIO 2» | Criterio 2 |
| 3 | «CRITERIO 3» | Criterio 3 |
| 4 | «CRITERIO 4» | Criterio 4 |
| 5 | «CRITERIO 5» | Criterio 5 |

[VOLVER](#)

NIVELES DE IMPORTANCIA

- 1 Igualmente importante
- 2 Moderadamente más importante
- 3 Más importante
- 4 Mucho más importante
- 5 Extremadamente más importante

1 ¿Qué importancia tiene el grupo ««CRITERIO 4»» sobre el grupo ««CRITERIO 5»»?

Igualmente importante ▲

Moderadamente más importante

Más importante

Mucho más importante

Extremadamente más importante ▼

[CONTINUAR](#)

13. Ordene según la importancia del 1 al 3 (siendo el 1 el más importante y 3 el menos importante) que usted cree debe tener cada uno de los siguientes criterios en el problema de toma de decisiones de la alternativa más idónea para actuación sobre un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico.

A continuación se relacionan los criterios del grupo «Afección a la infraestructura» utilizados en el estudio junto a una breve descripción de los mismos [VOLVER](#)
 Por favor, no dude en contactar con el receptor de la encuesta en caso de cualquier consulta o necesidad de aclaración en relación con los mismos.

| SÍMBOLO | CRITERIOS | SIGNIFICADO |
|---------|---------------------------|--|
| a | Permeabilidad territorial | Variación en la distancia que debe recorrer un usuario para cruzar o acceder a la carretera, una vez que la medida anti-ruido ha sido implantada |
| b | Visibilidad en carretera | Variación en la distancia de visibilidad que poseen los conductores de la carretera al implantarse la medida anti-ruido elegida |
| c | Velocidad del tráfico | Variación de la velocidad que pueden alcanzar los conductores en la carretera, una vez que la medida anti-ruido ha sido implantada |

Para ordenar los criterios, escriba en las celdas sombreadas el carácter asignado a cada uno de ellos (de la "a" a la "c") según la importancia que quiera asignarles, sin repetir ninguno de ellos

| ORDEN | CRITERIOS | SÍMBOLO |
|-------|-----------|-----------------------------|
| 1 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 2 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 3 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |

14. Aparte de los criterios anteriormente considerados, ¿considera que es necesario contemplar algún otro dentro del grupo «Afección a la infraestructura» a tener en cuenta en la elección de la alternativa idónea para actuar en un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico?

SÍ NO

Por favor, antes de continuar marque una respuesta en la pregunta nº 14.

15-17. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a las 3 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con la elección de la alternativa idónea de actuación en un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de los valores que alcanzaran los criterios.

- ORDEN CRITERIOS AFECCIÓN A LA INFRAESTRUCTURA
- 1 «SUBCRITERIO INFR1»
 - 2 «SUBCRITERIO INFR2»
 - 3 «SUBCRITERIO INFR3»

NIVELES DE IMPORTANCIA

- 1 Igualmente importante
- 2 Moderadamente más importante
- 3 Más importante
- 4 Mucho más importante
- 5 Extremadamente más importante

Si quiere recordar el significado de cada criterio, pulse en "VOLVER"

[VOLVER](#)

1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO INFR1» sobre el criterio «SUBCRITERIO INFR2»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO INFR1» sobre el criterio «SUBCRITERIO INFR3»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO INFR2» sobre el criterio «SUBCRITERIO INFR3»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

[CONTINUAR](#)

18. Ordene según la importancia del 1 al 3 (siendo el 1 el más importante y 3 el menos importante) que usted cree debe tener cada uno de los siguientes criterios en el problema de toma de decisiones de la alternativa más idónea para actuación sobre un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico.

A continuación se relacionan los criterios del grupo «Coste económico» utilizados en el estudio junto a una breve descripción de los mismos.
 Por favor, no dude en contactar con el receptor de la encuesta en caso de cualquier consulta o necesidad de aclaración en relación con los mismos.

[VOLVER](#)

| SÍMBOLO | CRITERIOS | SIGNIFICADO |
|---------|---|---|
| a | Costes de primera inversión | Importe de las obras necesarias para implantar la medida anti-ruido elegida, incluidas las expropiaciones |
| b | Costes de conservación y rehabilitación | Importe de las tareas de conservación periódica y rehabilitación necesarias para el correcto funcionamiento de la medida anti-ruido ele |
| c | Costes de funcionamiento | Importe de las tareas periódicas de gestión, electricidad, jardinería, etc. precisas para el correcto funcionamiento de la medida anti-ruic |

Para ordenar los criterios, escriba en las celdas sombreadas el carácter asignado a cada uno de ellos (de la "a" a la "c") según la importancia que quiera asignarles, sin repetir ninguno de ellos:

| ORDEN | CRITERIOS | SÍMBOLO |
|-------|-----------|-----------------------------|
| 1 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 2 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 3 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |

19. Aparte de los criterios anteriormente considerados, ¿considera que es necesario contemplar algún otro dentro del grupo «Costes económicos» a tener en cuenta en la elección de la alternativa idónea para actuar en un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico?

sí NO

Por favor, antes de continuar marque una respuesta en la pregunta nº 19.

20-22. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a las 3 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con la elección de la alternativa idónea de actuación en un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de los valores que alcanzaran los criterios.

| ORDEN | CRITERIOS COSTE ECONÓMICO |
|-------|---------------------------|
| 1 | «SUBCRITERIO COST1» |
| 2 | «SUBCRITERIO COST2» |
| 3 | «SUBCRITERIO COST3» |

| NIVELES DE IMPORTANCIA | |
|------------------------|-------------------------------|
| 1 | Igualmente importante |
| 2 | Moderadamente más importante |
| 3 | Más importante |
| 4 | Mucho más importante |
| 5 | Extremadamente más importante |

Si quiere recordar el significado de cada criterio, pulse en "VOLVER"

[VOLVER](#)

1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO COST1» sobre el criterio «SUBCRITERIO COST2»?

- ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO COST1» sobre el criterio «SUBCRITERIO COST3»?

- ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO COST2» sobre el criterio «SUBCRITERIO COST3»?

- ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

[CONTINUAR](#)

23. Ordene según la importancia del 1 al 4 (siendo el 1 el más importante y 4 el menos importante) que usted cree debe tener cada uno de los siguientes criterios en el problema de toma de decisiones de la alternativa más idónea para actuación sobre un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico.

A continuación se relacionan los criterios del grupo «Efectos sociales» utilizados en el estudio junto a una breve descripción de los mismos.

[VOLVER](#)

Por favor, no dude en contactar con el receptor de la encuesta en caso de cualquier consulta o necesidad de aclaración en relación con los mismos.

| SÍMBOLO | CRITERIOS | SIGNIFICADO |
|---------|--------------------------------------|---|
| a | Seguridad vial | Variación en la accidentalidad en la circulación de los vehículos por la carretera donde se implanta la medida anti-ruido elegida |
| b | Gastos en vehículos | Variación en los costes generados en los vehículos que circulan por la carretera debido a la implantación de la medida anti-ruido elegida |
| c | Mejora social de los afectados | Cambio en la calidad de vida de los ciudadanos afectados por el ruido de la carretera donde se implanta la alternativa elegida |
| d | Valor de las propiedades colindantes | Variación en el valor inmobiliario de las propiedades colindantes a la carretera debido a la implantación de la medida anti-ruido elegida |

Para ordenar los criterios, escriba en las celdas sombreadas el carácter asignado a cada uno de ellos (de la "a" a la "d") según la importancia que quiera asignarles, sin repetir ninguno de ellos:

| ORDEN | CRITERIOS | SÍMBOLO |
|-------|-----------|-----------------------------|
| 1 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 2 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 3 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 4 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |

24. Aparte de los criterios anteriormente considerados, ¿considera que es necesario contemplar algún otro dentro del grupo «Mejoras sociales» a tener en cuenta en la elección de la alternativa idónea para actuar en un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico?

SÍ NO

Por favor, antes de continuar marque una respuesta en la pregunta nº 24.

25-30. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a las 6 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con la elección de la alternativa idónea de actuación en un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de los valores que alcanzaran los criterios.

- ORDEN CRITERIOS EFECTOS SOCIALES
- 1 «SUBCRITERIO SOC1»
 - 2 «SUBCRITERIO SOC2»
 - 3 «SUBCRITERIO SOC3»
 - 4 «SUBCRITERIO SOC4»

- NIVELES DE IMPORTANCIA
- 1 Igualmente importante
 - 2 Moderadamente más importante
 - 3 Más importante
 - 4 Mucho más importante
 - 5 Extremadamente más importante

Si quiere recordar el significado de cada criterio, pulse en "VOLVER"

[VOLVER](#)

1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO SOC1» sobre el criterio «SUBCRITERIO SOC2»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO SOC1» sobre el criterio «SUBCRITERIO SOC3»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO SOC1» sobre el criterio «SUBCRITERIO SOC4»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO SOC2» sobre el criterio «SUBCRITERIO SOC3»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO SOC2» sobre el criterio «SUBCRITERIO SOC4»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO SOC3» sobre el criterio «SUBCRITERIO SOC4»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

[CONTINUAR](#)

31. Ordene según la importancia del 1 al 3 (siendo el 1 el más importante y 3 el menos importante) que usted cree debe tener cada uno de los siguientes criterios en el problema de toma de decisiones de la alternativa más idónea para actuación sobre un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico.

A continuación se relacionan los criterios del grupo «Efectos ambientales» utilizados en el estudio junto a una breve descripción de los mismos.
 Por favor, no dude en contactar con el receptor de la encuesta en caso de cualquier consulta o necesidad de aclaración en relación con los mismos.

[VOLVER](#)

| SÍMBOLO | CRITERIOS | SIGNIFICADO |
|---------|-------------------------------|---|
| a | Calidad del aire | Cambios en los indicadores de calidad del aire en el entorno de la carretera debido a la implantación de la medida anti-ruido elegida |
| b | Calidad de visión/iluminación | Cambios en las condiciones de visión e iluminación de la carretera y su entorno debido a la implantación de la medida anti-ruido elegida |
| c | Calidad paisajística | Cambios en las características del paisaje existente en el entorno de la carretera debido a la implantación de la medida anti-ruido elegida |

Para ordenar los criterios, escriba en las celdas sombreadas el carácter asignado a cada uno de ellos (de la "a" a la "c") según la importancia que quiera asignarles, sin repetir ninguno de ellos:

| ORDEN | CRITERIOS | SÍMBOLO |
|-------|-----------|-----------------------------|
| 1 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 2 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 3 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |

32. Aparte de los criterios anteriormente considerados, ¿considera que es necesario contemplar algún otro dentro del grupo «Mejoras ambientales» a tener en cuenta en la elección de la alternativa idónea para actuar en un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico?

SÍ NO

Por favor, antes de continuar marque una respuesta en la pregunta nº 32.

33-35. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a las 3 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con la elección de la alternativa idónea de actuación en un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de los valores que alcanzaran los criterios.

| ORDEN | CRITERIOS EFECTOS AMBIENTALES |
|-------|-------------------------------|
| 1 | «SUBCRITERIO AMB1» |
| 2 | «SUBCRITERIO AMB2» |
| 3 | «SUBCRITERIO AMB3» |

| NIVELES DE IMPORTANCIA | |
|------------------------|-------------------------------|
| 1 | Igualmente importante |
| 2 | Moderadamente más importante |
| 3 | Más importante |
| 4 | Mucho más importante |
| 5 | Extremadamente más importante |

Si quiere recordar el significado de cada criterio, pulse en "VOLVER"

[VOLVER](#)

1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO AMB1» sobre el criterio «SUBCRITERIO AMB2»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO AMB1» sobre el criterio «SUBCRITERIO AMB3»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO AMB2» sobre el criterio «SUBCRITERIO AMB3»?

- Igualmente importante ▲
- Moderadamente más importante
- Más importante
- Mucho más importante
- Extremadamente más importante ▼

[CONTINUAR](#)

36. Ordene según la importancia del 1 al 4 (siendo el 1 el más importante y 4 el menos importante) que usted cree debe tener cada uno de los siguientes criterios en el problema de toma de decisiones de la alternativa más idónea para actuación sobre un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico.

A continuación se relacionan los criterios del grupo «Corrección funcional del problema» utilizados en el estudio junto a una breve descripción de los mismos. Por favor, no dude en contactar con el receptor de la encuesta más idónea para actuación sobre un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico.

[VOLVER](#)

| SÍMBOLO | CRITERIOS | SIGNIFICADO |
|---------|---------------------------------|---|
| a | Superficie corregida | Área adyacente a la carretera que pasa a cumplir el objetivo de calidad acústica tras implantar la medida anti-ruido elegida |
| b | Nº viviendas corregidas | Número de viviendas adyacentes a la carretera que pasan a cumplir el objetivo de calidad acústica tras implantar la medida anti-ruido elegida |
| c | Nº personas corregidas | Número de habitantes junto a la carretera que pasan a estar en zona dentro del objetivo de calidad acústica tras implantar la medida anti-ruido elegida |
| d | Nº centros sensibles corregidos | Número de centros culturales, sanitarios y docentes adyacentes a la carretera que pasan a cumplir el objetivo de calidad acústica tras implantar la medida anti-ruido elegida |

Para ordenar los criterios, escriba en las celdas sombreadas el carácter asignado a cada uno de ellos (de la "a" a la "d") según la importancia que quiera asignarles, sin repetir ninguno de ellos

| ORDEN | CRITERIOS | SÍMBOLO |
|-------|-----------|-----------------------------|
| 1 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 2 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 3 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |
| 4 | | COMPLETE LA CELDA SOMBREADA |

37. Aparte de los criterios anteriormente considerados, ¿considera que es necesario contemplar algún otro dentro del grupo «Corrección funcional del problema» para tener en cuenta en la elección de la alternativa idónea para actuar en un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico?

sí no

Por favor, antes de continuar marque una respuesta en la pregunta nº 37.

38-43. Teniendo en cuenta el orden establecido y los niveles de importancia relativa que se le presentan, responda a las 6 preguntas que se muestran a continuación mediante las listas desplegadas, en relación con la elección de la alternativa idónea de actuación en un tramo de carretera con problemas de ruido debido al tráfico. Recuerde, todo ello con independencia de los valores que alcanzaran los criterios.

| | |
|--|--|
| <p>ORDEN CRITERIOS CORRECCIÓN FUNCIONAL DEL PROBLEMA/</p> <p>1 «SUBCRITERIO CORR1»</p> <p>2 «SUBCRITERIO CORR2»</p> <p>3 «SUBCRITERIO CORR3»</p> <p>4 «SUBCRITERIO CORR4»</p> <p>NIVELES DE IMPORTANCIA</p> <p>1 Igualmente importante</p> <p>2 Moderadamente más importante</p> <p>3 Más importante</p> <p>4 Mucho más importante</p> <p>5 Extremadamente más importante</p> <p>Si quiere recordar el significado de cada criterio, pulse en "VOLVER"</p> | <p>1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO CORR1» sobre el criterio «SUBCRITERIO CORR2»?</p> <p>Igualmente importante ▲</p> <p>Moderadamente más importante</p> <p>Más importante</p> <p>Mucho más importante</p> <p>Extremadamente más importante ▼</p> <p>1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO CORR1» sobre el criterio «SUBCRITERIO CORR3»?</p> <p>Igualmente importante ▲</p> <p>Moderadamente más importante</p> <p>Más importante</p> <p>Mucho más importante</p> <p>Extremadamente más importante ▼</p> <p>1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO CORR1» sobre el criterio «SUBCRITERIO CORR4»?</p> <p>Igualmente importante ▲</p> <p>Moderadamente más importante</p> <p>Más importante</p> <p>Mucho más importante</p> <p>Extremadamente más importante ▼</p> <p>1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO CORR2» sobre el criterio «SUBCRITERIO CORR3»?</p> <p>Igualmente importante ▲</p> <p>Moderadamente más importante</p> <p>Más importante</p> <p>Mucho más importante</p> <p>Extremadamente más importante ▼</p> <p>1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO CORR2» sobre el criterio «SUBCRITERIO CORR4»?</p> <p>Igualmente importante ▲</p> <p>Moderadamente más importante</p> <p>Más importante</p> <p>Mucho más importante</p> <p>Extremadamente más importante ▼</p> <p>1 ¿Qué importancia tiene el criterio «SUBCRITERIO CORR3» sobre el criterio «SUBCRITERIO CORR4»?</p> <p>Igualmente importante ▲</p> <p>Moderadamente más importante</p> <p>Más importante</p> <p>Mucho más importante</p> <p>Extremadamente más importante ▼</p> |
|--|--|

[VOLVER](#)

[CONTINUAR](#)

Si ha rellenado todas las celdas sombreadas y las listas desplegadas del formulario, está satisfecho con sus respuestas y no existe ningún mensaje de error, guarde el archivo y reenvíelo a la dirección de correo electrónico indicada en el e-mail en que le fue remitido el formulario.

Si desea repasar o modificar alguna de las respuestas, pulse en "VOLVER"

[VOLVER](#)

MUCHAS GRACIAS POR SU COLABORACIÓN.