Fundación de los Ferrocarriles Españoles

colección TESIS DOCTORALES
INGENIERÍA / ARQUITECTURA

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA COMBINACIÓN DE VELOCIDADES MÁXIMAS QUE PERMITEN ALCANZAR EL TIEMPO DE VIAJE COMERCIALMENTE REQUERIDO EN UNA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

Ignacio González Franco

Dirigida por Andrés López Pita

Programa de Doctorado en Ingeniería e Infraestructuras del Transporte

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Barcelona, 2015

INGENIERÍA / ARQUITECTURA

COLECCIÓN

TESIS DOCTORALES

INGENIERÍA / ARQUITECTURA

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA COMBINACIÓN DE VELOCIDADES MÁXIMAS QUE PERMITEN ALCANZAR EL TIEMPO DE VIAJE COMERCIALMENTE REQUERIDO EN UNA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

Ignacio González Franco

Dirigida por Andrés López Pita

Programa de Doctorado en Ingeniería e Infraestructuras del Transporte

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Barcelona, 2015

COLECCIÓN TESIS DOCTORALES

INGENIERÍA / ARQUITECTURA

La Fundación de los Ferrocarriles Españoles pone a disposición del público la **Colección de Tesis Doctorales** sobre el ferrocarril, con el objetivo fundamental de contribuir a la difusión de la investigación universitaria sobre esta materia y facilitar el acceso libre y gratuito a las investigaciones de los autores, aportando así una información muy valiosa y especializada y contribuyendo, al mismo tiempo, a la preservación de estos trabajos. Con ello, además, se da visibilidad a esta producción intelectual. La Fundación aspira a que su repositorio sea lo más amplio posible y que estén representados en él todos los ámbitos de investigación del ferrocarril.

La **Colección de Tesis Doctorales** se clasifica en tres ramas, en función de su temática:

- Ingeniería y Arquitectura
- Humanidades
- Economía y Regulación

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA COMBINACIÓN DE VELOCIDADES MÁXIMAS QUE PERMITEN ALCANZAR EL TIEMPO DE VIAJE COMERCIALMENTE REQUERIDO EN UNA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

El objeto de esta tesis es plantear una metodología capaz de determinar la combinación de velocidades máximas de una línea ferroviaria de alta velocidad que permite obtener los máximos retornos con los mínimos costes. En esta tesis doctoral se desarrolla y define una metodología capaz de determinar la combinación de velocidades máximas que obtiene los mejores resultados en términos socio-económicos (mayor VAN socio-económico) sujetos a las restricciones que se determinen (limitación de la rentabilidad financiera y del coste de inversión).

Ignacio González Franco es doctor en Ingeniería e Infraestructura en el Transporte por la Universidad Politécnica de Cataluña, ingeniero industrial por la Universidad de Vigo y máster en Sistemas Ferroviarios por la Universidad Pontificia de Comillas.

Desde 2009 trabaja como investigador en el área de I+D+i de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, coordinando desde 2012 el Grupo de Estudios e Investigación de Energía y Emisiones en el Transporte y el Grupo de Economía y Explotación del Transporte.

ISBN: 978-84-946555-5-5

Depósito legal: M-16511-2017

Fundación de los Ferrocarriles Españoles – 2017

Coordinación editorial y maquetación: Lourdes Orozco Torres

Diseño de cubiertas: Belén Romeo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

0.OBJETIVO, METODOLOGÍA Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 13
0.1 Introducción y justificación de la tesis 13
0.1.1 Problemática existente respecto a la determinación de la velocidad 17
0.1.2 Justificación del estudio.....18
0.2 Objetivo de la tesis 21
0.3 Metodología.....21
0.3.1 Método de la investigación 21
0.3.2 Posibilidades de aplicación de la metodología.....24
0.3.3 Estructura de la tesis 30
1.CONCEPTOS TEÓRICOS BÁSICOS DE LA TESIS.....33
1.1 Introducción 33
1.2 Análisis Coste-Beneficio (ACB) de un proyecto ferroviario 33
1.2.1 Metodología de cálculo de un ACB 34
1.2.2 Relación entre el VAN y la velocidad 40
1.3 Relación entre la velocidad y el tiempo de viaje 41
1.3.1 Evolución histórica de las velocidades en el ferrocarril 42
1.3.2 La velocidad. Tipos.....46
1.3.3 Relación entre el tiempo y la velocidad máxima de la infraestructura por tramos 54
2.EFECTO DE LA VELOCIDAD EN LOS INGRESOS 69
2.1 Introducción.....69
2.2 Modelos de demanda: Influencia de la velocidad comercial en la cuota de mercado.....69
2.2.1 Modelos de demanda 70
2.2.2 Modelo de demanda aplicado al corredor de Levante 71
2.3 Relación entre la cuota de mercado y la velocidad media del tren de alta velocidad 93
2.4 Evolución en el tiempo de la demanda para la misma oferta.....102
2.4.1 Efecto “Ramp-up” 102
2.4.2 Evolución de la demanda en relación a variables socio-económicas .102
2.5 Ingresos y su relación con la velocidad.....105
2.5.1 Ingresos del operador ferroviario.....105
2.5.2 Ingresos del gestor de la infraestructura 114
2.6 Plan de explotación 120
2.6.1 Material rodante.....121
2.6.2 Dimensionamiento del parque móvil 129
2.6.3 Caso ejemplo línea Madrid-Valencia.....134

3.EFECTO DE LA VELOCIDAD EN LOS COSTES 139
3.1 Introducción 139
3.2 Costes de operación y de explotación y su relación con la velocidad 140
3.2.1 Costes de posesión del material rodante y su relación con la velocidad 141
3.2.2 Costes de explotación 146
3.2.3 Costes de operación 154
3.2.4 Costes operativos: caso ejemplo línea Madrid-Valencia 156
3.3 Costes de inversión de la infraestructura y su relación con la velocidad de diseño 161
3.3.1 Introducción 161
3.3.2 Inversión en la infraestructura: costes totales de la infraestructura 165
3.3.3 Coste de expropiación 233
3.3.4 Coste de estaciones 239
3.3.5 Costes totales de inversión en función de la velocidad máxima 239
3.3.6 Costes totales de mantenimiento en función de la velocidad 243
3.4 Valor Residual de la Infraestructura 246
4.EFECTO DE LA VELOCIDAD EN LAS EXTERNALIDADES 251
4.1 Introducción 251
4.2 Precios sombra 251
4.3 Valuación económica en términos monetarios 252
4.3.1 Excedente neto del consumidor de nuevos viajeros (tráfico inducido) 253
4.3.2 Ahorros netos de tiempo de viaje 255
4.3.3 Ahorros netos de costes de operación de otros modos 257
4.3.4 Ahorros netos de costes de accidentes 258
4.3.5 Ahorro neto en costes medioambientales 260
4.3.6 Conclusiones 281
5.APLICACIÓN AL CASO EJEMPLO 285
5.1 Introducción 285
5.2 Definición del escenario 285
5.3 Metodología 287
5.4 Variables del modelo 288
5.4.1 Características del trazado 288
5.4.2 Características del material rodante 290
5.4.3 Datos de entrada e hipótesis del modelo ACB 290
5.5 Relación entre la velocidad y las variables de decisión 293
5.5.1 Velocidad comercial y costes de inversión 293

5.5.2 Velocidad media, ingresos, ahorros en costes externos y ahorros en tiempos de viaje....294

5.5.3 Velocidad media y costes de operación....296

5.5.4 Velocidad media, VAN Socio-económico y financiero....297

5.6 Criterios de decisión; decisión multicriterio....305

5.6.1 Aplicación del criterio de decisión de la máxima rentabilidad socio-económica....305

5.6.2 Aplicación del criterio de decisión de máxima rentabilidad socio-económica sujeta a una limitación en la inversión y restricción en la rentabilidad financiera (VAN financiero)....307

5.6.3 Conclusiones del caso ejemplo....311

6.CONCLUSIONES....313

6.1 Introducción....313

6.2 Efecto de la velocidad y la tarifa en los ingresos y beneficios....313

6.3 Efecto de la velocidad en los costes de explotación y en los costes de inversión....314

6.4 Relación entre la velocidad y la rentabilidad socio-económica y la rentabilidad financiera....318

7.FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN....321

8.BIBLIOGRAFÍA....323

RESUMEN

En los últimos 20 años, el sistema ferroviario de alta velocidad en Europa ha sufrido un gran desarrollo, debido entre otras cosas, a la reducción de tiempos de viaje, al incremento en las frecuencias y a la mejora en la calidad del servicio. Sin embargo, la construcción de una nueva infraestructura ferroviaria requiere una ingente movilización de recursos, tiene una vida útil muy larga y son pocos los posibles usos alternativos de la inversión realizada. No debe extrañar por ello que cualquier inversión de este tipo esté siempre precedida de un análisis minucioso con el fin de asegurar el mejor resultado posible.

Dentro de un análisis de estas características, existen diferentes parámetros que influyen en los costes y los beneficios atribuibles a una línea de alta velocidad y, por lo tanto, puede decirse que existen determinados parámetros que influyen en su rentabilidad. Entre todos ellos, se destaca la velocidad máxima de diseño; la velocidad (en todas sus posibles acepciones) juega un papel muy importante en un escenario de eficiencia, es una pieza básica en la rentabilidad socio-económica de una infraestructura ferroviaria.

La velocidad de diseño influyen en la rentabilidad y en concreto en el VAN socio-económico y financiero de una línea de múltiples formas: por ejemplo, una velocidad de diseño mayor supone costes mayores de inversión (con incidencia diferente según el tipo de terreno) y, en ocasiones, mayores costes de mantenimiento, pero también reduce el tiempo de viaje y, como consecuencia, generalmente implica un incremento en el número de viajeros dispuestos a viajar (mayor atractivo para los viajeros), lo que supone mayores ingresos y ahorros de tiempo. Además, tienen un efecto directo sobre los costes de explotación del operador de transporte.

En suma, los efectos de la velocidad sobre la rentabilidad son muy numerosos y complejos. Sin embargo, este parámetro, generalmente se predetermina, es decir, suele estar definido con anterioridad a la evaluación socio-económica de la línea. La velocidad máxima de diseño es prácticamente la misma a lo largo de toda la red de alta velocidad europea (350 km/h), lo que no ofrece, sin embargo, la información de si otras decisiones previas (otras velocidades máximas de diseño) conducirían a un mejor resultado.

Este problema toma mayor grado de complejidad cuando se considera la línea (trazado) como un conjunto de tramos más pequeños. Si a cada uno de estos tramos se le asigna una velocidad máxima de diseño, aparecerán múltiples combinaciones de velocidades máximas por línea, por lo tanto, ya no se dispone de una única velocidad, sino que se dispone de una combinación de velocidades. Cada combinación de velocidades máximas supondrá un coste de inversión diferente, por lo que existirán múltiples costes por cada trazado y, como consecuencia, diferentes rentabilidades.

Ante esta situación compleja, se plantea una metodología capaz de determinar la combinación de velocidades máximas que permite obtener los máximos retornos con los mínimos costes. En definitiva, se desarrollará y definirá una metodología capaz de determinar la combinación de velocidades máximas que obtenga mejores resultados en términos socio-económicos (mayor VAN socio-económico) sujetos a las restricciones que se determinen (limitación de la rentabilidad financiera y del coste de inversión).

La metodología propuesta se aplica en un escenario teórico que corresponde a la línea Madrid-Valencia con una única ruta. El objetivo consiste en estimar la rentabilidad económica y financiera del conjunto para la ruta Madrid-Valencia, considerando un trazado nuevo y diferente al que hoy en día existe. Este análisis económico y financiero se realiza para cuatro precios de billete diferentes, lo que permite no solo determinar el cuadro de velocidades máximas que obtiene la máxima rentabilidad de la línea, sino que también permite conocer el efecto del precio del billete pagado por los viajeros en la rentabilidad del proyecto.

ABSTRACT

Over the past 20 years, high speed railway in Europe has experienced a great development due to, among other things, the reduction of travel times, the increase of frequency and the continuous improvement of service quality. However, the construction of a new high speed railway infrastructure requires an enormous mobilization of resources, has a long lifetime but the alternative uses of this huge investment are very few. Consequently, this kind of investment is always preceded by a rigorous analysis in order to ensure the best possible results.

In an analysis of these characteristics, there are different variables that have an influence on costs and benefits that a high speed line could generate and, therefore, it can be asserted that there are certain railway parameters with direct impact on the profitability of a high speed line. Among them, maximum design speed of a high speed line can be highlighted; speed plays a crucial role in a framework in which the efficiency and the social benefit are essential. The design speed has an impact on the profitability and, especially, on the economic and financial Net Present Value (NPV) of a high speed line; for example, a higher design speed implies higher investment costs (this impact is different depending on the type of terrain) and, sometimes, implies greater maintenance costs, but also brings journey time reductions and, consequently, an increase in the number of passengers that implies an increase in revenues and time savings. Besides, design speed has a direct impact on the exploitation costs of transport operator.

In short, the effects of the speed on the profitability are countless and complex. However, this parameter is usually a default parameter; usually it has been previously established (pre-determined) to an economic appraisal. Actually, if we analyse real experiences, real high speed lines currently in service or under construction, maximum design speed is essentially the same all over the European high speed networks (350 km/h), although it hasn´t been found out a solid reason behind this pre-determined speed.

This problem becomes more complex when the line is considered as a set of shorter sections. If each one of these sections is assigned a maximum design speed, it will arise many maximum speeds combinations per line, therefore, there is no longer a single speed, but there is now a combination of maximum speeds. Each combination of maximum speeds entails different investment cost, thereby, there will be multiple investment costs per line and, therefore, different economic and financial profitability in a single project as it is a railway infrastructure.

At this point, this study develops a methodology capable of obtaining the maximum design speeds combination that allows to obtain the maximum incomes with the minimal cost, which implies to achieve the maximum profitability of a high speed line. In short, it will be developed and defined a methodology which determines the combination of maximum speeds that obtains the best results in terms of social-economic benefit (greater social-economic NPV) taking into account certain limitations (financial profitability and investment cost restrictions).

The methodology proposed is applied in a theoretical scenario which corresponds to the Madrid-Valencia high speed line with a single route. The objective is to determine the economic and financial profitability of the scenario proposed, considering a new railway

layout and different to the one nowadays exists. This economic and financial analysis is assessed for four different ticket prices, allowing not only to determine the combination of maximum speeds that obtains the maximum profitability of the line, but also allows to know the effect of the ticket price paid by the travellers on the economic and financial profitability.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a mi familia, especialmente a mis hermanos Pablo, Ana y Laasiri, a mi cuñado Antonio, a Stephanie, a mi tío Luis y a mi abuela Lola, su apoyo incondicional, su aliento y su paciencia han sido claves para terminar esta tesis doctoral; ellos siempre están ahí cuando los necesito.

Quiero agradecerle a Alberto García su paciencia, su infinita capacidad de trabajo y su apoyo. Gracias Alberto por compartir conmigo, durante todos estos años, tus conocimientos y tu tiempo; gracias por tu dedicación y por tu calidad humana y pedagógica.

También me gustaría agradecer a Andrés López Pita su dedicación en la dirección de esta tesis. Especialmente, me gustaría agradecerle su generosidad; su amplio conocimiento sobre el ferrocarril, compartido a través de sus libros, artículos, conferencias y charlas, ha sido decisivo y esencial para llevar a cabo esta tesis doctoral.

No me gustaría olvidarme de mis compañeros de la Fundación de los Ferrocarriles, en concreto a Luis E. Mesa, Leticia García y Ángeles Tauler; ellos son los que me ayudan y me sufren cada día.

Además, no puedo olvidarme de todas aquellas personas con las que he tenido el placer de reflexionar, debatir y sobre todo el inmenso privilegio de aprender sobre el ferrocarril. En concreto mi agradecimiento a Eduardo Pilo de la Fuente, Pilar Martín Cañizares, Javier Fernández Arévalo, Ramón Morales Arquero, Iñaqui Barrón de Angoiti, Cesar López Sánchez, Michel Leboeuf, José Conrado Martínez Acevedo, Eugenio Roanes Lozano, Sergio López Lara y a todos los que no menciono, pero no olvido.

Finalmente, y más importante quiero expresar mi gratitud a mis padres, ellos siempre hacen que las cosas sean más fáciles.

Gracias

0. OBJETIVO, METODOLOGÍA Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

0.1 INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS

La construcción de una nueva infraestructura para el transporte, como es el caso de una línea ferroviaria, requiere una ingente movilización de recursos, tiene una vida útil muy larga y son pocos los posibles usos alternativos de la inversión realizada. Por ello, puede considerarse como un "coste hundido".

No debe extrañar por ello que cualquier inversión de este tipo esté siempre precedida de un análisis minucioso y en ocasiones también de un debate público para asegurar el mejor resultado posible.

La decisión de construir o no la infraestructura– o de elegir entre diversos proyectos alternativos- normalmente se toma con un análisis multicriterio considerando con un peso diferente cada uno de los resultados del análisis previo.

La metodología de estudio que se suele seguir es el llamado "Análisis Coste Beneficio" (ACB) que sigue una metodología específica y estandarizada. En esencia, esta metodología (ACB) se basan en comparar las diferencias, desde un punto de vista financiero y económico social, que existen entre la situación en la que no se construye el proyecto "sin proyecto" y aquella en la que sí se construye "con proyecto". Los resultados que se obtienen de este análisis suelen ser el VAN y el TIR financiero y económico social; el tráfico que utilizará la nueva infraestructura; los ahorros de costes externos o de tiempo; los accidentes evitados, etc.

Para obtener estos resultados se emplean diversos modelos (de costes, de demanda, de ingresos etc.) que procesan diferentes datos de entrada suministrados por el planificador. Estos datos de entrada suelen ser: características físicas de la línea (velocidad máxima, rampas etc.), datos socio-económicos (población, renta, evolución del PIB), datos de los trenes (como su capacidad o velocidad máxima), del servicio (frecuencia, paradas), costes unitarios etc.

Normalmente, el criterio de decisión suele tener un VAN socio-económico positivo (con una tasa de descuento predeterminada), y sujeto a unas ciertas restricciones de tipo presupuestario, como puede ser que el VAN financiero, si es negativo, no baje de un cierto valor.

Puede darse el caso -y de hecho comúnmente se da- que se acepte un determinado proyecto con una rentabilidad económica social positiva, pero con una rentabilidad financiera negativa. En este caso, la administración, que es finalmente en la mayoría de casos, la que soporta el elevado coste de inversión, decide llevar a cabo el proyecto basando su elección en el bien social (rentabilidad social) que supone el mismo y no en su resultado financiero.

En muchas ocasiones, principalmente en entornos con restricciones presupuestarias, es habitual limitar la inversión o limitar a un valor determinado el resultado financiero negativo, ya que un endeudamiento excesivo del administrador o de la entidad que lleve a cabo la construcción del proyecto puede ser insostenible y acabar repercutiendo vía precios en los usuarios finales, lo que finalmente supone una reducción del beneficio social.

Este criterio es el que, por defecto, aplicaremos en la tesis, sin perjuicio de que el modelo que en ella se diseña y desarrolla permite utilizar también otros criterios de decisión a partir de los resultados.

El proceso analítico descrito que permite al planificador sustentar la decisión de construir una infraestructura ferroviaria o no, apoyada en los resultados obtenidos tras un Análisis Coste-Beneficio (ACB), sigue la secuencia que se incluye en la figura que se muestra a continuación (Figura 1).

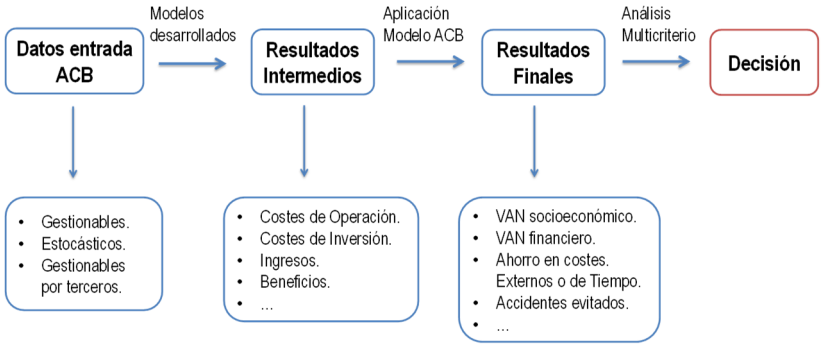


Figura 1. Fases del proceso analítico necesario para la evaluación de la viabilidad de una nueva infraestructura ferroviaria.

Fuente: Elaboración propia.

Puede afirmarse que al final la decisión que toma el planificador, de una manera indirecta, está condicionada por el valor que recogen una serie de variables que alimentan al modelo (datos de entrada) y que dependiendo del valor que tomen mejoran o empeoran la rentabilidad de un proyecto.

Estos datos de entrada o variables, capaces de incrementar o reducir la rentabilidad de un proyecto, pueden clasificarse y agruparse en diferentes grupos, pues, aunque son diferentes comparten determinados rasgos.

En definitiva, las variables pueden ser:

- Gestionables, se trata de aquellas variables que son básicas en el modelo y que son gestionables por el planificador, (ej. velocidad máxima, tiempo de viaje, tarifa, frecuencia, capacidad del tren…).
- Aleatorias o estocásticas, se trata de aquellas variables que influyen en la rentabilidad del proyecto pero que no son gestionables por el planificador de la infraestructura, básicamente variables socio-económicas (ej. PIB, población, tasa motorización…).
- Gestionables por terceros, corresponde a aquellos que también influyen en la rentabilidad del proyecto pero que están sujetos a una cierta incertidumbre y suelen ser ajenos al propio sistema ferroviario (ej. oferta de modos transporte que compiten con el ferrocarril).

En los últimos años, aquellos datos que tienen un cierto carácter aleatorio, son objeto de un tratamiento probabilístico, lo que conduce a que se conozca no solo el valor más probable de los resultados, sino su distribución de probabilidad. Sin embargo, generalmente las variables gestionables se predeterminan, dejando en manos de otros la decisión sobre ellas. Así ocurre, por ejemplo, con la capacidad del tren, las tarifas o incluso con la velocidad máxima de diseño de la línea, variables que suelen estar definidas con anterioridad a la realización del análisis coste beneficio. De esta manera se produce una pérdida de eficiencia, ya que no se asegura que el valor utilizado conduzca a resultados óptimos.

A modo de resumen a continuación se muestra una tabla (Tabla 1) que recoge el estado actual de diferentes variables (gestionables, aleatorias y gestionables por terceros) que alimentan el modelo ACB, identificando también el estado deseable de las mismas en un escenario de eficiencia.

Tabla 1. Caracterización de los datos de entrada en los modelos de coste beneficio en función de su carácter.

Situación Actual			
Parámetro modelo	Carácter real	Carácter en el modelo	Sujeto a análisis de sensibilidad o tratamiento probabilístico
Velocidad para la que se diseña la infraestructura	Gestionable	Predeterminado	Normalmente no
Variables socioeconómicas (Evolución PIB, Población,...)	Aleatorio	Predeterminado	Casi siempre
Características trenes (Capacidad, Velocidad,...)	Gestionable	Predeterminado	Normalmente no
Característica de la oferta ferroviaria (tarifa, frecuencias,...)	Gestionable	Predeterminado	En ocasiones
Costes unitarios (costes de operación, costes externos,...)	Aleatorio (sobre todo costes de energía)	Predeterminado	En ocasiones
Caracteristica oferta otros modos (tarifa, frecuencia,...)	Objeto de decisión por terceros	Predeterminado	Normalmente no
Criterios del modelo (plazo, tasa de descuento, v. residual,...)	Gestionable	Predeterminado	En ocasiones
Situación Deseable			
Parámetro modelo	Carácter real	Carácter en el modelo	Sujeto a tratamiento probabilístico
Velocidad para la que se diseña la infraestructura	Gestionable	Objeto de Optimización	
Variables socioeconómicas (Evolución PIB, Población,...)	Aleatorio	Predeterminado	Necesario
Características trenes (Capacidad, Velocidad,...)	Gestionable	Objeto de Optimización	
Característica de la oferta ferroviaria (tarifa, frecuencias,...)	Gestionable	Objeto de Optimización	
Costes unitarios (costes de operación, costes externos,...)	Aleatorio (sobre todo costes de energía)	Predeterminado	Solo energía
Caracteristica oferta otros modos (tarifa, frecuencia,...)	Objeto de decisión por terceros	Predeterminado	Posible aplicación teoría de juegos
Criterios del modelo (plazo, tasa de descuento, v. residual,...)	Gestionable	Predeterminado	Posible aplicación teoría de juegos

Fuente: Elaboración propia.

Como se expone en la tabla anterior, normalmente las llamadas variables gestionables suelen ser predeterminadas en este tipo de análisis *ex ante*, lo que no es la situación más deseable, ya que tienen un papel fundamental en el proceso de optimización, pues tienen un efecto directo sobre el valor del proyecto (véase Figura 2).

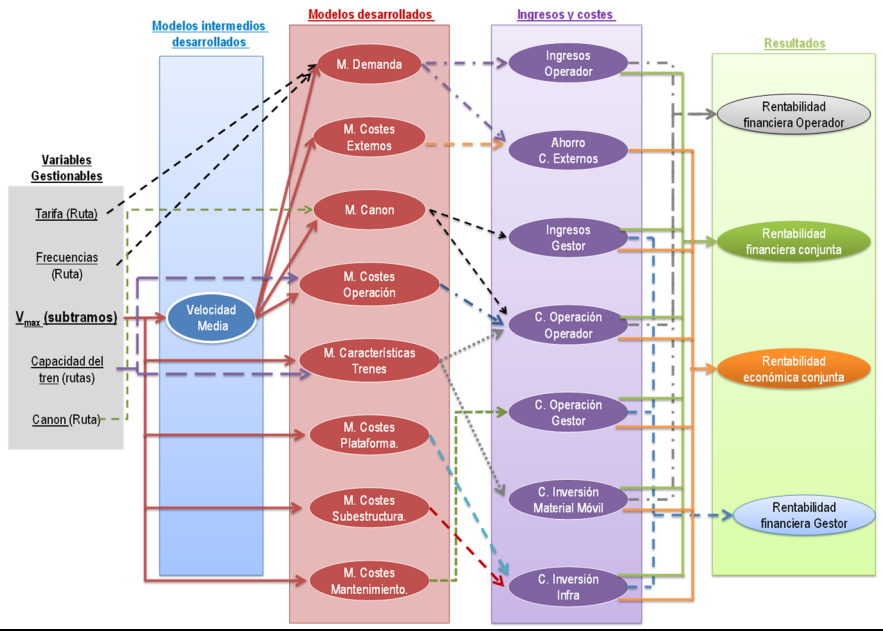


Figura 2. Influencia de las variables gestionables en un ACB.

Fuente: Elaboración propia.

En esencia, podría afirmarse que, una vez tomadas unas ciertas decisiones previas (velocidad de la línea, tarifas, características de los trenes), el modelo indica si la inversión cumple con las condiciones que se han fijado para decidir construir la infraestructura (por ejemplo, el modelo indica si el VAN socio-económico es positivo).

No ofrece, sin embargo, la información de si otras decisiones previas conducirían a un mejor resultado. Por ejemplo, se ha analizado una línea prevista para una velocidad máxima de 300km/h y se ha concluido que el VAN socio-económico es positivo y que el VAN financiero supera el mínimo prestablecido. Ello permite tomar la decisión de construir la línea. Pero no se sabe si una velocidad de diseño de 350km/h en algún tramo de la línea conduciría a un VAN socio-económico mayor con el mismo VAN financiero. Lo mismo podría hacerse con la tarifa a aplicar, con la capacidad de los trenes, etc.

La búsqueda de la tarifa óptima, del número de frecuencias óptimo o la velocidad de diseño que maximiza la rentabilidad del proyecto, debería de ser imprescindible en todo análisis coste beneficio, pues ayudaría así al planificador a tomar decisiones más coherentes y eficientes.

De todos aquellos parámetros gestionables que alimentan el análisis financiero de una infraestructura ferroviaria, la velocidad es el objeto de análisis en esta tesis. El objetivo principal consiste en analiza el efecto de la velocidad de diseño de la línea en los resultados; es decir, consiste en desarrollar una metodología que, en lugar de calcular el VAN socio-económico (o cualquier otro resultado que se desee emplear en el análisis multicriterio) para una velocidad predeterminada, permite buscar la velocidad óptima que conduce al mejor VAN socio-económico compatible con el mínimo VAN financiero requerido.

La velocidad de diseño de la línea tiene una gran importancia en el resultado final y en la rentabilidad socio-económica, ya que influye en todos y cada uno de los parámetros que alimentan un ACB (véase Figura 2), si bien normalmente se acepta como parámetro predeterminado y fijo. Así como otras variables gestionables son, en ocasiones, ámbito de estudio dentro de los análisis de ACB (por ejemplo, la tarifa), la velocidad suele ser un valor preestablecido dentro del modelo.

Naturalmente, la velocidad de diseño de la línea no ha de ser uniforme en toda la línea, ya que los costes son muy diferentes según el tipo de terreno. Por ello, la línea se dividirá en tramos y subtramos y se calculará la velocidad de diseño óptima de cada uno ellos.

Esta metodología ayudará, por ejemplo, a la toma decisiones sobre si una línea o tramo concreto debe construirse a 300km/h, 350km/h o si con una línea (o tramo de 200km/h) se conseguiría un mejor resultado.

La influencia de la velocidad de diseño de cada uno de los tramos de una línea en su resultado y en concreto en su VAN socio-económico o financiero son muy numerosas: Por ejemplo, una velocidad de diseño mayor supone costes mayores de inversión con incidencia diferente según el tipo de terreno y, en ocasiones, mayores costes de mantenimiento, pero también permite un mejor tiempo de viaje y, por ello, un incremento en el número de viajeros dispuestos a pagar por el billete y unos mayores ingresos y más ahorros de tiempo. También tienen un efecto directo sobre los costes operativos. En suma, los efectos de la variación de la velocidad sobre los VAN son muy numerosos y complejos y son objeto de análisis en esta tesis.

El modelo que se plantea está dotado de la máxima flexibilidad y posibilidad de adecuarse a cada caso. Puede utilizarse tanto para la optimización de una línea nueva con una única ruta o con varias rutas, y éstas pueden estas dispuestas de forma lineal o ramificada, como para optimizar la conexión de una localidad con una red o corredor preexistente.

Para el cálculo de los costes y la inversión se han empleado valores económicos (precios unitarios) de España, así como normas técnicas y prácticas de explotación españolas, pero pueden adaptarse a cualquier otro entorno: lo relevante son las relaciones funcionales que se establecen entre las variables, no sus valores concretos. Igual ocurre con la cuantía de la inversión: en un caso concreto puede disponerse de valores exactos de la inversión para cada velocidad de diseño del tramo, que pueden emplearse en lugar de los genéricos que se incluyen en el presente trabajo.

También puede aplicarse la metodología cuando el análisis multicriterio emplee otros criterios diferentes del VAN socio-económico con la limitación del financiero: el modelo ofrece como resultado todos los datos relevantes para el proceso de optimización.

0.1.1 Problemática existente respecto a la determinación de la velocidad

En Marzo de 2013 se explotan 21.500 kilómetros de líneas ferroviarias de alta velocidad en todo el mundo según (Barrón de Angoiti, 2013), de los que 2.444,5 kilómetros corresponden a la red ferroviaria española (según el Observatorio del Ferrocarril). Exceptuando algún tramo como Segovia-Valladolid, cuya velocidad de diseño es de 500km/h, la velocidad máxima de diseño es prácticamente la misma a lo largo de toda la red de alta velocidad y, como consecuencia, surgen algunas preguntas; ¿existe algún criterio que defina la velocidad de diseño de las líneas de alta velocidad ferroviarias para mejor alcanzar los objetivos deseados?

Hasta la fecha, una vez definido el tiempo de viaje deseado de cada una de las rutas[1] origen-destino de un corredor[2] se determina la velocidad media comercial (conocida la longitud del trayecto). La solución adoptada en la práctica para obtener este tiempo de viaje (o para la consecución de esa velocidad media comercial) consiste generalmente en establecer una velocidad máxima de diseño para toda la línea.

Predeterminada como criterio, por tanto, esta velocidad máxima, se adoptan en el diseño de la infraestructura una serie de parámetros (radios de curva, pendientes, etc.) que condicionan su trazado y, por tanto, el coste de la línea, así como las prestaciones que ofrecerá la misma.

La adopción de cada uno de estos parámetros (determinados a partir de la velocidad máxima), se hace en ocasiones para toda una red (por ejemplo, para las nuevas líneas españolas de alta velocidad se ha adoptado el radio mínimo de 6.750 metros, apto para 350km/h y una inclinación máxima de 25 milésimas). En otros casos se adoptan valores para una línea completa (por ejemplo, para la llamada “Y vasca”, prevista para tráfico mixto, radio de curva 3.200 metros para 250km/h y 4.000 metros para velocidades 280km/h, así como una inclinación máxima de 15 milésimas).

En uno y otro caso (tanto cuando se adoptan parámetros comunes para toda la red como cuando son parámetros específicos para una línea) se aceptan o aplican excepciones en tramos puntuales que siempre suponen aumentos de los radios de curva o aumentos puntuales de la rampa máxima (que se traducen en mayores pérdidas de tiempo y pérdidas de la capacidad de arrastre).

Se entiende, por lo tanto, que la decisión de ir a una velocidad u otra es, en definitiva, debida a criterios geométricos (mayores radios de curva y menores rampas, mayor velocidad…), lo que confirma que la velocidad no se determina a través de un análisis de cuál es el tiempo óptimo que maximiza la rentabilidad de la infraestructura, sino más bien es un parámetro fijo y ajeno a cualquier proceso de optimización previo.

---

[1] Se define ruta, como la unión de varias líneas consecutivas entre un origen y un destino.

[2] Un corredor está constituido por todas las posibles rutas entre un origen y un destino dado.

Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, la velocidad juega un papel muy importante en un escenario de eficiencia y de mejora del beneficio social; no sólo influye en el tiempo de viaje, sino que es una pieza básica en la rentabilidad socio-económica de un proyecto ferroviario, ya que tiene la capacidad de influir tanto en los ingresos como en los costes del operador, gestor de la infraestructura, etc.

0.1.2 Justificación del estudio

En época de restricciones económicas, parece que la eficiencia debería presidir toda decisión y, por lo tanto, todos los esfuerzos deberían estar orientados a mejorar las prestaciones, a partir de la utilización más rentable de los recursos disponibles. Ante esta situación, se entiende que la velocidad en una línea de alta velocidad no debe de ser consecuencia de unas características geométricas o de una decisión basada en experiencias anteriores, sino que debe basarse en la cuantificación de los diferentes resultados positivos y negativos del proyecto, para conseguir la mejora de los objetivos propuestos.

Centrándonos en proyectos ferroviarios, debería basarse en el análisis del posible potencial de tráfico y de sí el coste (consecuencia de esa velocidad) es asumible. Determinada la velocidad con estas premisas, a la que llamaremos velocidad óptima, las características geométricas surgirán como consecuencia directa.

Determinados estudios destacan que la mejora progresiva de la velocidad no recibe la misma respuesta por parte de la sociedad, por lo que circular más rápido no siempre es la solución más rentable (Mourabit Fossas, 2003).

En definitiva, es necesario no establecer la velocidad óptima como la velocidad máxima que se puede alcanzar sino como aquella que permite maximizar la rentabilidad; esta afirmación está en línea con (López Pita, 2007), que se refiere al precio del exceso de la velocidad, *"(…) en una relación o corredor dado reducir el tiempo de viaje por debajo de un cierto límite, variable para cada relación, podría significar un débil incremento de la cuota de mercado. Este hecho iría acompañado por un incremento de los gastos de explotación, pero no de los ingresos, lo que produciría un balance económico negativo (…)".* En este mismo artículo se hace alusión a unas declaraciones realizadas por responsables de los ferrocarriles suizos; *"No circular tan rápido como técnicamente sea posible, sino como comercialmente sea necesario debería presidir la planificación".*

Los nuevos proyectos ferroviarios deberían aplicar una metodología que permita alcanzar unas determinadas velocidades (velocidad óptima) con las mínimas inversiones y los máximos retornos. La relación entre ingresos y costes y la velocidad no es lineal, por lo que cuando se pretende extrapolar los resultados o las experiencias de escenarios ya analizados suelen surgir problemas e ineficiencias.

El concepto de velocidad óptima, fue introducido ya en la década de los 70 por los ferrocarriles franceses en servicios de alta velocidad, en concreto en la línea Paris-Lyon. Este análisis determinó que, para obtener la mayor rentabilidad en esa línea, la velocidad tendría que estar comprendida entre 260km/h y 270km/h. La metodología utilizada se basaba principalmente en analizar el comportamiento de la demanda, es decir, en definir y cuantificar aquellos parámetros que influían en la decisión de un individuo a la hora de escoger un modo de transporte u otro, tales como confort, frecuencia, tarifas…Llegaron a la conclusión que el tiempo de trayecto y, por lo tanto, la velocidad media era un parámetro muy influyente en la cuota de mercado.

Estudios como el realizado por los ferrocarriles franceses ponen de manifiesto que la velocidad óptima se puede establecer como resultado de un proceso analítico. Sin embargo, estos estudios se centran exclusivamente en una de las partes del proceso analítico, no contemplando el resto de ellas, por ejemplo, el caso francés se centra exclusivamente en estimar el comportamiento de la demanda y, por lo tanto, en los posibles ingresos del proyecto, dejando sin evaluar el efecto de la velocidad en los costes de inversión o de explotación.

El proceso analítico debe contemplar todos las posibles variables que influyen en la decisión de construir una línea, no solo una parte de ellas, pues puede darse el caso de que, por maximizar, por ejemplo los beneficios, los costes crezcan drásticamente haciendo inviable la construcción de la infraestructura; o, al revés, puede darse que el caso que al reducir la inversión, el tiempo de viaje se incremente demasiado, lo que supondría una pérdida de ingresos.

Por ello, se entiende que este proceso debe establecerse como un compromiso entre el volumen de mercado captado (y su competitividad frente a otros medios de transporte) por incrementar la velocidad y, por lo tanto, reducir el tiempo de viaje, y los costes asociados a este incremento (costes de explotación, costes sociales y costes de inversión). Este proceso llevará a obtener la velocidad óptima.

La velocidad presenta una relación clara con los beneficios del proyecto, pero también con los diferentes costes que genera una infraestructura ferroviaria a las entidades que participan en su construcción y explotación. A modo de resumen puede afirmarse que:

- Elevadas velocidades de diseño incrementan el coste de inversión, de explotación y posiblemente también se produce un incremento en el coste de mantenimiento.
- Por otro lado, altas velocidades mejoran el atractivo del transporte para la sociedad, ya que reducen los tiempos de viaje, lo que se traduce en un incremento de la movilidad y, por lo tanto, de los ingresos.
- Además, incrementar la velocidad tiene una repercusión clara en los costes externos, ya que elevadas velocidades suponen mayor atractivo para los viajeros, lo que implica un transvase de viajeros de modos que son más contaminantes, tienen mayor índice de accidentabilidad, etc. al modo ferroviario con menores costes externos. También se producen mayores ahorros de tiempo los que supone un claro beneficio para el usuario final del transporte.

Una modificación en la velocidad provocará una variación en los ingresos, pero también una variación de los costes y, por lo tanto, una variación en la rentabilidad del proyecto. Esto quiere decir que para cada velocidad se obtendrá una rentabilidad diferente. La complejidad reside en encontrar la velocidad que mayor rentabilidad ofrece al proyecto. De este modo, la estructura para la determinación de la velocidad óptima atendería al esquema representado en la Figura 3.

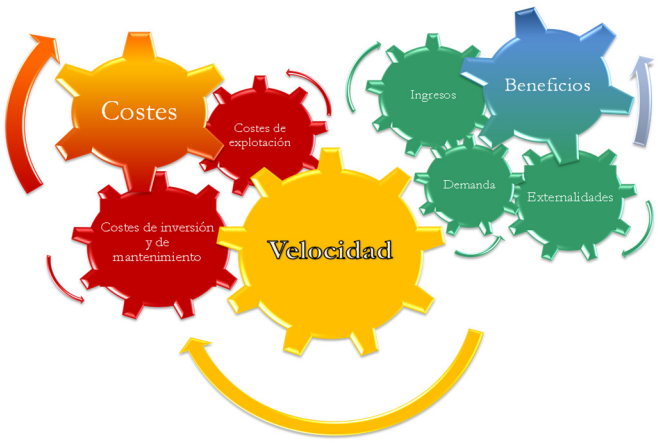


Figura 3. Factores que afectan al cálculo de la velocidad óptima.

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, el problema toma un mayor grado de complejidad cuando se considera que la velocidad de una línea está formada por un conjunto de velocidades máximas de diseño. Obsérvese que una infraestructura ferroviaria está formada por un conjunto de tramos y/o subtramos (partes de línea que comparten algún tipo de característica: orografía, relieve…) cada uno de ellos puede tener una velocidad máxima de diseño diferente.

La figura que se incluye a continuación (Figura 4) muestra un ejemplo sencillo de una línea formada con dos tramos diferentes. Dependiendo de la velocidad máxima de diseño de cada tramo, el coste de inversión será uno u otro y también se obtendrá una velocidad media u otra, velocidad media que influye en los costes de explotación, ingresos y beneficios.

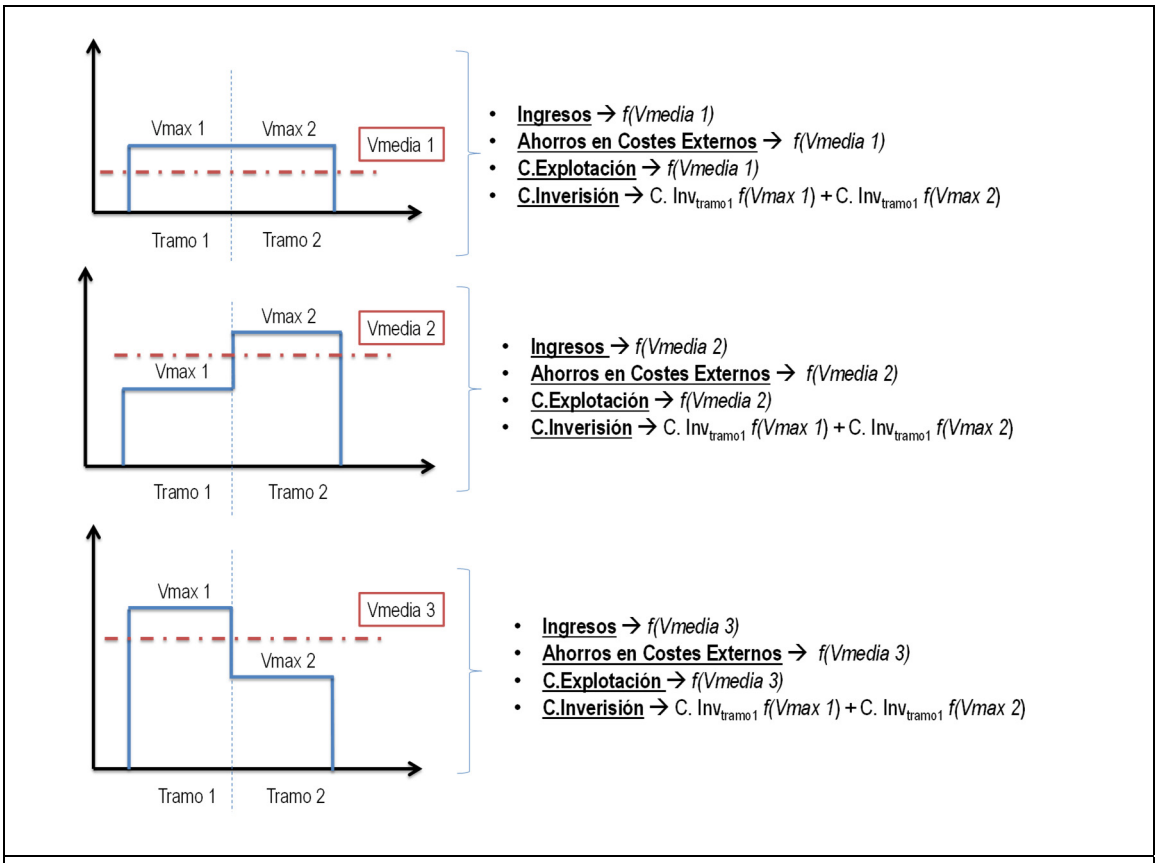


Figura 4. Diferentes velocidades máximas por tramos de una línea que suponen diferentes ingresos y costes.

Como se observa en la figura anterior, una línea puede tener múltiples combinaciones de velocidades máximas de diseño por tramo o subtramo, pero es importante destacar que solo una combinación de velocidades máximas es la que maximiza la rentabilidad del proyecto.

La importancia de encontrar una metodología capaz de prever resultados y de estimar la viabilidad de un proyecto cuando se modifiquen determinados parámetros (velocidad) es básica, sobretodo en un escenario de escasez de recursos, de cambios en los modelos constructivos y de cambios en las funcionalidades de las infraestructuras dentro de las propias redes ferroviarias.

0.2 OBJETIVO DE LA TESIS

El objetivo principal de esta tesis consiste en determinar la velocidad comercial, tiempo de viaje y la combinación de velocidades máximas de diseño que permite un mejor ajuste a los objetivos del proyecto.

Aquella combinación de velocidades máximas que obtenga mejores resultados en términos socio-económicos (mayor VAN socio-económico) sujetos a las restricciones que se determinen (limitación de la rentabilidad financiera y de los coste de inversión), será la que permita obtener mayores ingresos con los mínimos costes posibles y, por lo tanto, será la que obtenga la velocidad óptima y/o el tiempo de viaje óptimo (en el siguiente capítulo se analizará la relación entre ambos conceptos) para el que debería acometerse el proyecto.

Además de este objetivo principal aparecen otros objetivos secundarios que influyen decisivamente en el primero. Estos corresponden a la determinación de las relaciones funcionales entre la velocidad e ingresos y beneficios, y la estimación del efecto de la velocidad en los costes.

Estos objetivos "colaterales" se reflejarán en:

- Conocimiento del efecto de la velocidad en los ingresos y beneficios. Esta materia puede ser de gran ayuda para la realización de estudios tanto de planificación como de explotación ferroviaria. El estudio y conocimiento de los parámetros (especialmente la velocidad) que definen y caracterizan los ingresos y beneficios generados por la explotación ferroviaria puede ayudar al diseño de la oferta de transporte con el objetivo de optimizar los recursos disponibles (mejorar el aprovechamiento), así como mejorar los resultados socio-económicos.
- Desarrollo de funciones de costes que aportarán el conocimiento necesario de los mismos, materia que resulta de vital importancia para la toma de decisiones. Además, resultarán de este estudio una serie de criterios de diseño que no solo permitirán un mejor aprovechamiento de los recursos públicos e incrementar el beneficio social, sino que podrán servir de ayuda para abrir nuevos campos de investigación en campos relacionados con el transporte.
- Conocimiento de la influencia de la velocidad en la rentabilidad de las infraestructuras ferroviarias, que servirá también de herramienta para reflexionar sobre la explotación de líneas ya existentes, con el fin de cuantificar los posibles retornos, cuando se producen variaciones en la velocidad media y, por lo tanto, en el tiempo de viaje. Ofrecerá la posibilidad de prever resultados cuando se apliquen parámetros diferentes de los ya empleados, lo que supondrá una herramienta básica de ayuda a la hora de planificar la explotación.

0.3 METODOLOGÍA

Para la consecución de los objetivos principales y colaterales de esta tesis doctoral, es necesario emplear una determinada metodología que: (i) permita plantear y caracterizar los problemas y (ii) permita resolverlos de una forma genérica sea cual sea la infraestructura ferroviaria analizada.

0.3.1 Método de la investigación

La metodología que se plantea en esta tesis, que será posteriormente aplicada a un caso ejemplo (un nuevo trazado ferroviario de alta velocidad que una las ciudades de Madrid, Cuenca y Valencia), se especifica en el esquema que se presenta a continuación (Figura 5).

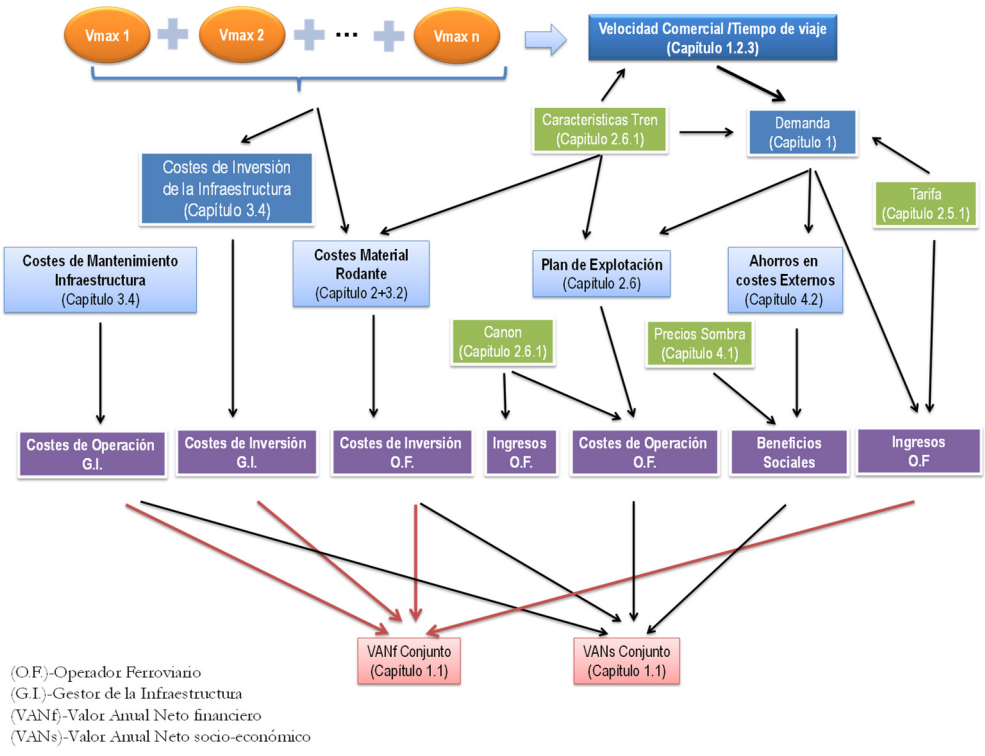


Figura 5. Metodología de cálculo empleado en la tesis.

Fuente: Elaboración propia.

La metodología que se emplea en esta tesis tiene como objetivo evaluar una nueva infraestructura ferroviaria de alta velocidad mediante un análisis coste-beneficio (ACB) para una serie de precios de billete prefijados y para cada una de las combinaciones de velocidades máximas de diseño por subtramo que pueden existir en una determinada línea. Una vez determinada la rentabilidad socio-económica y financiera de cada una de las combinaciones de velocidades máximas por subtramos, se identificará aquella que maximiza la rentabilidad socio-económico del proyecto, sujeto a una determinada limitación en los costes de inversión (una inversión máxima de 3.000M€) y una limitación de la rentabilidad financiera (una rentabilidad financiera mínima de -1.200M€).

Por lo tanto, para cada uno de los precios de billete prefijados se realizará un análisis de todas las combinaciones de velocidades máximas de diseño por cada subtramo que podría tener el trazado propuesto; se estimará en cada una de ellas la rentabilidad socio-económica y financiera y se seleccionará aquella/s que sea/n la/s mejor/es alternativa/s en términos de rentabilidad socio-económica sujeto a las restricciones que procedan.

El proceso que se seguirá corresponde a lo especificado en la Figura 5, que contempla las siguientes etapas:

1. Se comienza por la división de la infraestructura en subtramos (tramos de línea que comparten el mismo relieve del terreno: llano, semillano, montañoso y muy montañoso).
2. A cada subtramo se le asigna una velocidad máxima y, por lo tanto, se obtienen un conjunto de velocidades máximas de diseño por subtramos (conjunto de escenarios). En el caso ejemplo que se analizará se empleará un rango de velocidades máximas que va desde los 200km/h hasta los 500km/h con un salto de 10km/h. Esto supone que se generan 923.521 escenarios que corresponde a

cada uno de las combinaciones de velocidades máximas por subtramo que tiene el nuevo trazado.

3. El siguiente paso corresponde a la determinación de los costes de inversión y los costes de operación de la infraestructura. Aplicando la metodología que se especifica en la sección 3.3 de esta tesis, se determina el coste de inversión y de operación de la infraestructura para cada escenario, ya que es conocido el tipo de relieve que atravesará el trazado propuesto y la velocidad máxima por tramo.
4. Conocida la velocidad máxima de la línea, que corresponde a la velocidad máxima de todas las velocidades máximas asignadas a los subtramos, y prefijando unas características básicas del material rodante (capacidad, tipo de tracción, tipo de articulación, etc.) se determinan, para cada escenario (cada una de las combinaciones de velocidades máximas por subtramo), las características del tren. En esta fase se empleará el modelo desarrollado para determinar las características y el precio del material rodante (apartado 0).
5. El siguiente paso consiste en la determinación de la velocidad media y el tiempo de viaje. En esta fase es conocida la combinación de velocidades máximas de la línea y las características del tren (velocidad máxima, potencia, aceleración, etc.), por lo que aplicando la metodología definida en el apartado 0, es posible determinar la velocidad media y el tiempo de viaje.
6. Conocida la velocidad media y el precio de billete por viajero.kilómetro (c€/vkm), en el caso ejemplo en el que se aplicarán este metodología se considerarán cuatro tipos de tarifas: 9c€/vkm, 12c€/vkm, 18c€/vkm y 20c€/vkm, se determina la demanda que debe atender el tren de alta velocidad, para ello se aplicarán los modelos descritos en la sección 2.2. Además, se empleará los datos de oferta, tanto del ferrocarril como de otros modos de transporte, recopilados de diferentes bases de datos que se especificarán en el capítulo demanda.
7. Posteriormente a la estimación de la demanda se procede a la estimación de la evolución de la misma durante el horizonte temporal del proyecto. Para ello, se empleará descrito en el capítulo 2.4.
8. Para cada precio de billete (tarifa) se procede a la estimación de los ingresos del operador (como se ha explicado en el apartado 2.5.1), pues en esta fase es conocida la demanda y su evolución en el horizonte temporal considerado para su evaluación (30 años).
9. Una vez determinada la tipología y características del tren y las previsiones de demanda se procede a la determinación del plan de explotación (modelos desarrollados en la sección 2.6.2). En esta fase se determinará el número de trenes necesarios para atender el servicio (dimensionamiento del parque).
10. La siguiente fase corresponde con la determinación de los costes de operación. Conocida la velocidad media para cada escenario y el número de trenes necesarios para atender a la demanda, se procede con el cálculo de los costes de explotación, aplicando la metodología expuesta en la sección 3.2. Aquí se calculará los costes de personal a bordo, de mantenimiento de los trenes, de energía de tracción, los costes ligados a la venta, etc.
11. El siguiente paso consiste en la estimación de los ahorros en costes externos y ahorros en tiempo (capítulo 4). En esta fase, es conocida la demanda para cada modo, el trasvase de viajeros de los diferentes modos (coche, bus, avión) al tren de alta velocidad y además se conocen las reducciones de tiempo de viaje conseguidas por el tren de alta velocidad, por ello, aplicando la metodología expuesta en el capítulo 4 se estiman los ahorros en costes externos y en tiempos de viaje.

12. En este punto del proceso analítico se han determinado los ingresos, los beneficios (ahorros en costes externos y en tiempos de viaje), los costes de explotación a lo largo del proyecto y se han estimado los costes de inversión y de operación de la infraestructura, por lo que se procede a la estimación de la rentabilidad socio-económica y financiera del conjunto para cada uno de los escenarios propuestos (cada una de las combinaciones de velocidades máximas). En esta fase se estimará el VAN socio-económico y el VAN financiero mediante la metodología definida en el apartado 1.2.1.
13. La última fase que se llevará a cabo consiste en el criterio de decisión (análisis multicriterio). Se utilizarán en este caso ejemplo dos criterios de decisión: uno basado exclusivamente en maximizar la rentabilidad socio-económica (máximo VAN socio-económico); y otro basado también en maximizar el VAN socio-económico, pero sujeto éste a unas determinadas restricciones financieras, que en este caso consistirán en: limitar los costes de inversión (se limitará la inversión a 3.000M€) y; limitar las pérdidas en la rentabilidad financiera del conjunto (se limitará la rentabilidad financiera a un valor mínimo negativo de -1.200M€).

Obsérvese que para poder estimar la rentabilidad tanto financiera como socio-económica de cada una de las alternativas (escenarios) identificadas y seguir así el esquema presentado en la gráfica anterior, es preciso desarrollar una serie de modelos analíticos que permitan caracterizar el efecto de la velocidad sobre las diferentes variables que alimentan un ACB (ingresos, beneficios y costes).

Estas funciones (modelos analíticos), definidas mediante ecuaciones matemáticas, permitirán conocer la realidad, no solo de manera global, sino que también permitirán identificar cada uno de las partes que caracterizan el problema (variables de la ecuación). Ello permite establecer las relaciones causa-efecto entre los elementos que componen el objeto de la investigación y así poder predecir el comportamiento del sistema.

Los modelos analíticos necesarios para el presente trabajo se desarrollarán con un enfoque “bottom-up”; es decir, se partirá de los procesos físicos asociados al movimiento de los vehículos, a la configuración de la oferta y a las características de la infraestructura para deducir a partir de ellos los ingresos, beneficios, así como los costes de explotación.

Se opta por esta metodología (modelos “bottom-up” o “ingenieriles” según (Hidalgo González, 2005)) y no modelos “top-down” o también llamados “econométricos”, ya que estos últimos en el sector transporte se basan principalmente en analizar valores reales (costes, ingresos, beneficios,…) para posteriormente repartirlos entre las unidades de transporte realizadas. Según (García Álvarez, 2010a) estos son más adecuados para el análisis estadístico y para las predicciones de futuro y de ámbito macroeconómico.

Un enfoque “bottom-up” es más adecuado en este tipo de análisis, pues se prescinde de definir los costes y los ingresos o beneficios globales para construir un modelo matemático que se ajusta y/o calibra para reflejar la realidad. Son más adecuados para la toma de decisiones, pues este tipo de modelos permite identificar y priorizar las acciones a realizar para reducir los costes en un caso o aumentar los ingresos y beneficios en otro.

0.3.2 Posibilidades de aplicación de la metodología

Dentro de una red ferroviaria existen diferentes casos en los que se puede aplicar la metodología desarrollada en esta tesis. Es decir, los modelos desarrollados en esta tesis no solo tienen una posible aplicación o uso, sino que permite su uso en los diferentes

grados de desarrollo en los que se puede encontrar una red o un corredor ferroviario. Los diferentes supuestos de uso de la metodología pueden ser:

1. Se puede aplicar en una línea nueva que tenga una sola ruta lineal origen-destino o varias rutas dentro de una misma línea (ej. Línea Madrid-Barcelona).
2. Se puede aplicar en un corredor que tenga varias rutas origen-destino ramificadas (ej. corredor de Levante).
3. O bien, se puede aplicar al estudio de una ampliación de una línea o corredor existente (ej. Madrid-Norte Noroeste).

El procedimiento a seguir es el mismo en todos los casos, sin embargo, los parámetros a considerar dentro del modelo son diferentes dependiendo si el análisis se realiza sobre una ruta lineal, sobre varias rutas ramificadas o a una ampliación de la red. Pongamos un ejemplo para demostrar las diferentes alternativas de aplicación. Imaginemos que se dispone de una red como la que se muestra en la figura que se incluye a continuación (Figura 6).

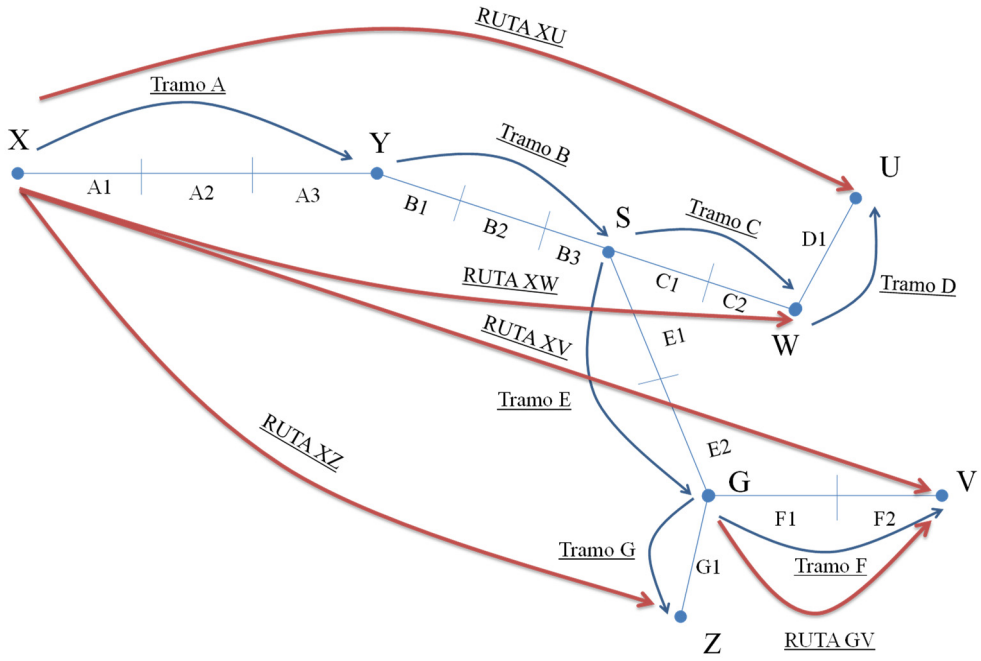


Figura 6. Ejemplo de red ferroviaria para aplicación de metodología.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura anterior, esta red ferroviaria se divide en:

1. Rutas, corresponde a los trayectos origen-destino de los viajeros sobre los que el operador de transporte presta servicios.
2. Tramos, corresponde a la parte de la línea entre paradas intermedias bifurcaciones o finales y comienzos de línea.
3. Subtramos, son las partes de cada tramo que comparten características similares. En esta tesis se considerará subtramos aquellas partes del trazado que comparten el mismo relieve u orografía.

Como muestra la tabla que se incluye a continuación (Tabla 2), cada una de las rutas origen-destino está formada por un conjunto de tramos y un conjunto de subtramos que, en definitiva, son los que marcan el coste de inversión y el coste de mantenimiento. Así

como también cada ruta generará unos ingresos, unos beneficios y unos costes de explotación.

Otra cuestión importante que se observa en la Tabla 2, es que los costes de inversión y mantenimiento dependen de los subtramos y, por lo tanto, puede existir diferentes rutas dentro de un corredor que compartan los mismos costes de inversión (por ejemplo en el caso propuesto las rutas XU y XW compartirían costes de inversión).

Tabla 2. Rutas, tramos y subtramos del ejemplo ilustrativo.

Tramo	Subtramo	Ruta XU	Ruta XW	Ruta XV	Ruta XZ	Ruta GV	Coste Inversión	Costes Mantenimiento
Tramo A	A1	X	X	X	X	-	C.I.(A1)	C.M.(A1)
	A2	X	X	X	X	-	C.I.(A2)	C.M.(A2)
	A3	X	X	X	X	-	C.I.(A3)	C.M.(A3)
Tramo B	B1	X	X	X	X	-	C.I.(B1)	C.M.(B1)
	B2	X	X	X	X	-	C.I.(B2)	C.M.(B2)
	B3	X	X	X	X	-	C.I.(B3)	C.M.(B3)
Tramo C	C1	X	X	-	-	-	C.I.(C1)	C.M.(C1)
	C2	X	X	-	-	-	C.I.(C2)	C.M.(C2)
Tramo D	D1	X	-	-	-	-	C.I.(D1)	C.M.(D1)
Tramo E	E1	-	-	X	X	-	C.I.(E1)	C.M.(E1)
	E2	-	-	X	X	-	C.I.(E2)	C.M.(E2)
Tramo F	F1	-	-	X	-	X	C.I.(F1)	C.M.(F1)
	F2	-	-	X	-	X	C.I.(F2)	C.M.(F2)
Tramo G	G1	-	-	-	X	-	C.I.(G1)	C.M.(G1)
Costes Explotación		C.E.(XU)	C.E.(XW)	C.E.(XU)	C.E.(XU)	C.E.(XU)		
Ingresos		I.(XU)	I.(XW)	I.(XU)	I.(XU)	I.(XU)		
Beneficios		B.(XU)	B.(XW)	B.(XU)	B.(XU)	B.(XU)		

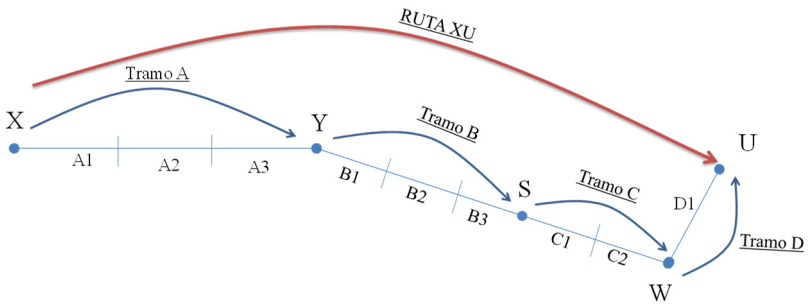
Fuente: Elaboración propia.

Veamos ahora las posibles aplicaciones de la metodología propuesta en esta tesis, para los diferentes escenarios elegidos.

0.3.2.1 Escenario 1: Escenario teórico

En este primer caso se trata de un escenario puramente teórico que consiste en una única ruta origen-destino dentro de una línea o corredor. Se ha seleccionado este escenario pues sienta las bases de la metodología propuesta en esta tesis y facilita la comprensión del complejo problema que se pretende resolver. La única diferencia que presenta con el resto de escenarios a los que se puede aplicar este modelo es el número de parámetros a considerar (menos subtramos y menos rutas), pero no existe diferencia ni en el procedimiento de aplicación ni en la formulación.

Escenario 1: Supongamos que la ruta seleccionada es la ruta XU del corredor descrito gráficamente en la Figura 6. Considerando solamente esa ruta dentro del corredor; puede afirmarse que los costes de inversión y costes de mantenimiento son los referentes a los subtramos (A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2 y D_1), mientras que los ingresos, beneficios y costes de explotación son atribuibles a la propia ruta (RutaXU).



		Costes Inversión (C.I.)	Costes Mantenimiento (C.M.)	Costes de Explotación (C.E.)	Ingresos (I.)	Beneficios (B.)
Escenario 1	Ruta XU	C.I.(A1)+C.I.(A2)+C.I.(A3)+ C.I.(B1)+C.I.(B2)+C.I.(B3)+ C.I.(C1)+C.I.(C2)+ C.I.(D1)	C.M.(A1)+C.M.(A2)+C.M.(A3)+ C.M.(B1)+C.M.(B2)+C.M.(B3)+ C.M.(C1)+C.M.(C2)+ C.M.(D1)	C.E. (XU)	I. (XU)	B.(XU)

Figura 7. Aplicación del modelo en una única ruta del ejemplo ilustrativo considerado.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis coste-beneficio (ACB) aplicado en este escenario se resolvería teniendo en cuenta la estructura de costes, ingresos y beneficios propia de la ruta y de los subtramos que forman la misma y que han sido descrito en la tabla de la Figura 7.

Es importante destacar que la velocidad tiene un papel fundamental, pues el coste de inversión y de mantenimiento depende de la velocidad máxima considerada en cada subtramo, pero también afecta al coste de explotación, ingresos y beneficios. La combinación de velocidades máximas (velocidades máximas por subtramo) influye en la velocidad media de la ruta (tiempo de viaje); velocidad media que afecta a los parámetros que dependen de ella (demanda, plan de explotación, ahorros en costes externos…). Para cada velocidad media se obtendrán unos ingresos y unos beneficios y supondrá al operador unos costes de explotación.

Obsérvese que este caso no se produce en un escenario real ya que, en una línea, normalmente, existen diferentes rutas lineales o ramificadas; por ejemplo, la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona es un caso similar al tratado en este escenario teórico, sin embargo, el operador ferroviario que presta servicio en esa línea (Madrid-Barcelona) ofrece diferentes rutas a los viajeros (Madrid-Zaragoza-Barcelona, Madrid-Calatayud-Zaragoza-Camp Tarragona-Barcelona…). Este escenario con diferentes rutas lineales y/o rutas ramificadas es el que contempla el escenario 2 que se describe a continuación.

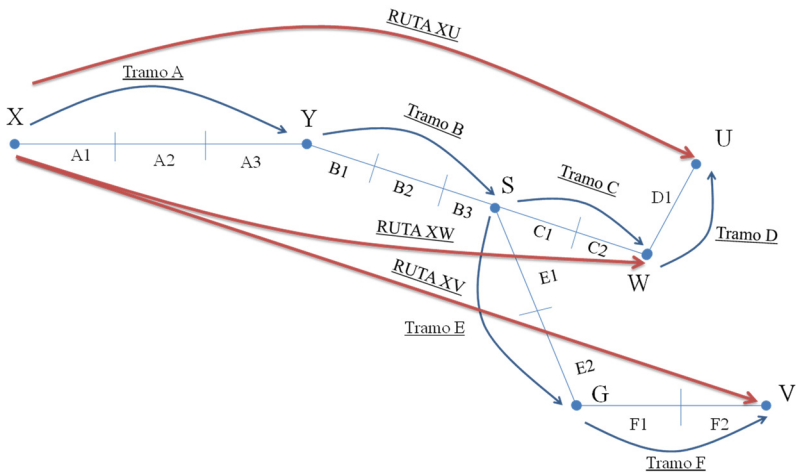
0.3.2.2 Escenario 2: Corredor con diferentes rutas origen-destino

En este caso el modelo no solo se aplicará a una sola ruta sino a diferentes rutas dentro de la red o de la línea, rutas que pueden ser lineales o ramificadas. Este escenario puede asociarse a un caso real como sería el caso del corredor de Levante.

Escenario 2: Puede observarse en la ilustración que se muestra a continuación (Figura 8) que dentro de un corredor pueden existir diferentes rutas origen-destino, generando cada una de ellas unos ingresos y beneficios e infiriendo también cada una de ellas un coste de explotación y operación.

Además, se observa que parte de los tramos y subtramos son compartidos para todas las rutas (XU, XW, XV y GV), por lo que el coste de inversión y mantenimiento se “reparte” entre cada una de ellas. Es decir, el tramo A y el tramo B, es común a todas

las rutas, por lo que el coste de inversión por viajero transportado se reduciría en relación al caso anterior (escenario 1).



		Costes Inversión (C.I.)	Costes Mantenimiento (C.M.)	Costes de Explotación (C.E.)	Ingresos (I.)	Bneficios (B.)
Escenario 2	Ruta XU Ruta XW Ruta XV	C.I.(A1)+C.I.(A2)+C.I.(A3)+ C.I.(B1)+C.I.(B2)+C.I.(B3)+ C.I.(C1)+C.I.(C2)+ C.I.(D1)+ **C.I.(E1)+C.I.(E2)+ C.I.(F1)+C.I.(F2)**	C.M.(A1)+C.M.(A2)+C.M.(A3)+ C.M.(B1)+C.M.(B2)+C.M.(B3)+ C.M.(C1)+C.M.(C2)+ C.M.(D1)+ **C.M.(E1)+C.M.(E2)+ C.M.(F1)+C.M.(F2)**	C.E. (XU) + **C.E. (XW)** + **C.E. (XV)**	I. (XU) + **I. (XW)** + **I. (XV)**	B. (XU) + **B. (XW)** + **B. (XV)**

Figura 8. Aplicación del modelo en un corredor, considerando diferentes rutas dentro del ejemplo ilustrativo expuesto.

Fuente: Elaboración propia.

La metodología aplicada es la misma que en el caso anterior, es decir se aplica un ACB al conjunto de rutas. El procedimiento y las fases de aplicación son las mismas, lo que cambia con respecto al anterior escenario es que los parámetros a considerar (datos de entrada en el modelo) son diferentes; se añaden rutas y subtramos (marcados en negrita en la tabla de la Figura 8).

Concretamente en el caso ejemplo empleado aquí, es necesario añadir al análisis realizado en el escenario 1 los siguientes costes e ingresos:

- Los ingresos, beneficios y costes de explotación de las nuevas rutas (rutas: XW, XV) y
- los costes de inversión y mantenimiento de los Tramos E y F (subtramos: E_1, E_2, F_1, F_2).

Como se ha mencionado, el procedimiento de cálculo es el mismo, simplemente consiste en añadirle aquellos ingresos y costes que se generan en las nuevas rutas, tramos y subtramos que se están analizando. En la tabla que se incluye en la Figura 8 se muestra tanto los ingresos como los costes que deberían tenerse en cuenta para llevar a cabo el ACB.

La velocidad, igual que en caso anterior, tiene un papel clave, pues influye en el coste de inversión de cada subtramo y en los ingresos, beneficios y costes de explotación de cada una de las rutas, pues estos dependen de la velocidad media.

En este caso se obtendrá el cuadro de velocidades máximas por ruta (velocidades máximas por subtramo) que permite obtener la velocidad óptima para cada una de las

rutas analizadas, es decir se obtendrán varias velocidades óptimas (en este caso serían dos) una por cada ruta analizada. Este conjunto de velocidades óptimas por ruta son las que permite maximizar la rentabilidad del corredor ámbito de análisis.

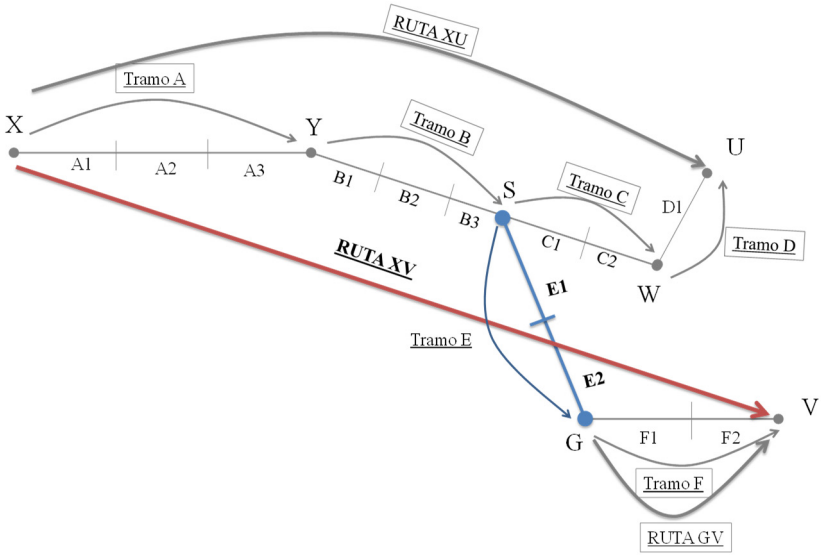
0.3.2.3 Escenario 3: Ampliación de una red

El último posible ejemplo de aplicación de la metodología es en un escenario en el que la red ferroviaria pueda sufrir ampliaciones de manera progresiva, como puede ser el caso de la red Madrid-Norte Noroeste.

Escenario 3: Este escenario puede asimilarse a un caso como el que se muestra en la Figura 9. Supongamos que la línea que comprende la Ruta XU ya está construida y puesta en servicio y, por lo tanto, los subtramos A_1, A_2, A_3, B_1, B_2 y B_3 están construidos para una velocidad máxima prefijada, parámetro que no se puede modificar.

Supongamos también que la línea que comprende la Ruta GV está también en servicio y construida y, por lo tanto, al igual que los subtramos de los tramos A y B, los subtramos F_1 y F_2 están construidos para una velocidad máxima determinada.

Imaginemos ahora que se pretende ampliar la red de manera que se planifica unir el punto S con el G con lo que aparecerá una nueva ruta en el corredor que según la Figura 9 corresponde a la Ruta XV.



		Costes Inversión	Costes Mantenimiento	Costes de Explotación	Ingresos	Beneficios
Escenario 3	Ruta XV	C.I.(E1)+ C.I.(E2)	C.M.(E1)+ C.M.(E2)	C.E. (XV)	I. (XV)	B. (XV)

Figura 9. Aplicación del modelo en un corredor, considerando diferentes rutas dentro del ejemplo ilustrativo expuesto.

Para este nuevo escenario de ampliación de red identificado, la metodología que se desarrolla en esta tesis también tiene respuesta. La metodología se podría aplicar con el objetivo principal de determinar a qué velocidad máxima debería construirse los subtramos E_1 y E_2 que obtienen la máxima rentabilidad de la nueva ruta que aparece (Ruta XV).

Obsérvese que, como se ha expuesto anteriormente, los tramos A, B y F son fijos (ya están construidos) y, por lo tanto, su velocidad máxima es conocida, sin embargo, son

desconocidas las velocidades máximas a las que se debe construir los subtramos E_1 y E_2.

La metodología que se plantea, permite la generación de múltiples escenarios en los que solo variaría la velocidad máxima de los tramos E_1 y E_2, lo que permitiría obtener para cada escenario:

- Un coste de inversión referente al coste de inversión de los subtramos E_1 y E_2.
- Unos ingresos y unos costes de explotación que se generan como consecuencia de la velocidad media (tiempo de viaje) que aparece como combinación de las velocidades máximas conocidas de los subtramos (A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, F_1 y F_2) y las velocidades máximas establecidas por el planificador en los subtramos E_1, E_2.

La diferencia en tiempo de viaje (velocidad media) y, por lo tanto, la diferencia en ingresos y costes de explotación entre unos escenarios u otros, se debe exclusivamente a que las velocidades máximas de los subtramos E_1 y E_2 son diferentes de un caso a otro. Lo mismo ocurre para en los costes de inversión, la diferencia en costes de inversión de un escenario a otro es debida a las diferentes velocidades máximas de los subtramos que componen el tramo E.

Aquella combinación de velocidades máximas de los subtramos E_1 y E_2 que maximice la rentabilidad de la Ruta XV será la que obtenga la velocidad óptima. El ACB de cada uno de los escenarios definidos, en este caso se alimentará de los inputs incluidos en la tabla de la Figura 9.

La única diferencia que tiene este ejemplo con el escenario 1, es que en este caso solo se estudia la velocidad máxima de dos subtramos dentro del total de la ruta (Ruta XV), mientras que en el escenario 1 es necesario determinar la velocidad máxima de todos los subtramos que componen la ruta (Ruta XU).

Se demuestra con estos escenarios ilustrativos que la metodología desarrollada permitiría su aplicación en las diferentes fases de un proyecto de construcción de un corredor o de una red ferroviaria, la única diferencia entre unos casos y otros consiste en el número de inputs a considerar y que deben alimentar el ACB.

En esta tesis se evaluará la rentabilidad financiera y económica de una única ruta, que corresponde al escenario teórico (escenario 1), pues como se ha visto, el resto de escenarios corresponde a versiones ampliadas del escenario 1. La línea que se ha seleccionado para la aplicación de la metodología corresponde a la línea, considerando una única ruta (Madrid-Valencia) y a la que se le modificará el tipo de terreno con respecto al real, en aras de aplicar la metodología en todas las posibles casuísticas que se desarrollarán en el capítulo de costes de inversión.

0.3.3 Estructura de la tesis

La ordenación de los contenidos de esta tesis doctoral está en línea con los objetivos propuestos y la metodología que se ha definido en la sección anterior. El esquema empleado sigue las fases establecidas por un ACB, en el que se tratan de manera independiente y autónoma los diferentes parámetros que alimentan el modelo, analizando detalladamente el efecto que genera la velocidad en ellos.

Contenidos de la tesis: La tesis se divide en los siguientes capítulos:

- **Capítulo 0.** Esta tesis empieza con un capítulo introductorio, en el que se plantea el problema, justifica la investigación, se definen los objetivos y la metodología propuesta, así como se especifican las posibles aplicaciones de la metodología dentro de una red o corredor ferroviario.
- **Capítulo 1.** En el primer capítulo se analizan los conceptos generales sobre evaluaciones financieras y económicas de proyectos ferroviarios, especificando la metodología que aquí se utilizará y las fases para su implementación. También se define el concepto velocidad, contemplando todas las posibles acepciones

que puede recoger este término. Además, dentro de esta sección se incluye un apartado en el que se explicará la evolución de la velocidad comercial y máxima desde la aparición del ferrocarril y su relación con el tiempo de viaje.

- **Capítulo 2.** En el segundo capítulo se profundiza en los ingresos generados por el sistema ferroviario y su relación con la velocidad comercial. Este capítulo se dividirá en tres grandes bloques:
    a. Demanda y tiempo de viaje (velocidad comercial). En esta sección se definirá el modelo de estimación de demanda, se aplicará a un caso ejemplo (corredor de Levante) y se cuantificará la relación entre la demanda y la velocidad comercial, lo que permitirá relacionar tráfico y tiempo de viaje.
    b. Determinación de los ingresos del operador y del gestor de la infraestructura. En esta sección se diferenciarán los ingresos generados por el operador ferroviario y los ingresos que obtendrá el administrador de la infraestructura. En el primer apartado (ingresos del operador) se definirá y cuantificará los ingresos que un operador ferroviario obtendrá por prestar servicio de dos formas diferentes: (i) considerando un ingreso fijo por viajeros kilómetro con independencia de la velocidad y (ii) considerando que el ingreso por viajero se obtiene tras el análisis de las diferentes alternativas que se presentan. Se analizará y explicarán también, las diferencias en ingresos que se obtienen aplicando ambos modelos en la línea Madrid-Valencia.
    Mientras que en el segundo apartado se determinarán los ingresos del gestor de la infraestructura, se definirán las diferentes metodologías existentes, centrando el análisis en aquellos modelos que permitan una estimación homogénea y genérica, permitiendo así extrapolarse a otros escenarios que puedan plantearse en el futuro.
    c. La última sección de este capítulo corresponde al plan de explotación. En este apartado se definirá la metodología aplicada para el dimensionamiento del parque de material. Además, se incluye un apartado en el que se desarrolla un modelo que permite dimensionar los trenes en función de una serie de variables, entre las que se encuentra la velocidad máxima. Al igual que en el caso de los ingresos del operador se aplicará la metodología a la ruta Madrid-Valencia.
- **Capítulo 3.** En el tercer capítulo se calcularán los costes de inversión y los costes de explotación para cada uno de los agentes vinculados al sector ferroviario y se relacionarán con la velocidad. Al igual que se ha hecho en el capítulo anterior, no sólo consiste en exponer y cuantificar los diferentes costes que tanto el operador y el gestor de la infraestructura soportan, sino que también se trata de determinar y/o cuantificar las relaciones funcionales entre estos costes y la velocidad. En ambos casos se empleará la línea Madrid-Valencia para validar la metodología propuesta.
- **Capítulo 4.** En el cuarto capítulo se evalúan los costes externos y los ahorros de tiempo generados por la nueva infraestructura ferroviaria. Se determinarán las externalidades en dos escenarios: (i) suponiendo que no se construye el proyecto, (“escenario base”) y (ii) considerando que se construye la línea férrea de alta velocidad (“con actuación”). Las diferencias entre ambos escenarios corresponden a los ahorros en costes externos. Se aplicará el modelo desarrollado en la línea Madrid-Valencia con el fin de validar y evaluar el modelo.
- **Capítulo 5.** El último capítulo de esta tesis corresponde al caso ejemplo. Se aplica la metodología propuesta en un escenario teórico que corresponde a la línea Madrid-Valencia con una única ruta. El objetivo consiste en estimar la rentabilidad económica y financiera del conjunto para la ruta Madrid-Valencia, considerando un trazado nuevo y diferente al que hoy en día existe.
  Además, el análisis económico y financiero se realizará para cuatro precios de billete diferentes (9c€/vkm, 12c€/vkm, 18c€/vkm y 20c€/vkm), lo que permitirá no

solo analizar el efecto de la velocidad sino el efecto en la rentabilidad del proyecto al precio del billete pagado por los viajeros.
Se definirán los diferentes subtramos en los que se dividirá este nuevo trazado (no se utilizará el trazado actual con el objetivo de evaluar todas las posibles combinaciones de tipos de terreno y velocidades máximas definidas en la metodología), que corresponde a los cuatro tipos de terreno identificados en el apartado costes de inversión de la infraestructura (terreno llano, semillano, montañoso y muy montañoso) y se le asignará diferentes velocidades máximas a cada subtramo.
Para cada una de ellos (combinación de velocidades máximas por subtramo) y para cada tarifa (precio de billete) se realizará:

a. Una evaluación financiera. Conocidos los flujos de caja se llevará a cabo una evaluación financiera (mediante indicadores económicos; VAN_f, TIR_f…).
b. Una evaluación socio-económica mediante indicadores VANs y TIRs, estimando en términos monetarios las externalidades derivadas de la realización del proyecto.

Por último, se especificará el criterio de decisión. En este caso se identificará la combinación de velocidades máxima, la velocidad comercial y el tiempo de viaje óptimo basándose en dos criterios de decisión: (i) basándose exclusivamente en la máxima rentabilidad socio-económica y (ii) basándose en la máxima rentabilidad económica sujeta a una serie de restricciones propuestas (limitación de la inversión a 3.000M€ y limitación de la rentabilidad financiera a un cierto valor negativo -1.200M€).

Además, se incluye un capítulo de conclusiones y otro capítulo con las futuras líneas de investigación identificadas y, por último, se incluye la bibliografía y los anexos, en los que se presentan los índices de tablas y de figuras.

1. CONCEPTOS TEÓRICOS BÁSICOS DE LA TESIS

1.1 INTRODUCCIÓN

Dos son los conceptos básicos sobre los que sustenta esta tesis: el primero de ellos es el análisis coste-beneficio de proyectos ferroviarios (ACB); y el segundo es la velocidad en las diferentes formas o acepciones que puede aparecer (velocidad máxima, velocidad comercial, …).

A lo largo de este estudio aparecerán estos dos conceptos en innumerables ocasiones, debido a que, como se ha expuesto en el capítulo anterior, se pretende relacionar ambos términos con un claro objetivo final, que es el de optimizar la velocidad en una determinada ruta o corredor.

Pero, antes de profundizar en las interrelaciones que existen entre ambas cuestiones, es imprescindible analizar de manera independiente cada una de ellas con el fin de especificar y entender las diferentes metodologías que permiten su cálculo.

Por lo tanto, este capítulo se dividirá en dos grandes bloques:

- Análisis y definición de la metodología que se aplica en las evaluaciones socio-económicas de proyectos ferroviarios, especificando la metodología que aquí se utilizará y las fases para su implementación. Se analiza, en general, todo lo relacionado con los posibles objetivos perseguidos al construir una infraestructura.
- Definición del concepto "velocidad", contemplando todas las posibles acepciones que puede recoger este término. Además, se incluirá un subcapítulo en el que se explicará la evolución de la velocidad comercial y máxima desde la aparición del ferrocarril y su relación con el tiempo de viaje.

1.2 ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO (ACB) DE UN PROYECTO FERROVIARIO

La evaluación socio-económica y financiera que plantea esta tesis se enmarca en un análisis coste-beneficio (ACB). Esta metodología (ACB) estima los ingresos, resta de ellos los costes y permite ver si el flujo de caja es positivo o negativo. Además, permite hallar el volumen de ganancia social y/o la tasa de rendimiento que aportaría el proyecto, permitiendo así elegir el proyecto al que más eficientemente dedicar los recursos que se disponen.

El objetivo principal de este tipo de análisis consiste en evaluar los efectos financieros, económicos, sociales y medioambientales de un proyecto y asignar a todos ellos un valor monetario. Este tipo de análisis no puede responder a todas las preguntas sobre los futuros impactos del proyecto; sin embargo, a través del estudio de un conjunto de variables microeconómicas, permite determinar de manera consistente y sólida el impacto económico que tendrá el proyecto evaluado.

Las evaluaciones socio-económica (ACB) se basan en la comparación entre diferentes alternativas, por lo que un primer paso consiste en determinar cuál es o será el caso sobre el que comparar el nuevo proyecto. Según (De Rus & Nash, 2009) un escenario base comúnmente utilizado consiste en utilizar la situación que consiste en no hacer nada (*do-nothing).* Sin embargo, en evaluaciones de proyectos de alta velocidad el escenario base debería fundamentarse en una intervención mínima (*do-minimum*) en el que se debería incluir la inversión necesaria para mantener activo el servicio convencional existente (mantenimiento, personal, …). La diferencia entre ambos

escenarios permite estimar el citado ahorro (beneficio) o coste que supone realizar el proyecto.

La metodología (ACB) es práctica habitual y soporte principal para la toma de decisiones en evaluaciones de proyectos, tanto para evaluaciones económicas a precios de mercado como para las evaluaciones de rentabilidad social y económica que se realizan a partir de la utilidad de precios sombra y costes externos (términos que veremos en el capítulo 4). Puede afirmarse que la metodología está muy estandarizada y es consistente.

Existen diferentes manuales o instrucciones que especifican cómo debe implementarse un ACB. A continuación, se citan y resumen aquellos que se consideran relevantes dentro de este campo:

- "*Guía del Análisis Coste-Beneficio (ACB) para los Proyectos de Inversión*". La Comisión Europea elaboró una guía para la valoración de proyectos en el marco de los Fondos Estructurales y los Fondos de Cohesión, de cara al periodo de programación 2014-2020, en los que los análisis ACB son un requerimiento básico.
- El Banco Europeo de Inversiones (BEI) también publicó en 2005 "*La Guía para Valoración de Proyectos de Ferrocarril, RAILPAG*", siendo su principal objetivo la mejora de los estudios de viabilidad de proyectos de inversión ferroviaria cuando se consideran diversas alternativas.
- En Alemania se elaboró "*Federal Transport Infraestructure Plan 2003 (FTIP´03)*", que contiene la metodología para la evaluación de proyectos de transporte, apareciendo en ella un análisis de impacto medioambiental y de impacto espacial-territorial.
- Existen otros manuales relevantes como: el "*Green Book*" editado por el Departamento del Tesoro Británico en 2003; y la instrucción "CADRE" relativa a los métodos de evaluación económica de grandes proyectos de transporte, editada por el Ministerio de Transporte Francés.
- En el caso español se destacan dos manuales: el manual elaborado en 2010 por el CEDEX "*Evaluación económica de proyectos de transporte*"; y el "*Manual para la evaluación de inversiones de ferrocarril*" realizado por Adif y que su última actualización (2011) es utilizada como base para esta tesis.

1.2.1 Metodología de cálculo de un ACB

Como se ha mencionado, los análisis coste beneficio ofrecen herramientas que permiten determinar el valor de un proyecto como diferencia entre la utilidad social, la inversión y los costes de explotación del mismo, permitiendo a su vez relacionar cada uno de estos puntos con las variables que lo definen.

La pregunta que surge ahora es la siguiente: ¿Cómo un ACB ayuda a un planificador a discernir si un proyecto debe de ser abordado o no? Un ACB determina el "valor financiero de la infraestructura" a partir de unos indicadores de rentabilidad, tales como el Valor Anual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y/o el Déficit de Capital.

Para llegar a determinar estos indicadores de rentabilidad en un proyecto determinado (ej. una infraestructura ferroviaria) el análisis debe seguir un proceso metodológico que básicamente se divide en una serie de fases secuenciales.

1.2.1.1 Fases de un ACB aplicado a una infraestructura ferroviaria

El proceso de evaluación final de un proyecto de inversión en infraestructura ferroviaria se divide en varias fases secuenciales, representadas gráficamente en la Figura 10.

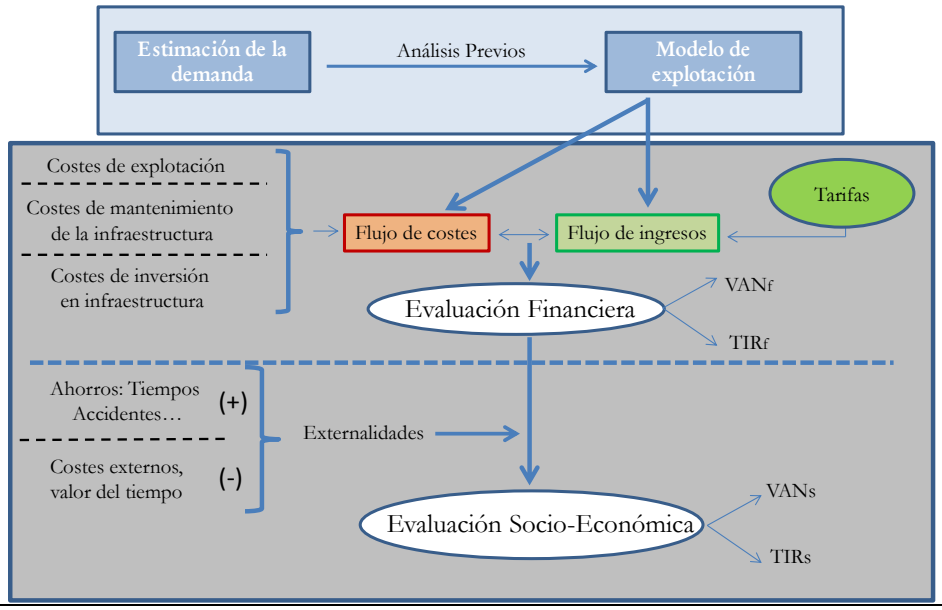


Figura 10. Proceso de evaluación de un proyecto correspondiente a una nueva línea ferroviaria.

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la figura anterior, las fases que contempla el análisis son las siguientes:

1) **Fase 1: Estimación de la demanda.** Caracterización de la demanda actual, modelización de la movilidad global y cálculo de las previsiones de tráfico de cada modo. Esta fase permitirá la estimación de los ingresos que generará el proyecto en el horizonte analizado.
2) **Fase 2: Plan de explotación**. Es necesario determinar un plan de explotación que se ajuste a las previsiones de demanda estimadas en la fase anterior.
3) **Fase 3: Estimación de los costes**. En esta fase se determinan los costes de inversión, costes de mantenimiento y costes de explotación para cada uno de los agentes a los que la nueva infraestructura afectará de una manera u otra.
4) **Fase 4: Evaluación financiera**. Conocidos los flujos de caja se llevará a cabo una evaluación financiera conjunta estimando una serie de indicadores (VAN_f, TIR_f…)
5) **Fase 5: Monetización de las externalidades**. En esta fase se cuantificará los costes externos y se estimarán los ahorros o costes obtenidos por el proyecto.
6) **Fase 6: Evaluación económica en términos monetarios**. Consiste en la evaluación socio-económica para el conjunto de sistema mediante una serie de indicadores económicos (VANs y TIRs).

Pero antes de profundizar en la caracterización y cuantificación de las diferentes fases, que son las que realmente permiten al planificador obtener conclusiones sobre la viabilidad de la nueva infraestructura, se pone el foco en dos términos que en ocasiones provocan confusión; estos son: (i) análisis financiero de un proyecto y (ii) análisis socio-económico.

1.2.1.1.1 Análisis financiero

Un análisis financiero consiste básicamente en la comparación de los ingresos y los costes generados durante la vida del proyecto. En definitiva, un análisis financiero trata de estimar el flujo de caja (diferencia entre ingresos y costes de inversión, mantenimiento, explotación…) para cada agente ámbito de análisis o para el conjunto de entidades vinculadas al proyecto, con el objetivo de determinar la capacidad de autofinanciación que tiene la inversión realizada.

Como el análisis se basa en la comparación de los ingresos y los costes que generará el nuevo proyecto y este flujo de caja es diferente y depende de la entidad sobre la que se está haciendo el análisis, puede darse el caso que el mismo proyecto sea financieramente rentable para determinados agentes, mientras que para otros la inversión no lo sea.
El procedimiento para evaluar la rentabilidad financiera de un determinado proyecto es el mismo, sea cual sea la entidad a la que se le evalúa, lo que sí es diferente son los datos de entrada (inputs) que alimentarán al modelo. A continuación, se representa gráficamente (Figura 11) el procedimiento empleado para el cálculo del VAN financiero conjunto, análisis que se realizará en esta tesis.

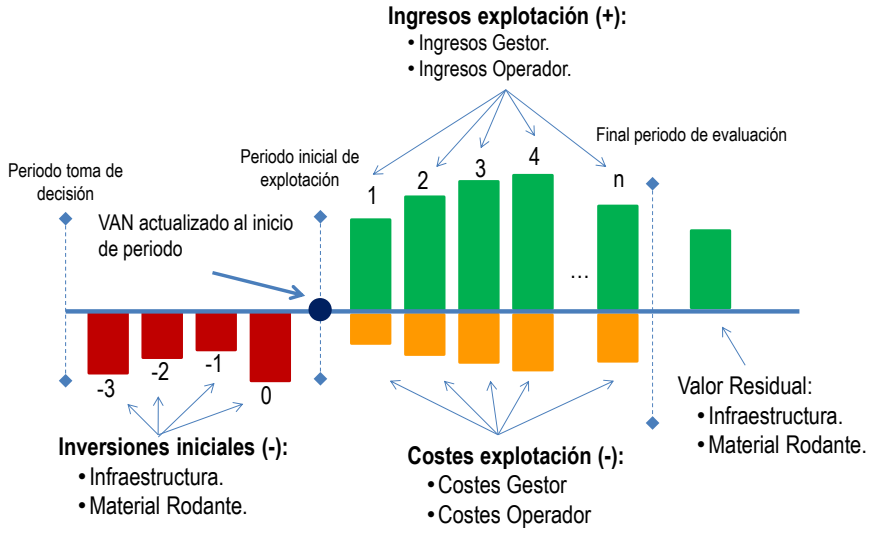


Figura 11. Evaluación financiera teniendo en cuenta el flujo neto de caja para el conjunto (gestor y operador).

Fuente: Elaboración propia.

Los indicadores de rentabilidad que finalmente revelan si es rentable financieramente el proyecto son:

- Valor Actual Neto (VAN_f) de los flujos de caja que se generan a lo largo del período de evaluación. La fórmula empleada para el cálculo del VAN_f es la siguiente:

$$VAN_{f_{T0}} = -\left[I_{T0} \times (1+r)^{(T_0-T_{0+s})}\right]_{t=T_{0-s}} - \cdots - \left[(I_{T0}+FC)_{T_0} \times (1+r)^0\right]_{t=T_0} + \left[FC_{T_0+1} \times (1+r)^{-1}\right]_{t=T_{0+1}} + \cdots + \left[(FC+VR)_{T_{0+n}} \times (1+r)^{(T_0-T_{0-n})}\right]_{t=T_{0+n}} \quad (1.1)$$

- Tasa Interna de Retorno (TIR). Este indicador permite obtener el valor de la tasa de descuento (r), cuando el VAN alcanza el valor cero y, por lo tanto, es la tasa de descuento necesaria para considerar el proyecto rentable.

$$VAN_{f_{T0}} = \sum_{t=1}^{n} \frac{FC}{(1+TIR)^t} - I = 0 \quad (1.2)$$

Donde:

- *VAN_{fT0}: valor actual neto financiero del proyecto (€).*
- *TIR: tasa interna de retorno.*
- *I_{T0}: inversiones iniciales (€).*
- *FC: flujos de caja (€).*

- *VR: valor residual del proyecto (€).*
- *t: período/año; s: períodos transcurridos entre que se inicia la construcción y se inicia la explotación.*
- *n: período transcurrido desde el inicio de la explotación hasta final de evaluación.*
- *r: tasa de descuento financiera.*
- *$(1+r)^{(T_0-t)}$: factor de descuento para el valor de r en el período t.*

Antes de definir y exponer la metodología de una evaluación económica es necesario explicar dos de los parámetros que alimentan el análisis financiero y que influyen decisivamente en la rentabilidad financiera del proyecto.

1.2.1.1.2 Periodo de evaluación

El periodo de evaluación (n), es un parámetro que depende principalmente del planificador, aunque desde un punto de vista teórico debe de estar vinculado con la vida útil de los diferentes elementos que componen la infraestructura ferroviaria. Periodos elevados suponen incluir grandes incertidumbres en el modelo, pues se evalúan ingresos y costes para un horizonte difícil de prever con demasiadas incertidumbres. Mientras que periodos de evaluación bajos supone no contemplar posibles ingresos y costes que el proyecto puede proporcionar durante su vida útil.

De acuerdo las recomendaciones proporcionadas por la (European Commission, 2014), el periodo de evaluación a incluir en proyectos ferroviario debe de ser 30 años (véase Tabla 3).

Tabla 3. Periodo de evaluación recomendado por la Comisión Europea para diferentes tipos de proyectos.

Proyectos por sector	años
Energía	25
Agua y medioambiente	30
Ferrocarriles	30
Carreteras	25
Puertos y Aeropuertos	25
Telecomunicaciones	15
Industria	10
Otros Servicios	15

Fuente: (European Commission, 2014)

1.2.1.1.3 Tasa de descuento financiera

Un aspecto muy relevante y a tener en cuenta, es que generalmente las evaluaciones financieras se realizan a precios constantes para un año determinado (habitualmente año en el que se inicia la explotación).

Al agregar los flujos de caja que se producen en diferentes años y diferentes al año en el que se inicia la explotación, debe tenerse en cuenta el valor temporal del dinero. Por ello, los flujos de caja futuros deben de ser actualizados; esta actualización suele realizarse por medio de un factor de descuento en el tiempo cuya magnitud se determina con la tasa de descuento (r).

Esta tasa de descuento ha de ser reflejo del coste de oportunidad del capital para el inversor, que puede entenderse como el lucro cesante con el mejor proyecto alternativo.

La Comisión Europea recomienda que se utilice una tasa de descuento financiero del 5% en términos reales como punto de referencia indicativo (para los proyectos de inversión pública cofinanciados por los Fondos). No obstante, pueden justificarse valores que se aparten de ese 5% por las razones siguientes:

- Las condiciones macroeconómicas específicas del país.
- La naturaleza del inversor; por ejemplo, la tasa de descuento puede ser mayor para proyectos de asociación público-privada, debido a que el coste de oportunidad del capital puede aumentar en este tipo de asociación.

Sin embargo, es de vital importancia que haya coherencia entre las tasas de descuento empleadas para proyectos similares en la misma región o el mismo país, pues las comparaciones entre proyectos deberías ser homogéneas. En esta tesis se empleará la recomendada por la Comisión Europea (5%).

1.2.1.1.4 Análisis económico o análisis socio-económico

A diferencia del análisis financiero, en un análisis económico, además de estimar los ingresos y costes, se cuantifican también los beneficios y los costes sociales que puede aportar un determinado proyecto, es decir este tipo de evaluación tiene en cuenta el impacto del proyecto sobre el bienestar económico.

Puede afirmarse que el procedimiento es el mismo que en el caso anterior, pero los parámetros empleados para estimar la rentabilidad económica difieren con los parámetros utilizados en una evaluación financiera.

A continuación se muestra el procedimiento que debe de llevarse a cabo en una evaluación económica conjunta en un proyecto ferroviario y los parámetros que alimentan a este análisis (Figura 12).

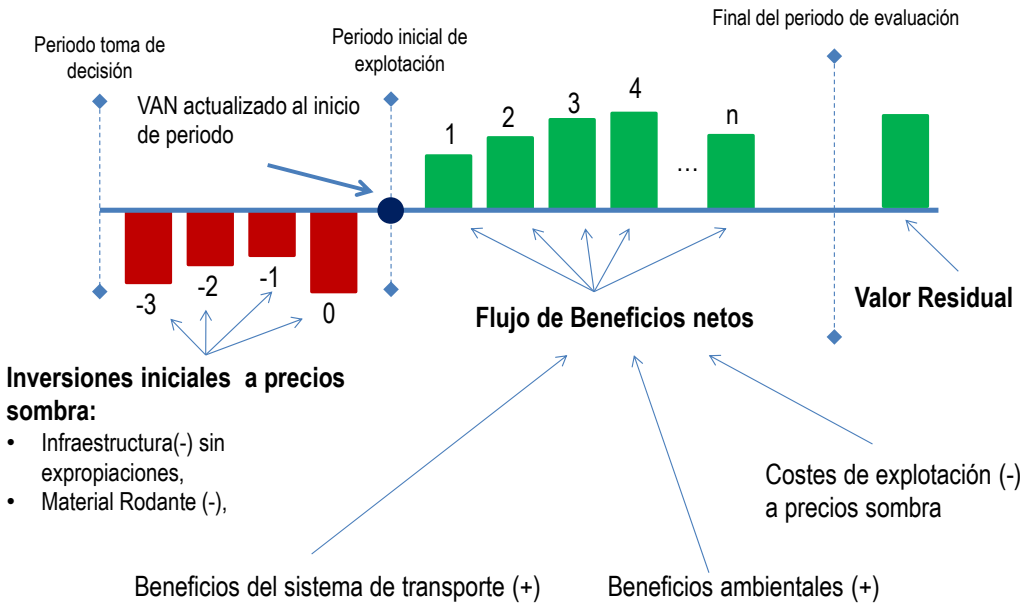


Figura 12. Evaluación socio-económica de los proyectos de infraestructuras ferroviarias

Fuente: Elaboración propia

Se observa las siguientes diferencias con respecto a una evaluación financiera:

- Los precios y las tarifas son convertidas a precios sombra para reflejar el coste de oportunidad social.
- Los beneficios tienen en cuenta los ahorros en costes externos (reducción de emisiones de CO_2, reducción de la accidentabilidad, …)

Los indicadores de rentabilidad aplicados son los mismos que en el caso de la evaluación financiera VAN y TIR (ecuación (1. 1) y (1. 2)). Además, el periodo de evaluación también es el mismo (30 años), sin embargo, la tasa de descuento empleada difiere de la considerada en los análisis financieros.

1.2.1.1.5 Tasa de descuento social en la evaluación socio-económica

En proyectos de inversión en infraestructuras de transporte, como es el caso de infraestructuras ferroviarias, el valor de esta tasa de descuento es especialmente importante para la "rentabilidad" del proyecto, pues los beneficios sociales suelen crecer bastante a lo largo de la evaluación del proyecto (en relación a la evolución de la demanda, PIB, …) y, por lo tanto, suelen ser bastante más elevados al final del proyecto.

La tasa de descuento aplicada, según sea menor o mayor, implica que los beneficios sociales, estimados dentro del periodo de evaluación, tengan una mayor o menor valoración en referencia a los beneficios actuales (año en el que se realiza el análisis).

Así, por ejemplo, la valoración de cada "unidad" de beneficio social futuro (año final) en relación a las "unidades" del beneficio/coste social actual (año inicial) serían menor para tasas altas (tasas en torno a 6% o 7% significa valorar los beneficios futuros entre un 25%-33% de los beneficios/costes actuales) que para tasa relativamente bajas (tasas de descuento algo inferiores al 4% suponen que los beneficios sean valorados en la mitad que los actuales).

La fijación de esta tasa de descuento, no es una cuestión sencilla, de hecho, el enfoque más extendido es que debe ser la autoridad económica (o administrativa en general) la que señale el valor de la tasa de descuento social.

Teniendo en cuenta el elevado horizonte de evaluación de los proyectos de transporte, la UE propone aplicar una tasa de descuento social del 5,5% para países de cohesión y 3% para el resto (European Commision, 2008). En esta tesis se empleará un valor de 5,5%.

1.2.1.1.6 Interpretación de los resultados de un ACB

Dependiendo del resultado que se obtenga tras estimar los indicadores de rentabilidad (VAN financiero y/o VAN social así como el TIR), y la interpretación que haga de los mismos, el planificador dispondrá de una herramienta que ayuda a la toma de decisiones, que básicamente será construir o no la infraestructura o escoger entre varias infraestructuras alternativas.

A modo de ejemplo, se exponen las siguientes conclusiones que se deberían alcanzar, tras estimar el VAN:

- si el VAN es igual a cero, los ingresos del proyecto son iguales a sus costes;
- si se obtiene un VAN menor a cero, los costes del proyecto son mayores a sus ingresos y, por lo tanto, se aconseja rechazar el proyecto, y;
- si se obtiene un VAN mayor a cero, se debería de aceptar el proyecto pues los ingresos que aporta son mayores que los costes.

Además, si la suma de los ingresos netos generados a lo largo del periodo de evaluación es positiva, es necesario el cálculo de otros indicadores de rentabilidad como:

- Tasa interna de retorno (TIR). En este caso, según (De Rus, 2001) cuanto más rentable sea el proyecto mayor será el rango de valores de la tasa de descuento (r) compatibles con un VAN positivo, por lo que puede afirmarse que a mayor TIR mayor rentabilidad.

En cambio, si la suma de los ingresos netos generados a lo largo del periodo de evaluación es negativa, es necesario el cálculo del déficit de capital y su porcentaje sobre la inversión.

- Déficit de capital= -VAN de los flujos netos de caja.
- Déficit de capital (%) = -100*VAN/Inversión actualizada al periodo de inicio de la explotación.

En este caso será el evaluador de la infraestructura el que decidirá el valor y porcentaje de déficit que está dispuesto a asumir si definitivamente decide abordar el proyecto.

Es importante destacar que, la decisión final depende de muchos factores, muchos de ellos exógenos al propio proyecto, pero los indicadores de rentabilidad aquí expuestos son una buena herramienta sobre la que apoyar una decisión tan compleja como es la de decidir si construir una infraestructura o no.

1.2.2 Relación entre el VAN y la velocidad

Si se profundiza en aquellos aspectos positivos de una infraestructura ferroviaria, puede afirmarse que el valor que genera el proyecto reside en hacer posible la circulación de trenes de forma segura, eficiente y ordenada, lo que se traduce en la obtención de unos ingresos y en unos beneficios sociales.

Este valor, que puede asociarse al valor de la infraestructura, está condicionado por la "cantidad" de transporte, es decir por la capacidad de circulación (número de trenes) y por la capacidad del material rodante (plazas).

Capacidad de transporte (Nº viajeros/hora) = Capacidad de circulación (Nº trenes/hora) x Capacidad del tren (Nº viajeros/tren)	(1. 3)

Pero también, este valor está condicionado por la "calidad" del transporte, es decir, que el transporte sea atractivo (útil para los clientes) y poco costoso. En definitiva, que sea eficiente, pues de nada sirve un aumento en la capacidad de circulación o en la capacidad de los trenes si su explotación conjunta es ineficiente. Por lo tanto, aparece un nuevo componente que define el valor de la infraestructura y que hasta ahora no se había abordado en otros proyectos, este nuevo parámetro es lo que aquí se denomina "prestaciones".

Valor de la infraestructura = Capacidad de transporte (viajeros/hora) x Prestaciones (1 / tiempo de viaje)	(1. 4)

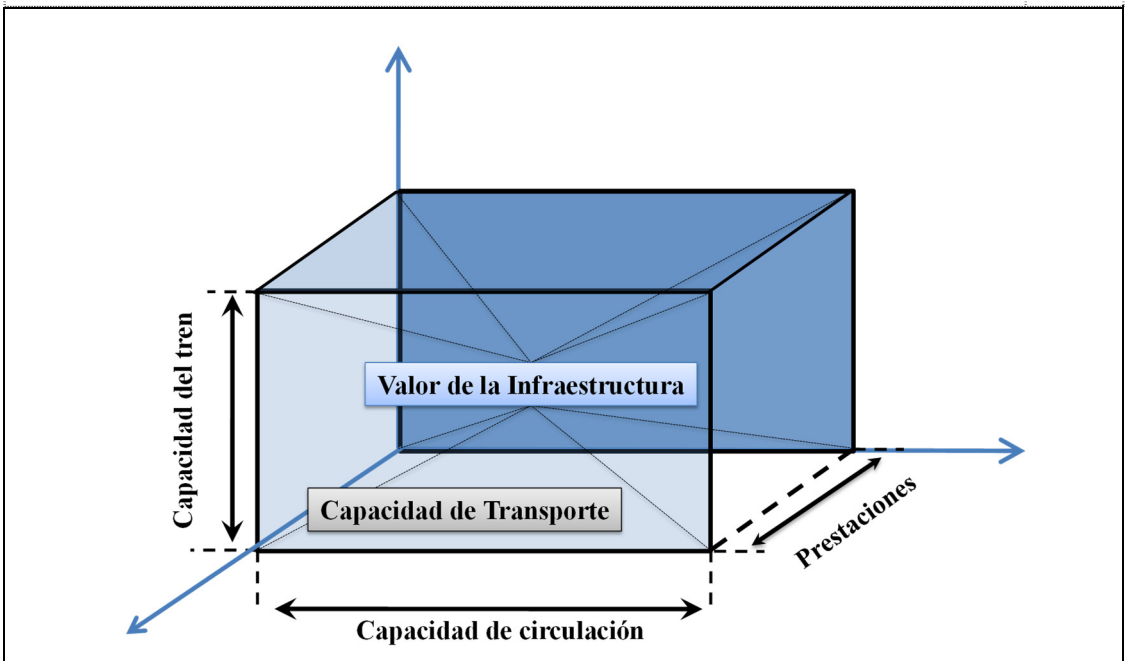


Figura 13. Parámetros de los que depende el "valor de la infraestructura".

Fuente: Elaboración propia.

Introducir el concepto "prestaciones" en el cálculo del valor de la infraestructura le asigna una nueva dimensión que permite relacionar o introducir en la ecuación las posibilidades de transporte, lo atractivo que puede ser o llegar a ser y la utilidad del mismo, es decir el beneficio para la sociedad.

Por ello, una mejora en los ingresos puede deberse a una mejora en la capacidad de transporte (mayor número de plazas y/o mayor número de surcos) o a un aumento en la calidad del servicio, a partir de una mejora en las prestaciones. Por ejemplo, una mayor velocidad permite una reducción del tiempo de viaje y, como consecuencia, una mayor captación de tráfico de otros modos de transporte (avión y carretera) y, por lo tanto, un incremento en los ingresos del operador, como se demostrará en el capítulo 2.5.1.

Si el análisis se centra ahora en la relación funcional entre la velocidad y los costes, puede afirmarse que cuanto mayor sea ésta (velocidad), mayor será la inversión que debe realizarse. Esta afirmación se analiza en profundidad en el capítulo 3, ya que este incremento de la inversión no es proporcional e igual en todos los casos, pues existen otros parámetros que afectan al coste (orografía, relieve, densidad de población,…) y, por lo tanto, estimar la relación entre inversión y velocidad máxima no es una cuestión nada sencilla.

En cuanto a los costes de explotación, también puede afirmarse que la velocidad influye en ellos decisivamente; ya sea para reducirlos (todos aquellos que dependen del tiempo de viaje), o para aumentarlos (aquellos ligados a la operación).

Teniendo en cuenta que el flujo neto de caja es el resultado de restar los ingresos menos los costes, siempre que se mejoren los ingresos (mejorando el atractivo del transporte) y se mantengan o se reduzcan los costes de explotación, se conseguirá mejorar el VAN de la infraestructura, es decir, su valor.

Puede afirmarse entonces que sí existe una relación directa entre el valor financiero y económico de una infraestructura (VAN) y el valor teórico de la misma, ya que la mejora de determinados parámetros técnicos (variables gestionables) permite una mejora en su valor económico (mayores beneficios) como consecuencia de un incremento en la "calidad" o atractivo del transporte.

De esta manera se demuestra cómo el VAN está relacionado con la velocidad, no sólo en lo relativo a los costes, sino también en los ingresos y, por tanto, se puede afirmar que para cada velocidad se obtendrá una rentabilidad diferente, lo que brinda la posibilidad de relacionar velocidad y rentabilidad de una infraestructura.

1.3 RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD Y EL TIEMPO DE VIAJE

Como bien es conocido, la velocidad de un objeto en movimiento, por ejemplo un tren, se calcula como el cociente entre el desplazamiento (distancia recorrida) y el tiempo empleado para recorrer esa distancia.

En el transporte de viajeros es deseable que éstos recorran la distancia de viaje en el menor tiempo posible, ya que así lo hace más atractivo y útil. Para ello, se necesitan velocidades elevadas que pueden conseguirse de diversas formas influyendo, en todas ellas, el diseño de la infraestructura y el vehículo.

Se ha partido de la hipótesis de que un incremento de la velocidad permitida por la infraestructura supone, normalmente, una mayor inversión y quizá incluso un mayor coste de mantenimiento de ésta; pero, por el contrario, en la medida en que contribuye a reducir el tiempo de viaje, produce mayores ingresos tarifarios, ahorros de tiempo y mayores externalidades. Si así fuese, cada velocidad de diseño de la infraestructura tendría una contribución diferente para conseguir los objetivos deseados con la construcción de la línea y, por ello, puede ser objeto de optimización.

En este apartado se analizan los diversos aspectos relacionados con la velocidad y el tiempo de viaje. El objetivo es definir y explicar cómo se traslada la velocidad de diseño de la infraestructura a la velocidad media (comercial) del tren y ésta al tiempo de viaje de los pasajeros, variable que influye de forma determinante en la demanda y, por lo tanto, en los ingresos. Pero antes de profundizar en la relación velocidad-tiempo de

viaje, se repasa la evolución de la velocidad desde la aparición del ferrocarril hasta la actualidad.

1.3.1 Evolución histórica de las velocidades en el ferrocarril

Desde la aparición del ferrocarril hasta la actualidad, la búsqueda de mejores velocidades en el sistema rueda carril ha sido una constante. Ya desde sus comienzos en la línea ferroviaria Stockton-Darlington, inaugurada en 1825 donde la locomotora de vapor alcanzó los 24km/h[3] y, posteriormente, en el concurso Rainhill 1829[4], donde la locomotora Rocket alcanzó los 38km/h (esta locomotora consiguió una velocidad media de 28km/h y una máxima de 46km/h), el incremento de la velocidad en el sistema rueda carril supuso un gran reto.

Durante la segunda mitad del siglo XIX y comienzos del siglo XX, el incremento de las velocidades proviene, mayoritariamente, de la lucha y la rivalidad de las compañías ferroviarias, más que por la competencia con otros modos de transporte. Este hecho explica los habituales concursos de velocidad que se venían celebrando y que servían a los Estados para mostrar su poderío tecnológico. La competición por alcanzar la máxima velocidad, principalmente entre Estados Unidos y Europa, era tan feroz en aquellos años que se llegó a escribir: *"La velocidad llegó a convertirse en una obsesión para ciertas compañías competidoras en trayectos como Nueva York-Chicago y Londres-Aberdeen"* según recoge (García Álvarez, 1986). Las velocidades comerciales más elevadas que se alcanzaron por aquel entonces y que cabe reseñar, son las conseguidas en el año 1895 entre Crewe y Carliste (226 kilómetros a 107km/h) y entre Peth y Aberdeen (144,5 kilómetros, también a 107km/h)". Años más tarde (1906), en Inglaterra, llegaron a lograrse velocidades comerciales de 126,6 km/h sobre 200 kilómetros en servicio regular.

Tras estas primeras décadas del siglo XX en las que la velocidad era utilizada como propaganda del poder tecnológico y económico de los Estados, se pasó a un refinamiento de las nuevas tecnologías que fueron apareciendo (tracción eléctrica y combustión interna). Durante estos años empezaron a surgir locomotoras de tracción eléctrica y de combustión interna que peleaban por la hegemonía que hasta entonces había tenido la tracción de vapor.

1.3.1.1 Las postguerras

El declive del sector ferroviario en esta época fue debido principalmente a dos causas: (i) durante la Segunda Guerra Mundial se produjo un empobrecimiento de los Estados, que apostaban los escasos recursos que disponían a la inversión y el conocimiento tecnológico del sector aéreo; y (ii) que en aquellos años se produce también una fuerte inversión en el transporte por carretera, no solo en el desarrollo de nuevos vehículos sino también en lo que se refiere a obra pública.

Es la primera vez que el ferrocarril se enfrenta a otros modos de transporte que tecnológicamente empiezan a estar más avanzados; vehículos más veloces y mejores trazados, lo que ocasionó la pérdida de hegemonía de este sector. Este hecho lleva a que en los años 60 comiencen a desarrollarse nuevos procedimientos que pretenden mitigar esta pérdida de mercado. Una de las medidas que se llevó a cabo fue la de elevar las velocidades comerciales en la totalidad de las líneas en servicio. Para ello,

[3] Como cita (Cabanes Martín & González Sanz, 2009) las velocidades que era capaz de alcanzar este sistema en aquellos años suponían una auténtica revolución, ya que las velocidades alcanzadas por aquel entonces no pasaban de los 15 km/h limitadas, claro está, por la tracción animal.

[4] Para más información véase (García Álvarez, 1986). La velocidad, Monografías ferroviarias, nº1 ed GIRE, Renfe.

como recoge (García Álvarez, Barrón de Angoiti, Puente Domínguez, & Martín Cañizares. Mª.P, 2009), se plantean tres enfoques diferentes:

1. Elevación de las velocidades máximas en líneas convencionales.
2. Elevación de la velocidad en los pasos por curva gracias al desarrollo de material móvil nuevo (trenes con cajas inclinables).
3. Y, por último, la construcción de nuevas líneas exclusivas para alta velocidad.

La elección de uno u otro enfoque depende de cada país, de decisiones políticas y de criterios económicos. En el caso de España, que se especificará en el siguiente punto, se abordan los tres enfoques, pero en diferentes épocas.

La Figura 14 muestra la evolución de las velocidades comerciales a lo largo de los últimos cuarenta años en diferentes países, así como las diferencias existentes entre unos y otros.

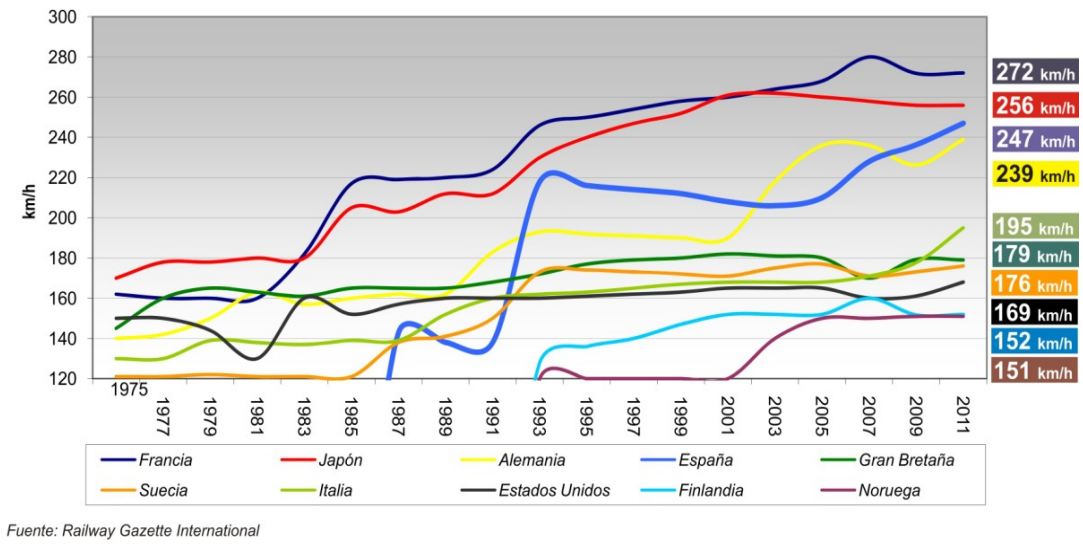


Figura 14. Evolución de la velocidad media en diferentes países.

Fuente Railway Gazette International.

1.3.1.2 La evolución de la velocidad en España

La velocidad, tanto comercial como máxima en España, siempre ha sido una cuenta pendiente. Puede observarse en la Figura 14 cómo hasta el año 1992, cuando entra en servicio la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla, la velocidad media en España resulta ser inferior a la mayoría de los países. Esto es debido, en parte, a las dificultades orográficas que presenta el relieve español, a las dificultades económicas vividas durante la postguerra y a la baja inversión realizada en este sector.

1.3.1.2.1 Segunda mitad del siglo XIX y primera mitad del siglo XX

Ya en el año 1866, la red ferroviaria española contaba con aproximadamente 5.000 km de líneas ferroviarias que, mayoritariamente, están hoy en día en servicio con prestaciones similares a las que se encontraban siglo y medio antes. En cuanto al material rodante, los primeros trenes circulaban a unas velocidades máximas de 30km/h, eran los llamados “correos” y los “mixtos”. Estas velocidades se incrementaron (40km/h) con la aparición de los expresos a finales de siglo XIX.

En general, desde la puesta en servicio de las diferentes rutas hasta bien entrados los años 50 siglo del XX, la velocidad comercial no varió excesivamente (entre 30km/h y 60km/h), como se recoge en (Cabanes Martín & González Sanz, 2009).

A finales del siglo XIX, la conexión entre Madrid y las regiones periféricas presentaba un tiempo de viaje que rondaba entre las veinte y veinticinco horas. En los sucesivos años, primera mitad del siglo, no se producen grandes cambios ni en el material ni en la infraestructura por lo que el incremento de las velocidades comerciales no fue muy acusado, de ahí que el tiempo entre el centro y los extremos peninsulares rondara entre las diez y las diecisiete horas.

Cabe destacar en esta época la puesta en marcha, por parte de la Compañía del Norte, en 1936 unos meses antes de comenzar la guerra, del "rápido" número 13 Madrid-Hendaya que conseguía velocidades medias de 75km/h y alcanzaba, en determinados tramos de la línea, velocidades máximas de 110km/h.

1.3.1.2.2 La velocidad en la postguerra

En los primeros años posteriores a la guerra, la situación no cambió demasiado: la velocidad máxima de las locomotoras de vapor se mantenían en 100km/h; pero, fue bien entrados los años cuarenta cuando se dio un impulso a determinadas líneas ferroviarias que presentaban diseños de los años 20 (líneas como la de Soria a Castejón, Cuenca a Valencia, Zamora a Coruña, Lleida a Pobla de Segur o de Madrid a Burgos que permiten actualmente velocidades máximas del orden de 110km/h), esto supuso reducir los tiempos de viaje desde el centro a los extremos de la red en unas 5 horas, lo que suponía tiempos de viaje de aproximadamente 13 horas.

Es importante mencionar que durante la década de los 40 la velocidad comercial en máquinas de vapor y eléctricas rondaba los 100km/h, mientras que con unidades diésel se conseguían velocidades algo superiores 110km/h.

En los años 50 se pusieron en marcha una serie de medidas para mejorar los tiempos de viaje y así intentar recuperar la cuota de mercado que se estaba desplazando a otros modos de transporte. Se actuó sobre la infraestructura, se renovaron traviesas, se reforzaron puentes… Sin embargo, estas medidas no supusieron ahorros considerables de tiempo, ya que hubo muy pocas rectificaciones de trazados. La mayor parte de los esfuerzos para reducir los tiempos de viaje se centraron en la mejora de la potencia de las locomotoras, entrando en servicio nuevo material diésel como, por ejemplo, el Talgo II, que permitía la explotación a 120km/h.

Lo más relevante de los años posteriores y de la década de los 60 fue la modernización del material móvil, citándose como relevante la aparición del Talgo III (1964) de tracción diésel (remolcado por las locomotoras 2000T) capaz de circular a velocidades de 140km/h y en el caso de la tracción eléctrica aparecieron las máquinas bitensión de la serie 10.000 capaces de alcanzar los 120km/h, y la serie 900, capaz de circular a 130km/h.

En la década de los 70 y principios de los 80, se mantuvo la tendencia anterior que consistía en mejorar el material móvil. La mayor parte de los esfuerzos se orientaron en incrementar la velocidad de paso curva, apareciendo así el prototipo de electrotrén basculante y, posteriormente, el Talgo Pendular (1980) que reducía el tiempo de viaje entre un 8 y un 10%.

En 1986 se produce un hito importante; la elevación de las velocidades máximas a 160km/h en la mayoría de los kilómetros de red. Pero, esta mejora, no se debía sólo a la mejora del material rodante (mayores aceleraciones laterales sin compensar, lo que suponía mayores velocidades en curva) sino que también suponía una serie de intervenciones en la infraestructura (mayor distancia entre señales, cambio de

sujeciones, reducción de descentramientos del hilo de contacto…). Con estas medidas se consiguió, como recoge (García Álvarez et al., 2009), que más del 69% de la longitud de las líneas quedase adaptado para poder circular a más de 140km/h, lo que suponía un ahorro grande en los tiempos de viaje en la mayor parte de los trayectos de la red.

1.3.1.2.3 Los años noventa

Es entre los años 1991 y 1992 cuando se decide mejorar la velocidad de los trenes y actuar sobre la infraestructura con obras de pequeña importancia. Es en esta época en la que también se crea un grupo de expertos que tratan de definir una serie de medidas que permitan el incremento de velocidades; entre ellas, se decide elevar las velocidades mínimas para así mejorar las velocidades comerciales. Todos estos cambios llevan a que, entre los años 1996 y 1997, se eleven las velocidades máximas en una serie de tramos de la red a 180km/h.

A partir de 1997 se realizaron trabajos muy importantes en la infraestructura y en el material móvil para incrementar las velocidades máximas hasta 200km/h. Como ejemplo se puede citar la puesta en servicio del Euromed en 1997, el cual presenta características muy similares al servicio de alta velocidad Madrid-Sevilla. Otro caso relevante fue la entrada de trenes basculantes de la serie 490 en la línea Madrid-Valencia en 1999, que permitían velocidades máximas de 200km/h y, finalmente, cabe reseñar que desde 2004 circulan los trenes basculantes CAF de tecnología SIBI (series 594.1 y 598) que pueden alcanzar importantes aceleraciones laterales (de 1,8 m/s^2) en curvas, lo que les permite, en trazados sinuosos, reducir los tiempos de viaje entre un 10% y un 15%. Todas estas mejoras, llevan a que, en el año 2010, en unos 300 kilómetros de red convencional, sea posible circular a 200km/h.

Como hito realmente reseñable en los años 90, puede reseñarse la entrada en servicio, el 21 de abril de 1992, de la primera línea de alta velocidad en España, el AVE Madrid-Sevilla. Esto supuso un avance tecnológico inmenso que, entre otras muchas características que lo hacen peculiar, permitió un gran incremento de las velocidades máximas y comerciales (con velocidades máximas por encima de 250km/h) y por lo tanto, una importante reducción del tiempo de viaje. Tuvieron que pasar 11 años hasta que se pusieron en servicio más kilómetros de líneas de alta velocidad (Madrid-Lleida 10/10/2003). Fue a partir de este año (2003) cuando la expansión de la red de alta velocidad sufrió un mayor crecimiento[5], hasta alcanzar los 2.444,5 km en Enero de 2015.

Este nuevo concepto de ferrocarril creó no solo servicios de alta velocidad en largas distancias (AVE), sino que también generó la aparición de servicios de alta velocidad media distancia (Avant) y servicios de larga distancia que emplean parcialmente las líneas de alta velocidad para, posteriormente continuar por las líneas clásicas (Alvia), lo que suponía y supone una gran reducción de tiempos de viaje no solo en aquellas relaciones que disponían de infraestructura de alta velocidad, sino que también en un gran número de relaciones que aprovechaban parte de su recorrido por líneas de alta velocidad.

La Figura 15 hace un repaso de la evolución de las velocidades y de los tiempos de viaje en España desde comienzos del siglo XX hasta 2014, para las principales relaciones con origen en Madrid. En ella puede observarse cómo el tiempo entre el

[5] A partir del año 2003 comienza un periodo de expansión con la puesta en servicio de nuevos tramos: Madrid–Lleida (10/10/2003); Miraflores–Huesca (23/11/2003); La Sagra–Toledo (16/11/2005); Madrid–Valladolid (23/12/2007); Córdoba–Málaga (23/12/2007); Lleida–Barcelona (22/02/2008); Madrid–Valencia (18/12/2010); Orense-Santiago (10/12/2011); Barcelona–Frontera Francesa (8/01/2013) y Albacete-Alicante (18/06/2013).

centro y la periferia ha ido disminuyendo de manera homogénea, exceptuando aquellas relaciones con servicios de alta velocidad.

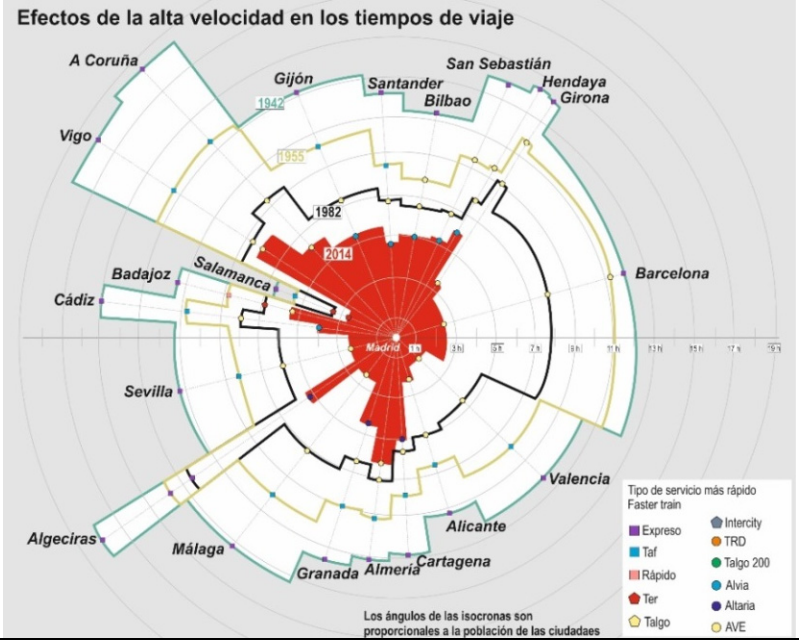


Figura 15. Evolución de los tiempos de viaje desde Madrid.

Fuente: Luis E. Mesa.

El descenso en los tiempos de viaje, observado en la figura anterior, lleva a pensar que en los sucesivos años continuará con su tendencia, pero ¿es realmente necesario aumentar la velocidad en todos los trayectos? Pregunta a la que dará respuesta la metodología propuesta en esta tesis.

1.3.2 La velocidad. Tipos

Antes de estudiar la influencia de la velocidad en la rentabilidad de proyectos ferroviarios, es indispensable definir y entender las diversas acepciones del término velocidad pues a lo largo de esta tesis se empleará en los diferentes significados que se puede presentar. Por ello, es necesario mostrar un glosario de términos y definiciones que clarifiquen este parámetro.

1.3.2.1 Velocidad máxima

La velocidad máxima puede referirse a:

- **Velocidad máxima del tren.** Se trata de la velocidad máxima que el tren puede alcanzar debido a sus características técnicas y a los esfuerzos dinámicos a los que está sometido cuando está en movimiento. Como establece la ETI[6] de material rodante en el artículo 4.2.8.1, la velocidad máxima a la que puede circular el tren es aquella a la que todavía será capaz de acelerar al menos con 0,05m/s^2. Esto es equivalente a aquella velocidad máxima que un vehículo puede mantener en una pendiente de 5mm/m.

[6] ETI: Especificación Técnica de Interoperabilidad. Decisión de la Comisión de 21 de febrero de 2008 sobre la especificación técnica de interoperabilidad del subsistema de material rodante del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad.

Gráficamente, la velocidad máxima queda determinada por la intersección entre la curva del esfuerzo tractor máximo y la resistencia al avance en una rampa de 5mm/m. Esta forma de determinar la velocidad máxima (como marca la ETI) lleva a casos curiosos. Puede ocurrir, y de hecho pasa muy a menudo, que un determinado tren dispone de diferentes velocidades máximas dependiendo de la tracción que emplee. Por ejemplo, el tren hibrido de Talgo de la serie 730 dispone de tres velocidades máximas diferentes dependiendo del tipo de tracción que utilice y del perfil de la vía en el que se encuentre (véase Figura 16).

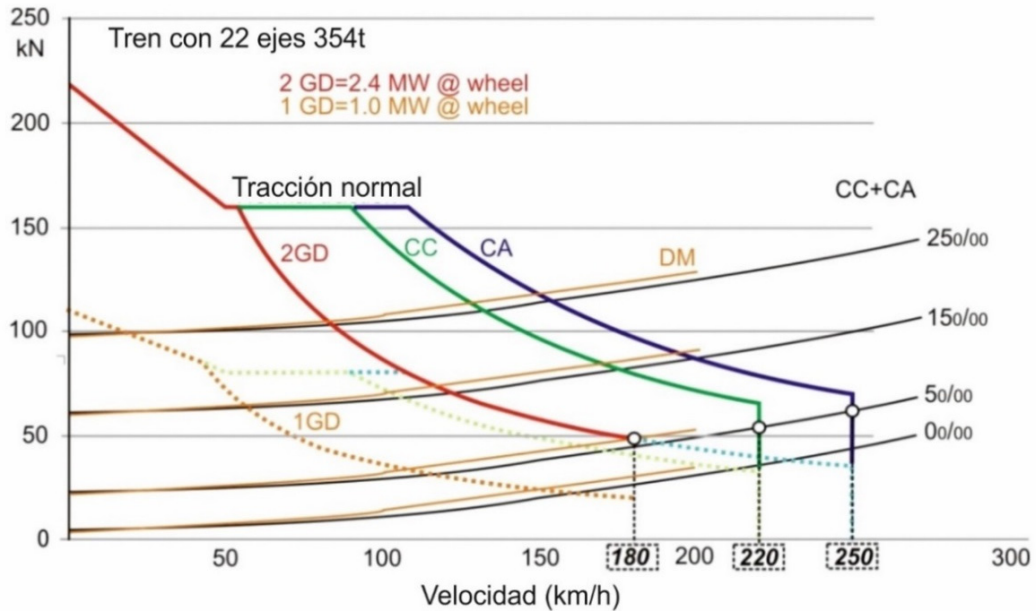


Figura 16. Curva característica del tren hibrido de la serie 730 de Talgo.

Fuente: Luis E. Mesa.

En este caso se observa, con mucha claridad las diferentes velocidades máximas que podría alcanzar según tipo de tracción (tracción eléctrica 25kV, 3kV o tracción diésel (GD)) y tipo de perfil de la vía.

- **Velocidad máxima por trazado.** Corresponde a la velocidad máxima a la que se permite circular debido al trazado en planta (curvas y peraltes). Esta velocidad máxima es independiente de la potencia de los trenes, pero si depende del tipo de basculación, es decir, la infraestructura establece velocidades máximas diferentes en curva según tipo de inclinación de la caja (normal, inclinables y basculantes) y, por lo tanto, la misma línea ferroviaria puede tener velocidades máximas diferentes en alguno de sus tramos.
  El gestor de la infraestructura ferroviario español recoge esta velocidad máxima por trazado para cada uno de los tramos de una línea, en un documento que se llama Cuadro de Velocidades Máximas (CVM). A continuación se muestra el CVM real de una línea de alta velocidad (Figura 17), donde se distingue las diferentes velocidades máximas de cada tramo.

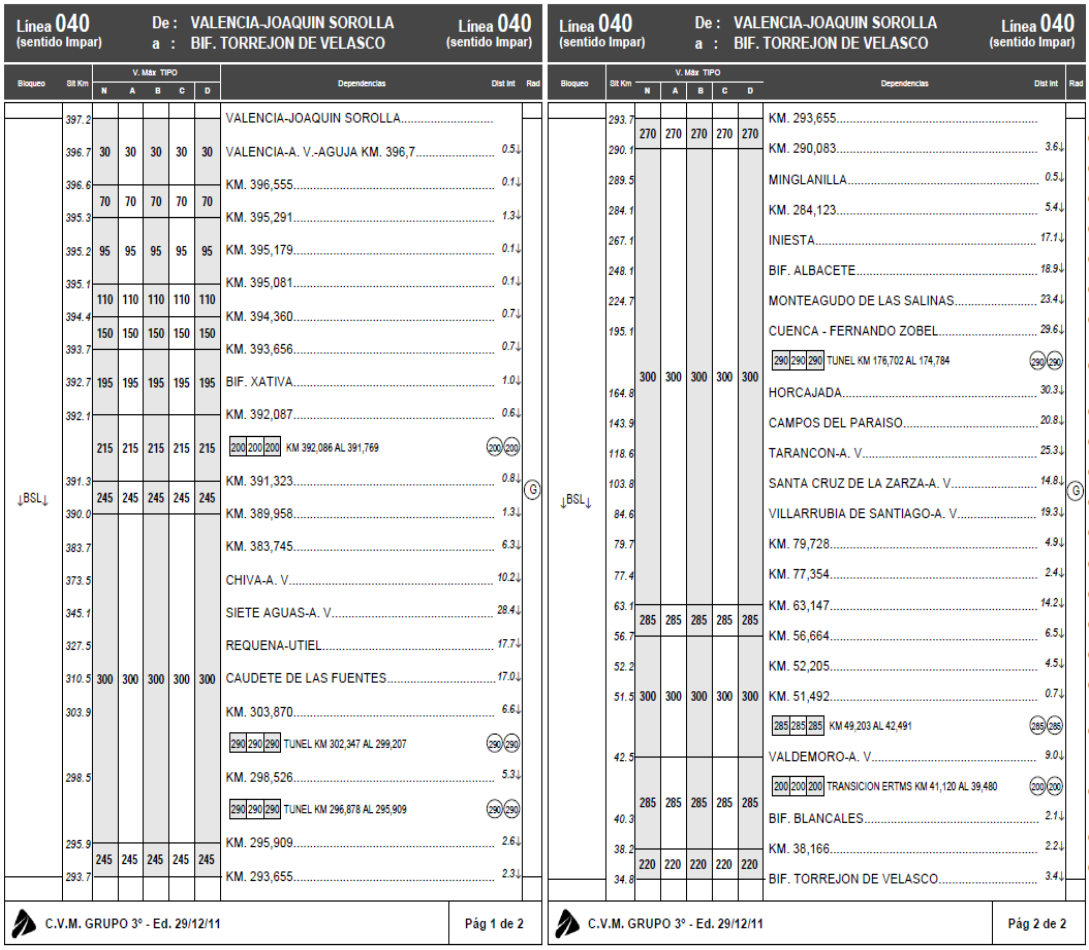


Figura 17. Cuadro de velocidades máximas para el tramo de la línea de AV Valencia-Bif. Torrejón de Velasco

Fuente: Adif.

- **Velocidad máxima por señalización.** Corresponde a la velocidad máxima que se permite circular debido al sistema de señalización implantado a bordo y al instalado en vía. Dependiendo de la tecnología que se instale tanto en la infraestructura como en los trenes, éstos pueden circular a una velocidad máxima o a otra, siempre y cuando ambos sean el mismo e incluso la misma versión del sistema de señalización.
- **Velocidad máxima combinada**. Se trata de la velocidad máxima que puede alcanzar el vehículo en un servicio comercial. Es posible que los vehículos puedan circular a una velocidad mayor (velocidad máxima del tren) gracias a que sus características técnicas y de diseño se lo permiten. También es posible que la línea presente un trazado que permita velocidades mayores (velocidad máxima por trazado) y, también es posible que la velocidad máxima sea menor que la velocidad máxima del tren y la velocidad máxima por trazado debido a que, por ejemplo, el sistema de señalización limite la velocidad máxima. Por lo tanto, la velocidad máxima se calcula como la mínima de la velocidad máxima del tren, la velocidad máxima por trazado y la velocidad máxima por señalización.

Es importante destacar aquí que, cuando se habla de velocidad máxima, no nos referimos a que la velocidad máxima sea la misma para toda la línea, es decir a una sola velocidad (a la mayor), sino que se trata de la velocidad máxima de cada tramo, teniendo en cuenta que existen diferentes velocidades máximas en una única línea debido a limitaciones temporales, a limitaciones permanentes, paso por estaciones, paso por curva…

1.3.2.2 Velocidad media estática

Es la media de la velocidad máxima de cada uno de los tramos de una determinada línea, ponderadas por su longitud. Una línea está formada por una serie de tramos los cuales tienen cada uno una velocidad máxima. La media de estas velocidades máximas determina la "velocidad media estática". Este es un parámetro muy importante en un proyecto ferroviario ya que, en ocasiones, la velocidad máxima por trazado lleva a confusiones y a malas interpretaciones, pues puede darse el caso de que una línea ferroviaria tenga un tramo pequeño de muy alta velocidad y el resto corresponda a velocidades más comunes en servicios convencionales. Por todo esto, no debería asociarse a una línea de alta velocidad sino más bien a una línea convencional o a una línea de velocidad alta.

A continuación, se muestran las velocidades medias estáticas de las principales líneas de alta velocidad españolas, donde pueden destacarse grandes diferencias entre ellas.

Tabla 4. Velocidad máxima por trazado y velocidad media estática en diferentes líneas de alta velocidad españolas.

	Vel. Max por trazado *(km/h)*	Vel. Max Combinada *(km/h)*	V. Media Estática *(km/h)*
Madrid-Valladolid	350	300	278,5
Madrid Barcelona	350	310	291
Madrid-Sevilla	300	300	247,1
Madrid-Málaga	350	300	261,1
Madrid-Valencia	350	300	288,7
Orense-Santiago	350	300	285,7

Fuente: Elaboración propia.

Puede afirmarse que existen diferentes combinaciones de velocidades máximas que determinan la misma velocidad media estática (véase Figura 18), pero no todas ellas afectan de la misma manera al coste de inversión ni a la velocidad comercial.

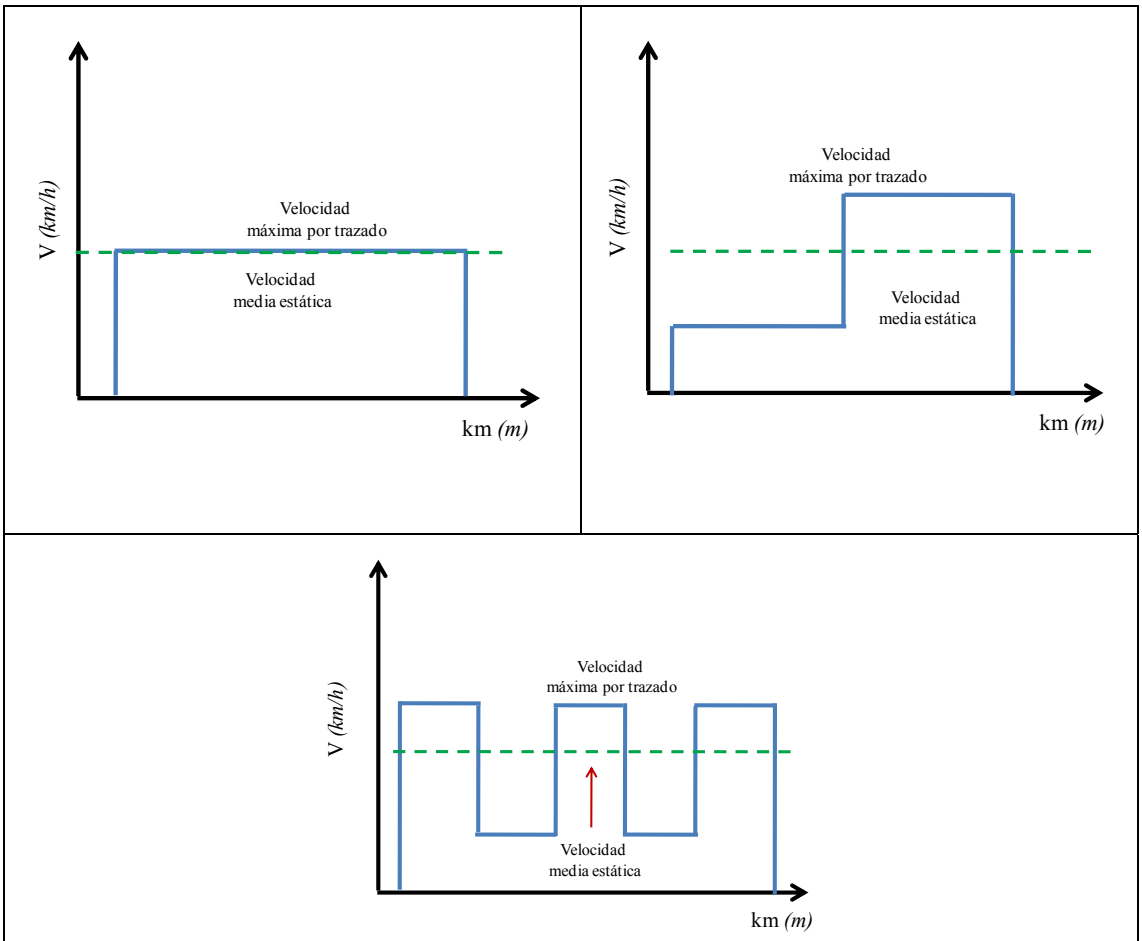


Figura 18. Combinaciones de velocidades máximas que aportan la misma velocidad media estática.

Fuente: Elaboración propia

1.3.2.3 Velocidad comercial

Es la que se obtiene dividiendo la distancia (longitud de la línea) entre el tiempo comercial empleado para recorrerla, incluyendo el tiempo de parada en estaciones intermedias. La velocidad comercial tiene en cuenta los siguientes factores:

- velocidad máxima de cada tramo,
- el tiempo de parada en las estaciones intermedias,
- limitaciones temporales de velocidad,
- las aceleraciones y deceleraciones propias del tren,
- limitaciones de velocidad debidas a las rampas y a la potencia y
- los márgenes impuestos por el gestor de la infraestructura.

La velocidad comercial presenta una estrecha relación con la velocidad media estática, la diferencia entre una y otra reside principalmente en la dinámica y cinemática del tren, es decir el tren no acelera ni frena instantáneamente y, por lo tanto, cuanto menor homogeneidad presente el perfil de velocidades máximas, mayor diferencia existirá entre la velocidad comercial y velocidad media estática (véase Figura 19). Además, el tiempo de paradas, los márgenes y las limitaciones diferencian una de otra.

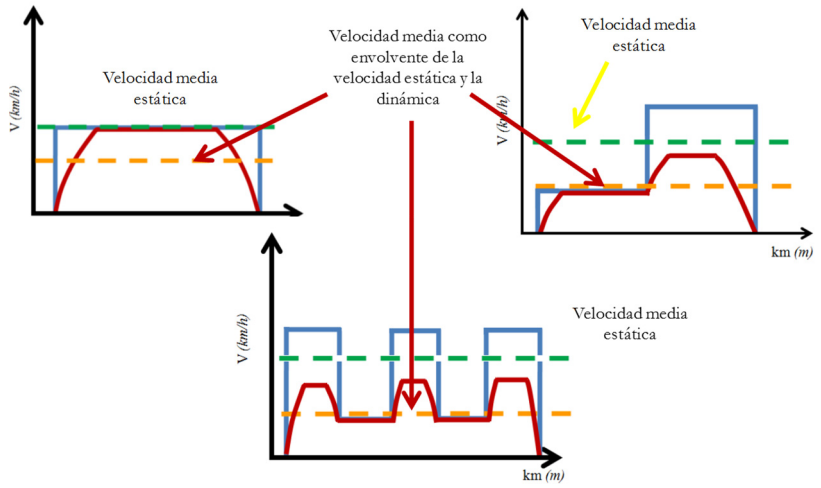


Figura 19. Velocidades comerciales para distintas velocidades máximas por trazado

Fuente: Elaboración propia.

Como se ha mencionado anteriormente, existe una clara relación entre la velocidad media estática y la velocidad comercial, pero es importante destacar que también existe una estrecha relación entre la velocidad máxima combinada (velocidad máxima por trazado, velocidad máxima por señalización y velocidad máxima del tren). Esta relación se representa gráficamente en el siguiente esquema (Figura 20).

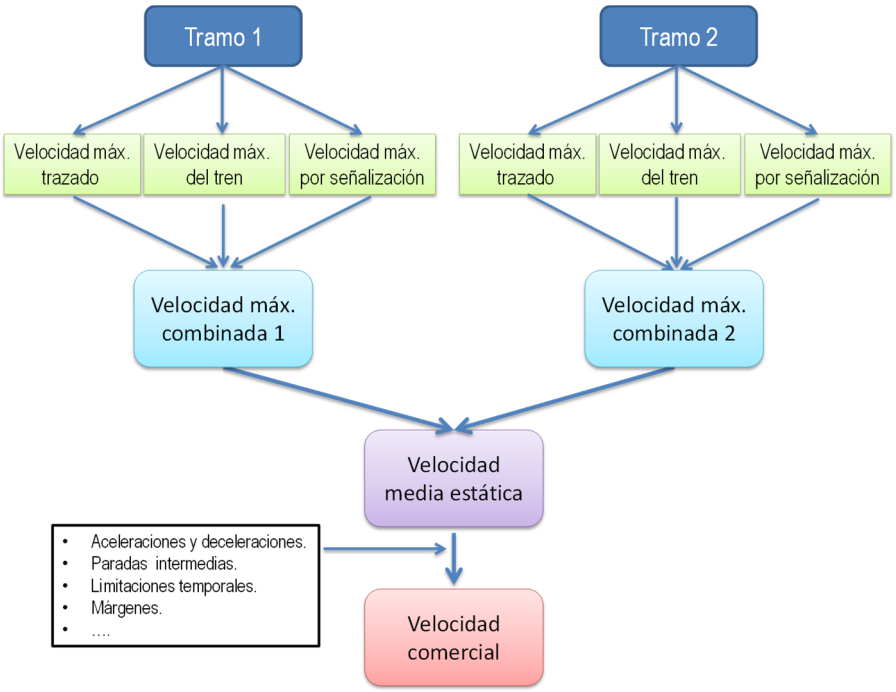


Figura 20. Relación entre la velocidad comercial, la velocidad media estática y la velocidad máxima combinada.

Fuente: Elaboración propia.

1.3.2.4 Velocidad comercialmente requerida (velocidad óptima)

Cada uno de los tipos de velocidad definidos puede ser óptimo por sí mismos si se analizan individualmente. Por ejemplo, una determinada velocidad máxima por trazado

puede ser la óptima para ese trazado porque minimiza el coste de inversión; un tren puede tener una velocidad máxima que es óptima debido a sus características técnicas y de diseño; o una infraestructura tiene una velocidad máxima que es óptima para el sistema de señalización implementado.

Si se analiza el término velocidad de manera global, puede afirmarse que existe una velocidad, a la que llamaremos "velocidad óptima" o "velocidad comercialmente requerida", que no se basa en optimizar cada una de las diferentes velocidades, sino que trata de optimizar todo el sistema. Es decir, aquella velocidad que permiten maximizar el beneficio social y/o económico.

Pongamos un ejemplo que ayude a entender este concepto (véase Figura 21). Supongamos que se pretende construir una línea ferroviaria entre dos ciudades (ciudad A y ciudad B) y supongamos también que se definen diferentes trazados que unen ambas ciudades (L1, L2, L3 y L4). Cada uno de estos trazados tendrá una velocidad máxima diferente, ya que el radio de curva influye en la velocidad máxima (véase Anejo 4). Aquel trazado que tenga menor radio de curva, será el que presente mayor velocidad máxima y, por lo tanto, el trazado L1 presentará velocidades máximas más elevadas que el L2, el L2 mayores que el L3, y el L3 mayores que el L4.

Suponiendo que no hay paradas intermedias, ni limitaciones de velocidad, ni ningún otro hecho que afecte a la velocidad comercial, el tiempo de viaje será menor en el trazado L1 que en el resto de los trazados. Puede asumirse que, a menor tiempo de viaje, mayor "atractivo" para los viajeros y, por lo tanto, mayores ingresos. Si el análisis se centra exclusivamente en los ingresos, el trazado óptimo y, en consecuencia, la velocidad máxima óptima, será la correspondiente al trazado L1.

Si ahora se supone que para ir de A a B hay que atravesar un relieve muy montañoso, como se muestra en la Figura 21, se entiende que los trazados más sinuosos (L3 y L4) pueden "escaparse" de esas grandes pendientes medias, mientras que los trazado L1 y L2 no tienen otra opción más que atravesar la montaña. Con independencia de otros factores que afectan al coste de inversión, es claro que los trazados que atraviesan la montaña tendrán un coste mayor que los que no (mayor cantidad de túnel y/o viaducto). Por ello, si la decisión es reducir el coste de inversión, en este caso la velocidad óptima será la velocidad máxima de los trazados L3 y L4.

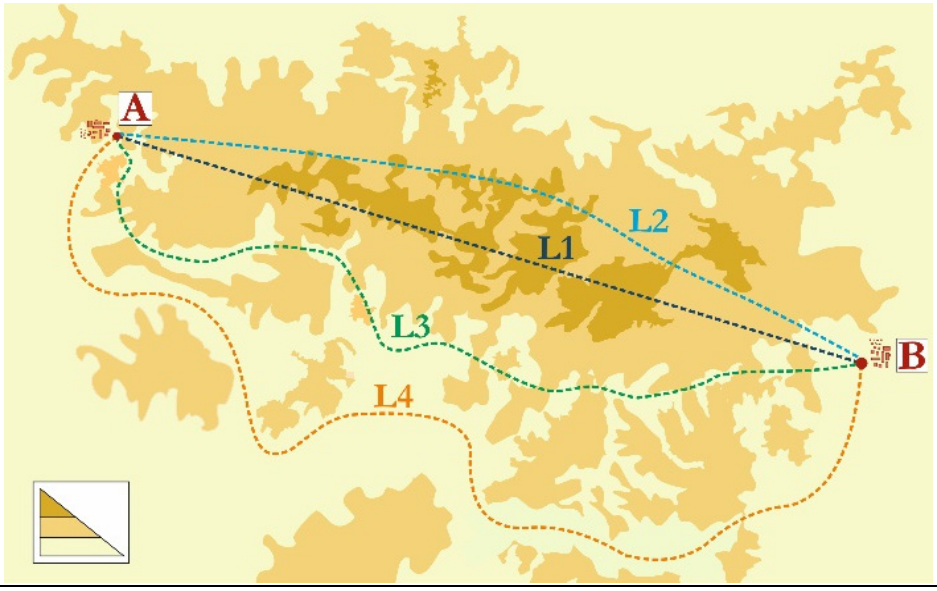


Figura 21. Diferentes alternativas de trazados que unen las ciudades A y B

Fuente: Luis E. Mesa

Este ejemplo sencillo muestra diferentes velocidades óptimas dependiendo de si el análisis se realiza desde el punto de vista de los ingresos o si se hace desde el punto de vista de los costes de inversión, observándose también, que lo que es mejor en uno de los casos, puede ser peor en el otro. Por ello, cuando nos referimos a velocidad óptima, no se trata de la máxima de la infraestructura o la máxima del tren, sino aquella que genera mayores ingresos y menores costes, es decir, aquella que maximiza la diferencia entre ingresos y costes.

Este concepto toma mayor grado de complejidad cuando se divide cada trazado en tramos más pequeños (subtramos), división que puede depender, por ejemplo, del terreno (relieve) por el que transcurre la línea. Si a cada uno de estos tramos se le asigna una velocidad máxima, aparecerán múltiples combinaciones de velocidades máximas por línea. Cada combinación de velocidades máximas supondrá un coste de inversión diferente, por lo que existirán múltiples costes por cada trazado.

La figura que se muestra a continuación (Figura 22) representa el proceso para el cálculo de la rentabilidad de una infraestructura ferroviaria. Además, se destaca, a modo de ejemplo, cómo esta rentabilidad puede ser muy diferente según sea la combinación de velocidades máximas definidas para una misma línea.

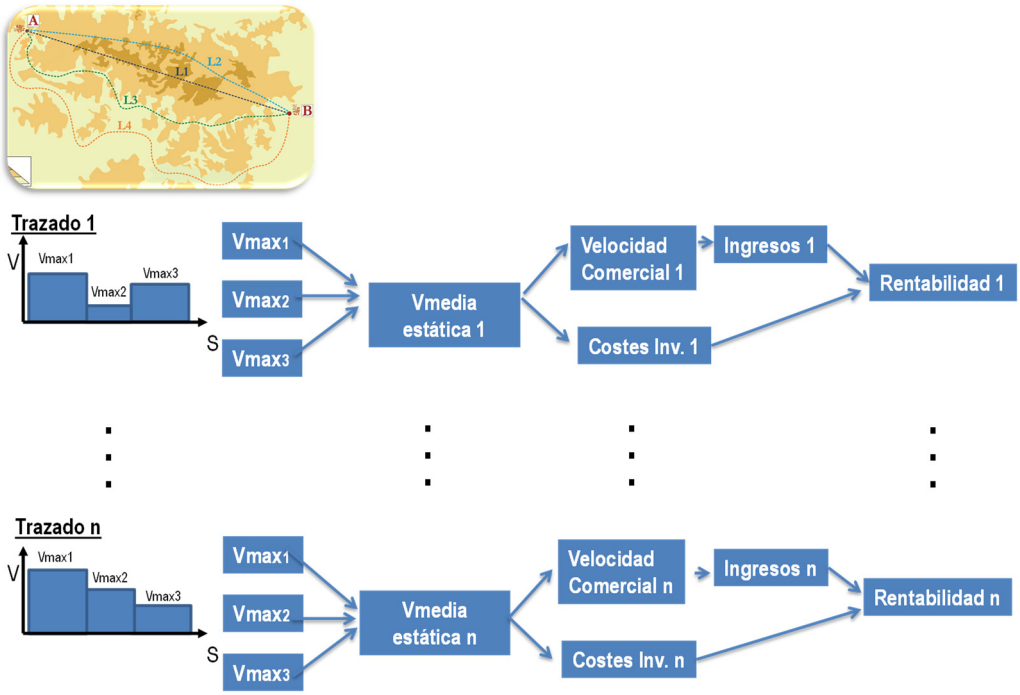


Figura 22. Diferentes combinaciones de velocidades máximas para un mismo trazado (L1) con rentabilidades diferentes.

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, aquella combinación de velocidades máximas que minimice el coste pero que también maximice los ingresos porque hace máxima la velocidad comercial, será la combinación de velocidades que maximiza el rendimiento de la infraestructura y que, por lo tanto, determina el tiempo óptimo (velocidad óptima).

Pero, antes de entrar en detalle de la relación entre las diferentes velocidades y los ingresos y costes de un proyecto ferroviario, se definirá la relación entre el tiempo de viaje y la velocidad máxima por tramos.

1.3.3 Relación entre el tiempo y la velocidad máxima de la infraestructura por tramos

Es imprescindible determinar la relación entre la velocidad máxima y el tiempo de viaje. Ambos parámetros son dependientes, pero influyen de manera diferente en el análisis coste-beneficio: el término velocidad máxima afecta a los costes, mientras que el tiempo de viaje influye en los ingresos y en los ahorros de tiempo y, por lo tanto, es necesario conocerlos antes de proceder a evaluar la rentabilidad del proyecto.

Como se ha expuesto anteriormente, en esta tesis se pretende determinar la mejor combinación de velocidades máximas por tramos que optimiza el binomio coste-beneficio y, por lo tanto, el que hace más rentable un determinado proyecto ferroviario. En definitiva, dada una combinación de velocidades máximas para una determinada línea (este será nuestro input), se estimará la velocidad comercial y el tiempo de viaje. Conocidos ambos parámetros, se procede a la evaluación del proyecto.

Cómo afecta cada velocidad o qué partes del análisis coste-beneficio se ven afectadas por cada uno de estos parámetros, se especificará en los sucesivos capítulos. Este apartado se dedica a detallar la metodología de cálculo que permite relacionarlos y que permite, a partir de una combinación de velocidades máximas, hallar el tiempo de viaje.

Esta sección comenzará determinando la distancia y el tiempo que necesita un tren para reducir o incrementar su velocidad. Posteriormente, este tiempo se relacionará con el tiempo que necesitaría si no hubiese parada o limitación, lo que finalmente permitirá estimar el tiempo de viaje final de una línea ferroviaria.

1.3.3.1 Espacio y tiempo empleado en las limitaciones de velocidad y en las paradas

Una línea ferroviaria puede presentar un perfil de velocidades máximas bastante complejo y tener, por lo tanto, un perfil muy heterogéneo, lo que puede suponer velocidades comerciales bajas en comparación con las correspondientes a perfiles de velocidad más homogéneos. La figura que se muestra a continuación (Figura 23), que será empleada como ejemplo para demostrar la metodología de cálculo, representa tanto los procesos de deceleración como los de aceleración que un tren realiza debido a limitaciones de velocidad o paradas.

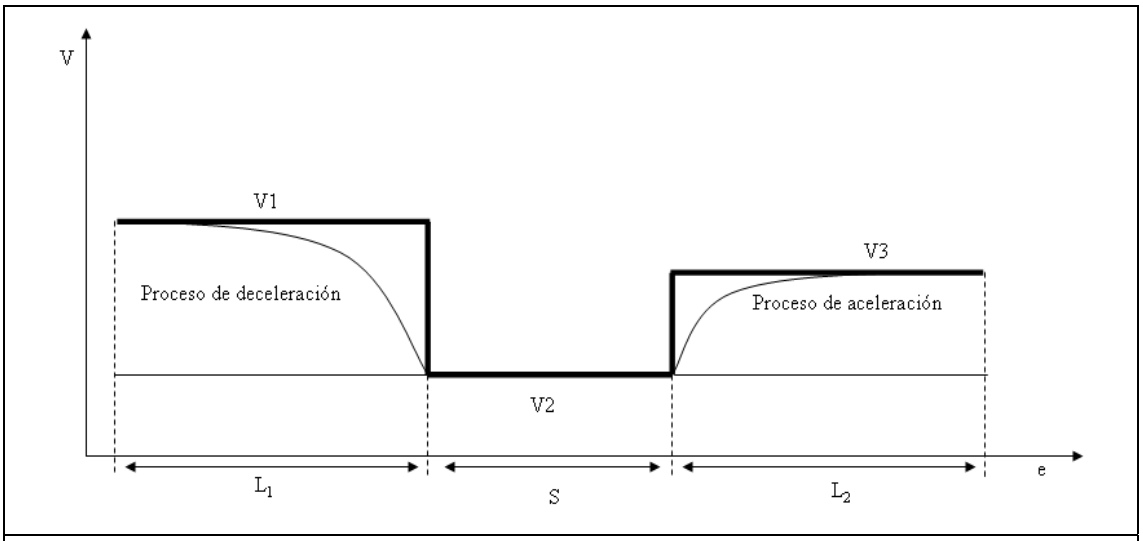


Figura 23. Representación del comportamiento de un tren ante una limitación de velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que una parada es un caso particular de una limitación de velocidad, en el que, tanto la velocidad como la distancia toman valor cero. Considerando que estas variables son cero, la metodología aplicada a una limitación o a un cambio de velocidad puede ser utilizada de igual forma en una parada.

1.3.3.1.1 Espacio y tiempo empleados en las reducciones de velocidad

Se trata de calcular la distancia que recorre un tren y el tiempo empleado en recorrerla, cuando exista una reducción de velocidad. El espacio recorrido por un tren en su proceso de deceleración depende de la velocidad a la que circule en el momento que comienza la reducción (V_1) y de la capacidad que tiene el vehículo para frenar (deceleración del vehículo).

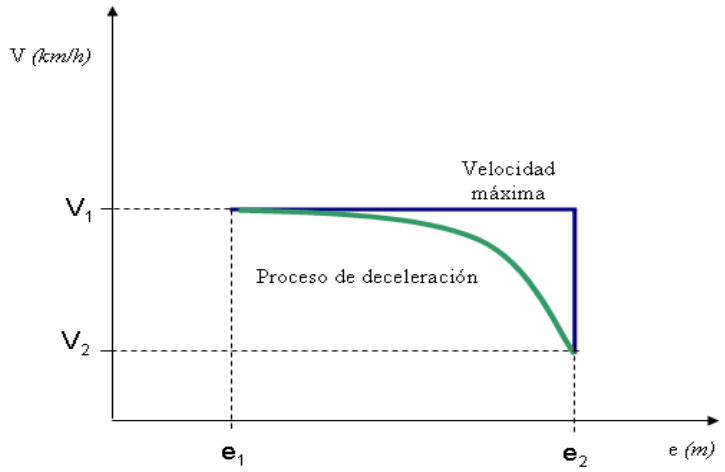


Figura 24. Representación gráfica del proceso de deceleración.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de que un tren se disponga a reducir la velocidad en un tramo de subida (rampa), la deceleración propia del tren se ve incrementada por una aceleración (en este caso negativa) que se produce a causa de la fuerza de la gravedad (por cada 10 milésimas de pendiente la aceleración se incrementa 0,1m/s^2). Al contrario, pasa en un tramo de bajada (pendiente) en el que el tren necesitaría mayor longitud para frenar ya que la pendiente le está proporcionando una aceleración adicional.

El tiempo empleado en el proceso de deceleración para pasar de la velocidad V_1 ($V_{inicial}$) a V_2 (V_{final}) se calcula con la siguiente expresión.

$$t_{dec} = \frac{\frac{V_{final}}{3{,}6} - \frac{V_{inicial}}{3{,}6}}{d - g \times \frac{i}{1.000}} \qquad (1.\ 5)$$

Una vez calculado el tiempo empleado en la deceleración se obtiene, mediante la expresión del movimiento uniformemente acelerado, la longitud empleada para la reducción de velocidad (ecuación (1. 6)).

$$e_2 - e_1 = \frac{1}{2} \times \left(d - g \times \frac{i}{1.000} \right) \times t_{dec}^2 + \frac{V_{inicial}}{3{,}6} \times t_{dec} \qquad (1.\ 6)$$

Donde:

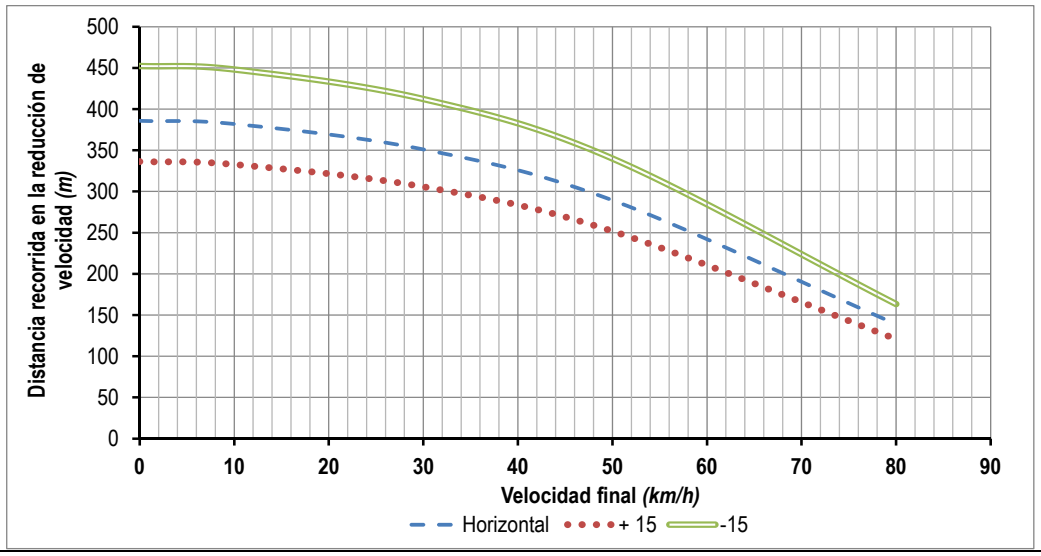
- $V_{inicial}$: Velocidad a la que circula el tren en el instante que comienza la deceleración (V_1) en (km/h).
- V_{final}: Velocidad a la que circula el tren en el instante finaliza su proceso de deceleración (V_2) en (km/h).
- D: deceleración media del tren desde la velocidad V_1 (m/s^2) en signo negativo;
- *g*: aceleración de la gravedad, 9,81m/s^2.
- i: pendiente del tramo (positiva en el caso de una rampa y negativa en el caso de una pendiente) (mm/m).

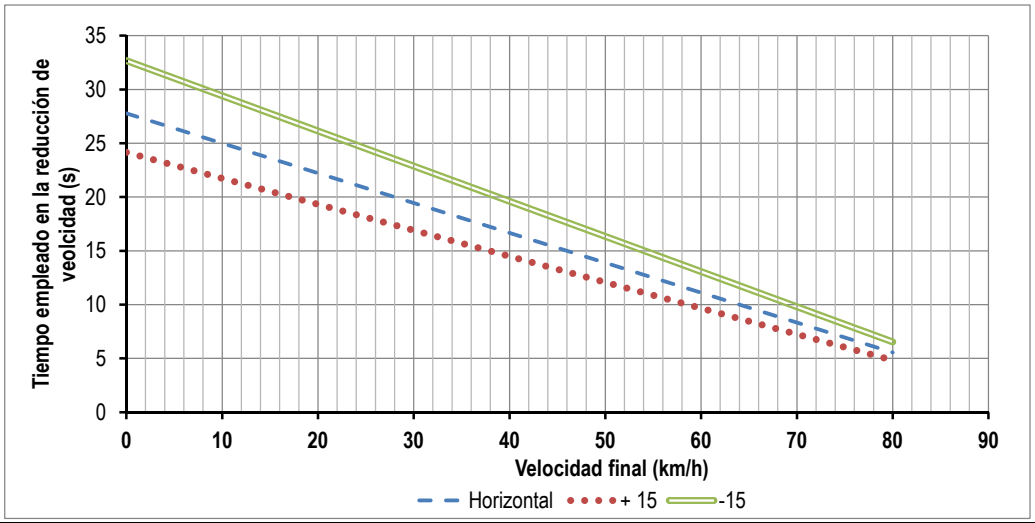
- $e2\text{-}e_1 = L_1$: Longitud del tramo necesario para decelerar (m).
- t_{dec}: tiempo empleado en el proceso de deceleración (s).

A continuación, se muestra la longitud necesaria y el tiempo empleado por un tren de cercanías para reducir hasta una velocidad final (V_2) desde una velocidad máxima inicial (V_1) de 100km/h, con una deceleración de 1m/s^2.

Tabla 5. Tiempo y longitud de frenada desde una velocidad inicial (V_1) de 100km/h según perfil de línea y velocidad final (V_2).

		Inclinación					
		Horizontal		+ 15		-15	
Velocidad inicial 100 km/h, deceleración = 1m/s^2	Velocidad final V_2 *(km/h)*	Tiempo *(s)*	Distancia *(m)*	Tiempo *(s)*	Distancia *(m)*	Tiempo *(s)*	Distancia *(m)*
	0	28	386	24	336	33	452
	10	25	382	22	333	29	448
	30	19	351	17	306	23	412
	50	14	289	12	252	16	340
	80	6	139	5	121	7	163





Fuente: Elaboración propia.

De los resultados obtenidos se extrae, por ejemplo, para el caso de un tren de cercanías con una velocidad máxima de 100km/h y deceleración media de 1m/s^2, que reduce su velocidad en 50km/h en un tramo horizontal, la longitud que necesaria en este proceso es de 289 metros y tarda 14 segundos.

Las gráficas muestran cómo dependiendo del perfil de la vía (pendiente o rampa) la longitud necesaria para reducir la velocidad es diferente, siendo mayor en el caso de pendientes (-15mm/m), ya que la deceleración del tren tiene que contrarrestar la deceleración propia generada por la pendiente, por ello necesita mayor longitud para reducir su velocidad.

1.3.3.1.2 Espacio y tiempo empleados en la fase de aumento de velocidad

Al igual que en el caso anterior, se calcula la longitud necesaria y el tiempo empleado para pasar desde una velocidad inicial (V_2) hasta una velocidad final (V_3), con una aceleración (a), siendo en este caso la velocidad final mayor que la inicial ($V_3>V_2$).

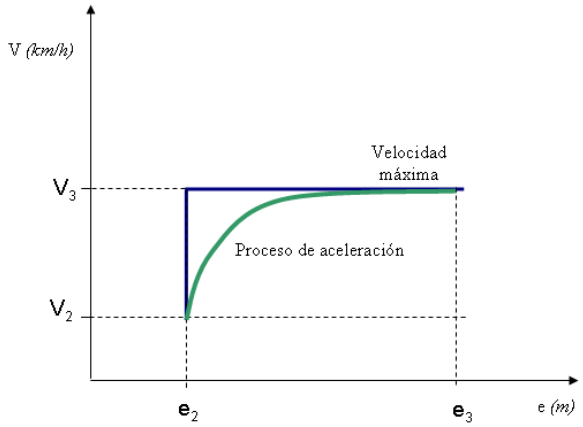


Figura 25. Representación gráfica del proceso de aceleración.

Fuente: Elaboración propia

Las ecuaciones empleadas son las mismas que para el caso de reducción de velocidad (ecuaciones (1. 5) y (1. 6)) pero ahora, continuando con el ejemplo de la Figura 23, $V_{final}=V_3$ y $V_{inicial}=V_2$. Por lo tanto, se obtienen las siguientes expresiones:

$$t_{acel} = \frac{\frac{V_3}{3{,}6} - \frac{V_2}{3{,}6}}{d - g \times \frac{i}{1000}} \qquad (1.\ 7)$$

$$e_3 - e_2 = \frac{1}{2} \times \left(a - g \times \frac{i}{1.000}\right) \times t_{acel}^2 + \frac{V_2}{3{,}6} \times t_{acel} \qquad (1.\ 8)$$

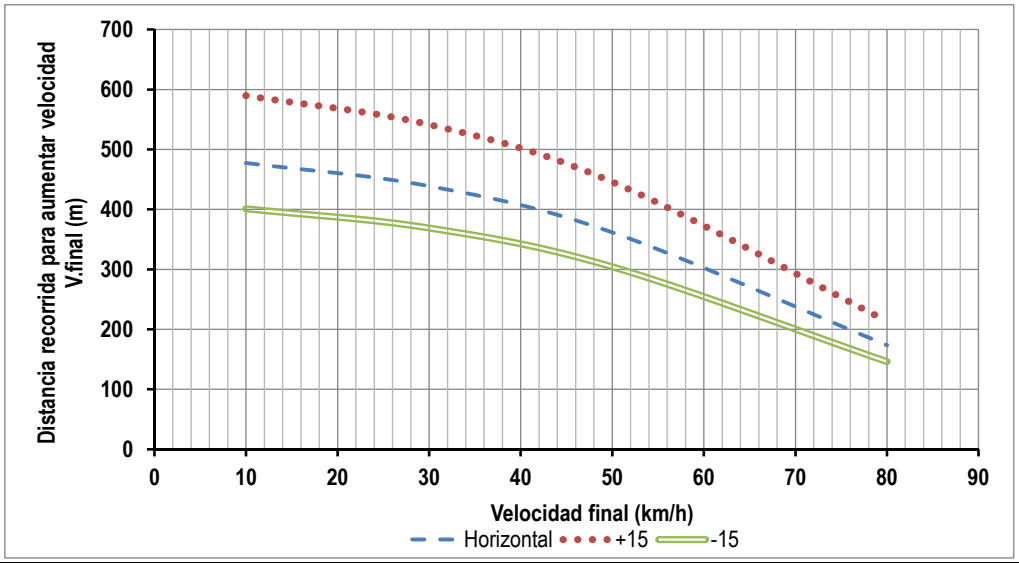
Donde:

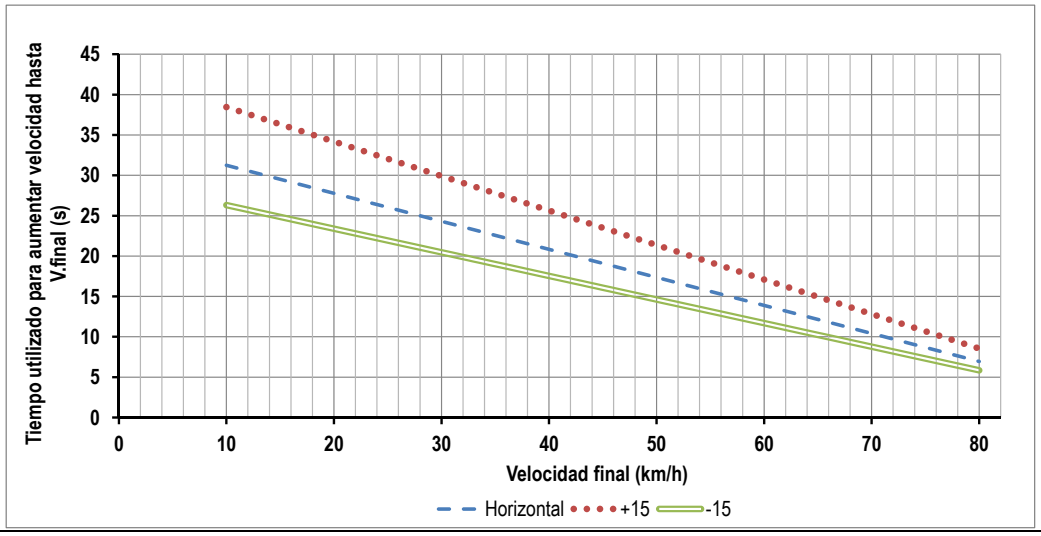
- V_2: Velocidad a la que circula el tren en el instante que comienza a acelerar (km/h).
- V_3: Velocidad a la que circula el tren en el instante final, velocidad máxima que alcanza tras el proceso de aceleración (km/h).
- a: aceleración disponible del tren (m/s^2).
- *g*: aceleración de la gravedad (9,81 m/s^2).
- i: pendiente del tramo (positiva en el caso de una rampa y negativa en el caso de una pendiente) (mm/m).
- e3-e2= L_2: longitud del tramo necesario para frenar (m).
- t_{acel}: tiempo empleado en el proceso de aceleración (s).

A continuación, se muestra el espacio recorrido y el tiempo empleado por un tren de cercanías que aumenta su velocidad desde distintas velocidades iniciales (V_2) hasta una velocidad máxima (V_3) de 100km/h, con una aceleración de 0,8m/s^2.

Tabla 6. Tiempo y espacio recorrido en el proceso de aceleración desde distintas velocidades iniciales (V2) hasta alcanzar una velocidad final (V3), con una aceleración de 0,8m/s2.

		Inclinación					
		Horizontal		+15		-15	
Velocidad final 100 km/h, aceleración = 0,8 m/s^2	Velocidad inicial V_2 *(km/h)*	Tiempo *(s)*	Distancia *(m)*	Tiempo *(s)*	Distancia *(m)*	Tiempo *(s)*	Distancia *(m)*
	10	31	477	38	590	26	401
	30	24	439	30	541	20	369
	50	17	362	21	446	15	304
	80	7	174	9	214	6	146





Fuente: Elaboración propia

Se observa, al igual que en el caso anterior, cómo la inclinación de la línea influye en el tiempo y la distancia. Perfiles con inclinaciones negativas (pendientes), presentan

tiempos y longitudes menores, pues la fuerza de la gravedad ayuda al tren a alcanzar la velocidad necesaria.

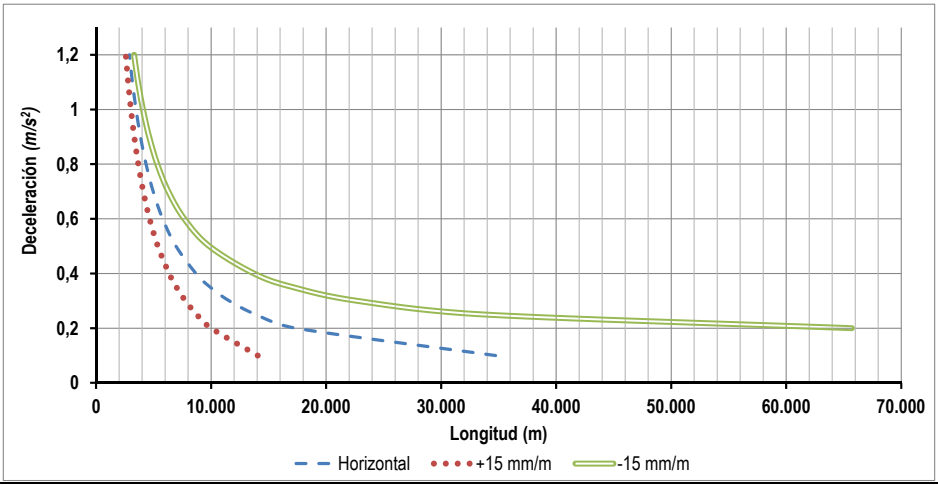
1.3.3.1.3 Distancia necesaria y tiempo empleado en una parada

El cálculo del espacio recorrido y el tiempo empleado en el proceso de frenado y la posterior puesta en marcha hasta alcanzar la velocidad deseada, se estima con la formulación expuesta anteriormente, pero en este caso suponiendo que la velocidad V_2 y la distancia (S) son iguales a cero.

A continuación se muestra una tabla (Tabla 7) en la que se determina, dependiendo de la deceleración, el tiempo empleado en el proceso de parada y el espacio recorrido por un tren que circula a 300km/h. Además, se incluye en este cálculo los tiempos y las distancias empleadas para 15 milésimas y -15 milésimas.

Tabla 7. Tiempo y espacio recorridos en una parda según deceleración y perfil de línea.

	Inclinación					
	Horizontal		+15 mm/m		-15 mm/m	
Dcel (m/s2)	Tiempo (s)	Distancia (m)	Tiempo (s)	Distancia (m)	Tiempo (s)	Distancia (m)
-0,1	833,3	34.722,2	337,2	14.049,0	-	-
-0,2	416,7	17.361,1	240,0	10.002,1	1576,8	65.699,6
-0,25	333,3	13.888,9	209,8	8.742,8	810,2	33.760,1
-0,3	277,8	11.574,1	186,4	7.765,2	545,2	22.716,5
-0,35	238,1	9.920,6	167,6	6.984,3	410,8	17.117,2
-0,4	208,3	8.680,6	152,3	6.346,0	329,6	13.732,3
-0,5	166,7	6.944,4	128,8	5.365,4	236,2	9.840,5
-0,6	138,9	5.787,0	111,5	4.647,3	184,0	7.667,5
-0,7	119,0	4.960,3	98,4	4.098,7	150,7	6.280,6
-0,8	104,2	4.340,3	88,0	3.666,0	127,6	5.318,6
-0,9	92,6	3.858,0	79,6	3.315,9	110,7	4.612,1
-1	83,3	3.472,2	72,6	3.026,8	97,7	4.071,3
-1,1	75,8	3.156,6	66,8	2.784,1	87,5	3.644,0
-1,2	69,4	2.893,5	61,9	2.577,5	79,2	3.297,9



Fuente: Elaboración propia.

Un tren que circule a 300km/h y que dispone de una deceleración media de 0,4m/s^2 tarda en decelerar aproximadamente 208 segundos y lo realiza en un espacio de 8.681 metros; mientras que el mismo tren que circula también a 300km/h pero dispone de una

deceleración media de 0,6m/s^2, tarda en el proceso de deceleración 139 segundos y recorre una longitud de 5.787 metros.
Como se observa en las expresiones anteriores, tanto las distancias como el tiempo empleado para decelerar dependen, en gran medida, de la deceleración que disponga el tren, pero no todos los trenes tienen la misma deceleración ni aceleración, ni éstas son constantes en todo el proceso de aceleración o deceleración. Se exponen, a título orientativo, las aceleraciones y deceleraciones medias para cada tipo de tren dependiendo del servicio que realicen y de su velocidad nominal.

Tabla 8. Tipos de aceleración y deceleración medias orientativas según tipo de tren

	Aceleración (m/s^2)		Deceleración (m/s^2)	
Trenes (Veloc. Tipo)	*0-170 km/h*	*>170 km/h*	*0-170 km/h*	*>170 km/h*
Mercancías (100 km/h)	0,3	-	0,4	-
Larga Distancia (160 km/h)	0,4	-	0,6	-
Regional (140 km/h)	0,6	-	0,8	-
Cercanías (100 km/h)	0,8	-	1	-
Alta velocidad (> 250 km/h)	0,4	0,25	0,35	0,6

Fuente: Elaboración propia.

Tomando las deceleraciones tipo mostradas en la tabla anterior, se calculan las distancias recorridas en el proceso de deceleración y el tiempo empleado por los distintos trenes desde su velocidad tipo (Tabla 9).

Tabla 9. Tiempo de frenada y espacio recorrido en el proceso de deceleración de una parada para distintos tipos de trenes

	Velocidad Tipo	Deceleración *(m/s^2)*			
Trenes	*(Km/h)*	0-170 km/h	>170 km/h	Tiempo *(s)*	Longitud recorrida *(m)*
Mercancías	100	0,4	-	69	965
Larga Distancia	160	0,6	-	74	1.646
Regional	140	0,8	-	49	945
Cercanías	100	1	-	28	386
Alta velocidad	>250	0,35	0,6	180	8.022

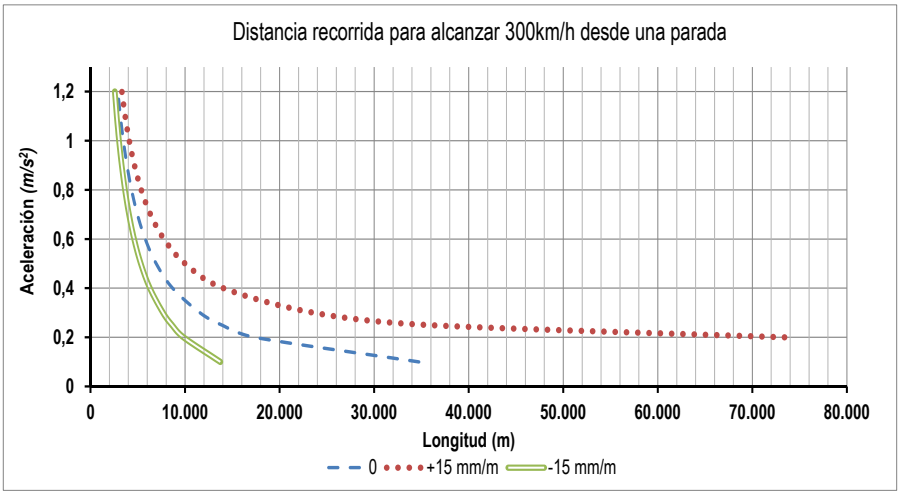
Fuente: Elaboración propia.

Puede observarse que existe grandes diferencias entre tipos de servicios, por ejemplo, un tren de alta velocidad necesita 8.022 metros para frenar desde una velocidad inicial de 300km/h y tardará aproximadamente tres minutos, mientras que un tren de cercanías necesita 386 metros y 28 segundos para frenar desde una velocidad de 100km/h.

En el caso de un aumento de velocidad en el que la velocidad inicial es cero (parada), tanto las distancias y los tiempos empleados para alcanzar la velocidad máxima dependen, en gran medida de la aceleración que disponga el tren. A continuación, se muestra una tabla que calcula para diferentes aceleraciones, la distancia necesaria y el tiempo empleado en el proceso de aceleración para un tren de alta velocidad parado y que trata de alcanzar 300km/h.

Tabla 10. Tiempo y espacio recorrido en el proceso de aceleración de una parada

	Inclinación (mm/m)					
	0		+15 mm/m		-15 mm/m	
Aceleración (m/s^2)	Tiempo (s)	Longitud (m)	Tiempo (s)	Longitud (m)	Tiempo (s)	Longitud (m)
0,1	833,3	34.722,2	-	-	333,3	13.730,6
0,2	416,7	17.361,1	1.666,7	73.402,8	238,1	9.839,9
0,25	333,3	13.888,9	833,3	35.711,8	208,3	8.618,7
0,3	277,8	11.574,1	555,6	23.588,0	185,2	7.667,2
0,4	208,3	8.680,6	333,3	14.047,2	151,5	6.280,4
0,5	166,7	6.944,4	238,1	10.001,4	128,2	5.318,5
0,6	138,9	5.787,0	185,2	7.764,9	111,1	4.612,0
0,7	119,0	4.960,3	151,5	6.345,8	98,0	4.071,3
0,8	104,2	4.340,3	128,2	5.365,3	87,7	3.644,0
0,9	92,6	3.858,0	111,1	4.647,2	79,4	3.297,9
1	83,3	3.472,2	98,0	4.098,7	72,5	3.011,8
1,1	75,8	3.156,6	87,7	3.665,9	66,7	2.771,4
1,2	69,4	2.893,5	79,4	3.315,9	61,7	2.566,6



Fuente: Elaboración propia.

A partir de las aceleraciones medias que se han definido anteriormente (Tabla 8), se ha calculado, para cada tipo de tren, los tiempos y distancias recorridas para alcanzar la velocidad máxima que dispone cada tipo de servicio.

Tabla 11. Tiempo y longitud de aceleración orientativo según tipo de tren

	Velocidades Tipo	Aceleración (m/s^2)			
Trenes	*km/h*	*0-170 km/h*	*>170 km/h*	Tiempo *(s)*	Distancia recorrida *(m)*
Mercancías	100	0,3	-	93	1.286
Larga Distancia	160	0,4	-	111	2.469
Regional	140	0,6	-	65	1.260
Cercanías	100	0,8	-	35	482
Alta velocidad	>250	0,4	0,25	263	12.216

Fuente: Elaboración propia.

A la vista de los resultados recogidos en las tablas, tanto para el proceso de aceleración como en el proceso de deceleración, se puede determinar para cada tipo de tren la distancia recorrida y el tiempo empleado en decelerar y en acelerar para una parada.

Tabla 12. Tiempo y distancia recorrida en el proceso de deceleración y de aceleración según tipo de tren.

		Deceleración		Aceleración		Total	
Trenes	Velocidad Tipo *(Km/h)*	Tiempo *(s)*	Distancia recorrida	Tiempo *(s)*	Distancia recorrida	Tiempo *(s)*	Distancia recorrida
Mercancías	100	69	965	93	1.286	162	2.251
Larga Distancia	160	74	1.646	111	2.469	185	4.115
Regional	140	49	945	65	1.260	113	2.206
Cercanías	100	28	386	35	482	63	868
Alta velocidad	>250	180	8.022	263	12.216	443	20.238

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar cómo un tren de alta velocidad necesita mucha más longitud para primero frenar hasta parar y después volver a alcanzar la máxima velocidad (20.238 metros), que un tren de cercanías (868 metros). Esto es debido a las reducidas aceleraciones y/o deceleraciones del tren de alta velocidad, además de a la velocidad máxima a la que circula.

Hasta ahora se ha mostrado cómo estimar el espacio recorrido y el tiempo empleado en los procesos de aceleración y deceleración, pero es necesario mostrar también qué relación tiene con el tiempo de viaje final, cuestión que se detallará a continuación.

1.3.3.2 Tiempo perdido en las limitaciones de velocidad y en las paradas

Circulando entre dos puntos a velocidad constante el tren tarda un tiempo t_1 en recorrer esa distancia. Pero si entre esos dos puntos la velocidad se reduce a causa de una limitación o una parada (es decir, se produce una deceleración), el tiempo que tarda el tren en recorrer esa distancia será: el tiempo t_1, más un tiempo adicional que representa el tiempo que se ha perdido en esa reducción de velocidad.

Para el cálculo del tiempo perdido en una reducción y/o aumento de velocidad, se emplea el mismo caso ejemplo utilizado en el apartado anterior (Figura 23): (i) un tramo en el que se produce una reducción de velocidad (con una deceleración determinada), y (ii) un tramo en el que el tren aumenta la velocidad (con una aceleración determinada).

1.3.3.2.1 Tiempo perdido en el proceso de deceleración

La representación gráfica del tiempo perdido en una reducción de velocidad (con una deceleración constante) se muestra en la siguiente figura (Figura 26).

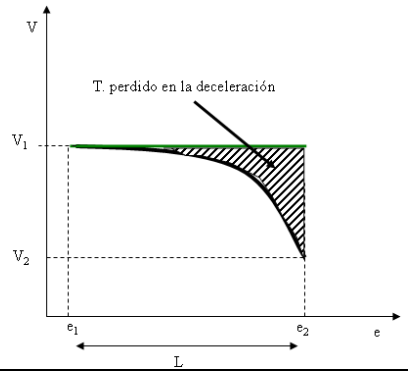


Figura 26. Representación gráfica del tiempo perdido en proceso de deceleración.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de las ecuaciones del movimiento uniformemente acelerado, se determina el tiempo empleado en una reducción de velocidad (ecuación (1. 5)). Una vez que se conoce el tiempo empleado en dicha reducción, se calcula la distancia necesaria (ecuación (1. 6)).

Hallado el tiempo y la distancia, el tiempo perdido en una reducción de velocidad es la diferencia entre el tiempo empleado en la reducción de velocidad y el tiempo que emplearía el tren en recorrer la misma distancia a máxima velocidad.

$$t_{pr} = t_{dec} - t_{maxVel} \qquad (1.\ 9)$$

Donde:

- t_{pr}: Tiempo perdido en la reducción de velocidad (s).
- t_{dec}: Tiempo empleado en el proceso de deceleración (s).
- t_{maxVel}: Tiempo empleado en recorrer L_1 a máxima velocidad (s).

Para el cálculo de t_{maxvel} se utiliza la siguiente expresión:

$$t_{maxVel} = \frac{L_1}{\frac{V_1}{3{,}6}} \qquad (1.\ 10)$$

Donde:

- L_1 = longitud del recorrido entre dos puntos (m).
- V_1 = velocidad constante entre dos puntos (km/h).

Sustituyendo L_1 por la ecuación (1. 6), se obtiene el tiempo empleado en recorrer la distancia que necesita el tren para reducir la velocidad, circulando a máxima velocidad. Una vez que es conocido el t_{maxVel} y sustituyendo las ecuaciones (1. 10) y (1. 5) en la expresión (1. 9), se obtiene el tiempo perdido en la reducción de velocidad.

$$t_{pr} = \frac{\left(\frac{V_2}{3{,}6} - \frac{V_1}{3{,}6}\right)^2}{2 \times \left(-d - g \times \frac{i}{1000}\right) \times \frac{V_1}{3{,}6}} \qquad (1.\ 11)$$

Donde:

- t_{pr}: Tiempo perdido en el proceso de deceleración (s).
- V_2: Velocidad final del tramo analizado (km/h).
- V_1: Velocidad inicial del tramo analizado (km/h).
- d: Deceleración del tren (m/s^2).

A partir de la ecuación (1. 11), es posible el cálculo del tiempo que se pierde en una reducción de velocidad. Si esta ecuación se aplica a todas las reducciones que presenta una línea, es posible calcular el tiempo total perdido debido a reducciones de velocidad.

1.3.3.2.2 Tiempo empleado en recorrer la distancia entre dos puntos a velocidad constante

En el caso en el que el tren mantiene su velocidad constante durante un recorrido (en este caso ejemplo corresponde a la longitud S), es decir, sin que se produzcan cambios de velocidad ni procesos de aceleración ni deceleración, el tiempo empleado para recorrer la longitud S, se estima con la siguiente expresión:

$$t_{cte} = \frac{S}{\frac{V_2}{3{,}6}} \qquad (1.\ 12)$$

Donde:

- t_{cte}: Tiempo empleado en recorrer la longitud S (s).
- S: Longitud del tramo (m).
- V_2: Velocidad a la que circula el tren en el tramo analizado (km/h).

1.3.3.2.3 Tiempo perdido en el proceso de aceleración

Al igual que en el proceso de deceleración, en la fase en la que un tren aumenta su velocidad (con una aceleración media) se produce una pérdida de tiempo con respecto al que el tren emplearía circulando por el mismo tramo a máxima velocidad constante.

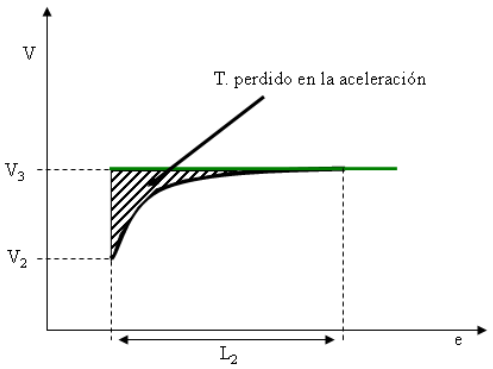


Figura 27. Representación gráfica del tiempo perdido en proceso de aceleración.

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de este tiempo perdido se emplean, también, las ecuaciones de movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. Primero se calcula el tiempo empleado en el proceso aceleración hasta que se alcanza la velocidad V_3 desde V_2 (ecuación (1. 7)) y, posteriormente, aplicando la expresión (1. 8) se estima el espacio recorrido en el proceso de aceleración.

Para el cálculo de t_{maxvel} en este tramo se utiliza la siguiente expresión:

$$t_{maxVel} = \frac{L_2}{\frac{V_3}{3{,}6}} \qquad (1.\ 13)$$

Al igual que en el proceso de deceleración, el tiempo perdido se calcula como la diferencia entre el tiempo empleado en el proceso de aceleración y el tiempo empleado en circular a máxima velocidad.

$$t_{pa} = t_{ace} - t_{maxVel} \qquad (1.\ 14)$$

Sustituyendo en la expresión (1. 14) las ecuaciones (1. 7) y (1. 13) se obtiene la expresión para el cálculo del tiempo perdido en los aumentos de velocidad.

$$t_{pa} = \frac{\left(\frac{V_3}{3{,}6} - \frac{V_2}{3{,}6}\right)^2}{2 \times \left(a - g \times \frac{i}{1000}\right) \times \frac{V_3}{3{,}6}} \qquad (1.\ 15)$$

El tiempo perdido en un cuadro de velocidades como el de la Figura 23, es la suma de los tiempos perdidos en la deceleración y en la aceleración. La expresión final queda de la siguiente forma:

$$T_p = t_{pr} + t_{pa} = \frac{\left(\frac{V_2}{3{,}6} - \frac{V_1}{3{,}6}\right)^2}{2 \times \left(d - g \times \frac{i}{1000}\right) \times \frac{V_1}{3{,}6}} + \frac{\left(\frac{V_3}{3{,}6} - \frac{V_2}{3{,}6}\right)^2}{2 \times \left(a - g \times \frac{i}{1000}\right) \times \frac{V_3}{3{,}6}} \qquad (1.\ 16)$$

Donde:

- Tp: tiempo perdido en una reducción de velocidad (s).

La expresión anterior (1. 16) permite determinar el tiempo perdido en los procesos de aceleración y deceleración que un tren puede experimentar en una determinada línea. Aplicando esta ecuación en cada una de las reducciones y aumentos de velocidad que presente la infraestructura, se obtiene el tiempo adicional que emplea el vehículo por el simple hecho de tener que modificar su velocidad al no poder mantenerla constante.

Puede extraerse, por tanto, que cuanto mayor variación de velocidades exista en una línea (menor homogeneidad en el perfil de velocidades), mayor tiempo se perderá y, por lo tanto, menor velocidad comercial se obtendrá.

1.3.3.2.4 Tiempo perdido en las paradas

Como se ha expuesto anteriormente, el tiempo perdido en las paradas es un caso particular de reducción de velocidad, en el que la velocidad final (en el tramo de deceleración) y la velocidad inicial (en el tramo de aceleración) son igual a cero.

Además, a este tiempo es necesario añadirle el tiempo de parada, porque mientras el tren está parado se produce un aumento del tiempo perdido con respecto a que el tren no pare y, por lo tanto, el tiempo de viaje tiene que incrementarse.

A continuación se muestra el caso ejemplo anterior con V_2=0, es decir con una parada y representando también el tiempo perdido en cada uno de las fases del viaje (Figura 28).

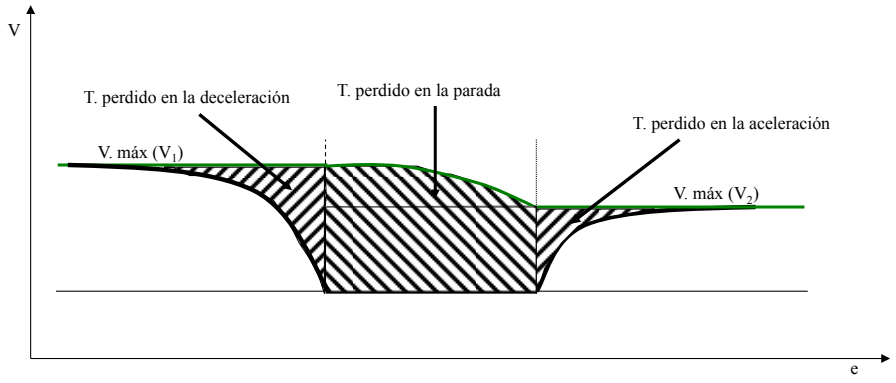


Figura 28. Representación gráfica del tiempo perdido en una parada

Fuente: Elaboración propia.

Sustituyendo en la ecuación (1. 16) y considerando que V_2 es cero debido a las características propias de una parada, se obtiene la siguiente expresión para el cálculo del tiempo perdido en las paradas.

$$T_{pp} = 0{,}1389 \times \left[\frac{V_1}{d} + \frac{V_3}{a}\right] + t_p \qquad (1.\ 17)$$

Donde:

- T_{pp}: Tiempo total perdido en una parada (s).
- V_1: Velocidad inicial con la que se comienza el proceso de parada (km/h).
- V_3: Velocidad final a la que el tren circula tras la parada (km/h).
- d: Deceleración, en signo negativo (m/s^2).
- a: Aceleración (m/s^2).
- t_p: Tiempo de parada (s).

1.3.3.3 Velocidad comercial y tiempo de viaje

Una vez conocido el tiempo perdido en el proceso de deceleración y aceleración, es posible conocer el tiempo de viaje, como suma de: el tiempo en recorrer los diferentes tramos a máxima velocidad, más el tiempo perdido en los procesos de aceleración y deceleración (ya sea en las limitaciones de velocidad como en las paradas), más el tiempo de paradas.

En el caso ejemplo que se ha empleado para mostrar la metodología (Figura 23), la ecuación que determinaría el tiempo de viaje sería la que se muestra a continuación.

$$T_v = \frac{L_1}{\frac{V_1}{3{,}6}} + t_{pr} + t_{cte} + t_{pa} + \frac{L_2}{\frac{V_3}{3{,}6}} = \frac{L_1}{\frac{V_1}{3{,}6}} + \frac{\left(\frac{V_2}{3{,}6} - \frac{V_1}{3{,}6}\right)^2}{2 \times \left(d - g \times \frac{i}{1000}\right) \times \frac{V_1}{3{,}6}} + \frac{S}{\frac{V_2}{3{,}6}} + \frac{L_2}{\frac{V_3}{3{,}6}} + \frac{\left(\frac{V_3}{3{,}6} - \frac{V_2}{3{,}6}\right)^2}{2 \times \left(a - g \times \frac{i}{1000}\right) \times \frac{V_3}{3{,}6}} \quad (1.\ 18)$$

Donde:

- T_v: Corresponde al tiempo de viaje *(s)*.

Conocido el tiempo de viaje para un determinado trayecto, el cálculo de la velocidad comercial se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$V_{com} = \frac{(L_1 + S + L_2)}{T_v} \quad (1.\ 19)$$

La metodología aquí mostrada permite calcular, de manera sencilla y aproximada, la velocidad comercial de una infraestructura ferroviaria, simplemente conociendo la longitud de los tramos y su velocidad máxima. Esta velocidad comercial será la que posteriormente se utilice para estimar la demanda de viajeros que presentará la línea, metodología que será mostrada en el siguiente capítulo.

Se demuestra así que, conocida la velocidad máxima de cada uno de los tramos en los que está delimitada la infraestructura, la aceleración y la deceleración de los vehículos (parámetro que se puede asumir dependiendo del tipo de servicio que realicen), es posible determinar la velocidad comercial y, por lo tanto, el tiempo de viaje.

Con el objetivo de comprobar el modelo propuesto, se aplica esta metodología a un caso real. Se utiliza para ello, la línea de alta velocidad Madrid-Valencia que se dividirá en tres tramos de igual longitud, al igual que el ejemplo utilizado en la explicación del modelo (Figura 23). Además, se añade una parada comercial con el fin de contemplar todas las posibles causas que provocan una variación de velocidad en un servicio tipo.

El objetivo de este ejercicio consiste en determinar la velocidad comercial y el tiempo de viaje para las diferentes combinaciones de velocidad máxima que pueden existir en los tres tramos en los que se ha dividido la infraestructura.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de aplicar la metodología al caso propuesto.

Tabla 13. Velocidad media y tiempo de viaje para cada una de las combinaciones de velocidad máxima definidas

Velocidad Máxima			Veloc. Media	Tiempo Viaje
Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	*(km/h)*	*(h)*
250	250	250	226,50	1,81
250	250	300	236,26	1,71
250	250	350	242,43	1,65
250	300	250	236,15	1,71
250	300	300	247,38	1,61
250	300	350	254,66	1,54
250	350	250	242,03	1,65
250	350	300	254,34	1,54
250	350	350	262,50	1,47
300	250	250	236,92	1,71
300	250	300	248,00	1,60
300	250	350	255,12	1,54
300	300	250	248,13	1,60
300	300	300	261,02	1,50
300	300	350	269,50	1,43
300	350	250	255,14	1,54
300	350	300	269,37	1,43
300	350	350	278,95	1,36
350	250	250	243,86	1,64
350	250	300	255,92	1,53
350	250	350	263,74	1,47
350	300	250	256,27	1,53
350	300	300	270,41	1,43
350	300	350	279,80	1,36
350	350	250	264,23	1,46
350	350	300	279,94	1,36
350	350	350	290,63	1,29

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos se ajustan bastante bien a la realidad, teniendo en cuenta que no se está utilizando plenamente el caso real. Las diferencias con el caso real residen básicamente en:

- Existe mayor número de variaciones de velocidad en la línea real (véase Figura 17).
- En el caso ejemplo no se está contemplando tiempo de parada en la parada comercial propuesta.
- No se tiene en cuenta los márgenes que el gestor de la infraestructura aplica.

Aun así, con todas estas diferencias, las velocidades medias y los tiempos de viaje se aproximan a la realidad. Es importante mencionar que esta metodología se aplicará en fases preliminares del proyecto, es decir, en una fase en la que el trazado de la línea no está completamente definido y, por lo tanto, el tiempo final no se conoce con exactitud. Por ello, cuanto más precisa sea la estimación de los tiempos de viaje, más fieles serán los resultados (por ejemplo, los ingresos) a la realidad.

Queda definida en esta sección la relación entre las diferentes velocidades máximas que puede tener una línea, y su velocidad comercial, proporcionando también la metodología de cálculo que permitiría su estimación, incluso en una fase del proyecto en la que prácticamente se desconoce el trazado de la línea.

Una vez conocida la relación entre las velocidades máximas por tramos y el tiempo de viaje, se procede a estudiar la relación entre el tiempo de viaje y el binomio coste-beneficio.

2. EFECTO DE LA VELOCIDAD EN LOS INGRESOS

2.1 INTRODUCCIÓN

Existe una clara relación entre los ingresos y el tiempo de viaje pues, como se muestra a lo largo de este capítulo, reducciones en el tiempo de viaje mejoran el "atractivo" del transporte para los viajeros y, por lo tanto, lo hacen más útil. Es importante señalar que no sólo el tiempo de viaje influye en la demanda, sino que otros parámetros, como pueden ser la frecuencia, precio del billete, tiempo de acceso al modo…, tienen una influencia importante en el tráfico y en la percepción del viajero al modo de transporte. El efecto que causan estos parámetros en la demanda no será objeto de análisis en este estudio, ya que puede llegar a ensombrecer el objetivo de esta tesis.

A mayor número de viajeros, mayores ingresos para el sistema, lo que no siempre significa mayores beneficios. Si el análisis se focaliza solamente en la relación entre número de viajeros e ingresos, una reducción del tiempo de viaje lleva asociado un aumento en los ingresos, pero si se profundiza en este tema, en ocasiones puede ocurrir que un incremento en la demanda requiera un incremento en la oferta, lo que supone, en muchos casos, un incremento del parque de material móvil del operador y, por lo tanto, un aumento en sus costes. Por ello, argumentos que defienden que un incremento en los ingresos supone siempre un incremento igual en los beneficios pueden estar infundados.

Cómo y cuánto una reducción del tiempo afecta a los ingresos y al número de trenes necesarios (dimensionamiento del parque) se determinará en este capítulo y será uno de los inputs del análisis coste-beneficio que se realizará en este estudio. Para ello, se dividirá este capítulo en dos grandes apartados:

1. Demanda y tiempo de viaje (velocidad comercial). En esta sección se definirá el modelo de estimación de demanda, se aplicará a un caso ejemplo (corredor de Levante) y se cuantificará la relación entre la demanda y la velocidad comercial, lo que permitirá relacionar tráfico y tiempo de viaje. Además, se incluye un capítulo que permite traducir viajeros en ingresos del operador.
2. Plan de explotación. En este apartado se dimensionará el parque de material en función de la demanda, por lo que se relacionará el tiempo de viaje con la oferta del operador, lo que influirá en su coste de inversión. Además, se incluye un apartado en el que se desarrolla un modelo que permite dimensionar los trenes en función de una serie de variables, entre las que se encuentra la velocidad máxima.

2.2 MODELOS DE DEMANDA: INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD COMERCIAL EN LA CUOTA DE MERCADO

La previsión de la demanda es una cuestión básica e indispensable para determinar la rentabilidad de una infraestructura, ya que permite cuantificar el posible mercado de viajeros y, por lo tanto, cuantificar los posibles ingresos que la infraestructura generará a lo largo de su vida útil.

El objetivo principal de esta sección consiste en caracterizar la demanda de viajeros para un determinado trayecto en función de la velocidad comercial y, en consecuencia, del tiempo de viaje. Se trata pues, de analizar la sensibilidad que muestran los pasajeros en un cierto corredor o relación origen-destino, a la variación del tiempo de viaje para, posteriormente, calcular los ingresos por tráfico.

Para ello, se emplearán escenarios reales con datos también reales, lo que demostrará y justificará los modelos seleccionados. No es objeto de esta tesis sentar las bases de cálculo de la demanda sino, más bien, traer a colación aquellos estudios ya contrastados, definirlos y aplicarlos en un caso ejemplo, lo que permitirá obtener conclusiones válidas dejando a la elección del planificador de la infraestructura aquel modelo que, para cada caso, considere más oportuno.

Antes de adentrarnos en la estimación del tráfico y en su relación con la velocidad media, es necesario analizar los diferentes modelos de demanda existentes, tipología y utilidad.

2.2.1 Modelos de demanda

Un modelo es una representación simplificada de la realidad que pretende replicar una parte de ésta, focalizándose en ciertos elementos que son considerados claves. En definitiva, es un modelo que trata de interpretar la realidad mediante ecuaciones matemáticas.

En cuanto a los modelos de demanda, las personas viajan como consecuencia de una necesidad (trabajo, estudios, negocios, ocio…), un buen sistema de transporte trata de satisfacer esta necesidad. En algunas circunstancias la elección del destino, modo, horario, obedece a una planificación, pero otras veces únicamente se considera el destino y el modo. Los modelos más comúnmente empleados para la determinación de la demanda de viajeros son los modelos que tienen en cuenta la decisión de viajar, la elección de destino, la elección del modo y la elección del itinerario. Estos modelos se detallarán más adelante.

La demanda de transporte depende de infinidad de variables como: el día de la semana, día del mes, velocidad del vehículo, carga transportada, frecuencia…Por lo tanto, su determinación, para una relación o ruta concreta, es un problema complejo que ha sido objeto de múltiples estudios teóricos y aplicaciones a casos concretos.

No existe una metodología universal ni pacifica doctrina, tampoco es el objetivo de esta tesis, pero al ser un tema importante dentro del estudio que aquí se realiza, se añade una sección donde se definen y se exponen de manera breve los diferentes modelos.

2.2.1.1 Clasificación de los modelos de previsión de la demanda

Antes de explicar el modelo de demanda empleado en esta tesis, se clasifican los diferentes modelos existentes definiéndose, de forma resumida, las características principales que los caracterizan y que los hacen peculiares.

La primera clasificación que se puede realizar, consiste en distinguir entre modelos estadísticos y explicativos. La diferencia entre unos y otros (Puig Gimeno, 2009) la resume de la siguiente forma:

- Los modelos estadísticos o empíricos se basan en estadísticas definidas a priori, cuyos parámetros se ajustan a partir de los datos observados (conocidos gracias a encuestas…) que describen la movilidad de la población.
- Presentan el inconveniente de que limitan todo análisis de futuro sobre el comportamiento de los usuarios, ya que la calidad de los ajustes obtenidos es, muy a menudo, una mera ilusión.
- Los modelos explicativos se basan en un análisis detallado de los datos mediante ecuaciones matemáticas. Los parámetros, ajustados a datos actuales, pueden reflejar una evolución futura de los comportamientos de los individuos. Estos modelos, más difíciles de aplicar y sobretodo de ajustar, son mejores para las previsiones y para la planificación.

Los modelos de demanda pueden también clasificarse en:

- Modelos *agregados*, estudian la elección del modo de transporte a través de volúmenes de tráfico observados. A grandes rasgos, estos modelos representan el comportamiento del conjunto de viajeros.
- Modelos *desagregados* están más ligados a los comportamientos individuales. El objetivo de estos modelos es determinar la probabilidad de elección en función de las características del individuo, de su viaje y de la oferta de transporte. Según (Ortúzar & Willumsen, 2011) *"Los modelos desagregados pueden conducir al desarrollo de modelos más realistas".*

Decidir entre un enfoque agregado o uno desagregado o en qué situación utilizar uno u otro, no es una tarea fácil. De hecho, (Daly & Ortúzar, 1990) afirma que no existe un enfoque apropiado y definitivo para todas las situaciones.

Además, los modelos de demanda se pueden clasificar en:

- Modelos *secuenciales*, son los aquellos que suponen que las diferentes elecciones se hacen sucesivamente por el individuo. Cada una de estas elecciones se estudia individualmente con una metodología determinada.
- Modelos *directos*, buscan integrar en una sola ecuación todo el proceso de elección. Se basan en construir un modelo que incorpore los modelos de generación, distribución y elección del modo de transporte.

De la combinación de las últimas dos clasificaciones, surgen cuatro tipos de modelos de demanda diferentes y que son los que habitualmente se emplean. A modo resumen los modelos de demanda pueden clasificarse como:

- Modelos *agregados secuenciales*. Estos modelos describen y analizan los tráficos globales entre dos zonas geográficas y se aplican de forma secuencial.
- Modelos *agregados directos*. En una sola ecuación se aúnan los modelos de generación-distribución y de reparto modal. La metodología para el cálculo de los modelos de generación-distribución se asemeja a los modelos citados anteriormente (modelos agregados secuenciales) pero el tratamiento de los modelos de elección modal es diferente.
- Modelos *desagregados secuenciales*. Se emplean, principalmente, para la determinación modal de cada individuo ya que, tanto la generación como la distribución del tráfico, suelen ser calculadas mediante la metodología clásica.
- Modelos *desagregados directos*. Este tipo de modelos exponen que el usuario no toma su decisión como respuesta a una serie de preguntas (¿viajar o no?, ¿en qué modo?, etc.), sino que la toma conjunta y simultáneamente.

2.2.2 Modelo de demanda aplicado al corredor de Levante

Tras el análisis de las diferentes estructuras de modelización de la demanda, se aplica a un caso real (corredor de Levante) un modelo de cuatro etapas (véase Figura 29) que consistirá en un modelo secuencial agregado. Este modelo no solo permitirá estimar la posible demanda, sino que también ofrece la posibilidad de estimar la elasticidad a diferentes parámetros que definen la oferta, tales como la velocidad media, cuestión básica en esta tesis.

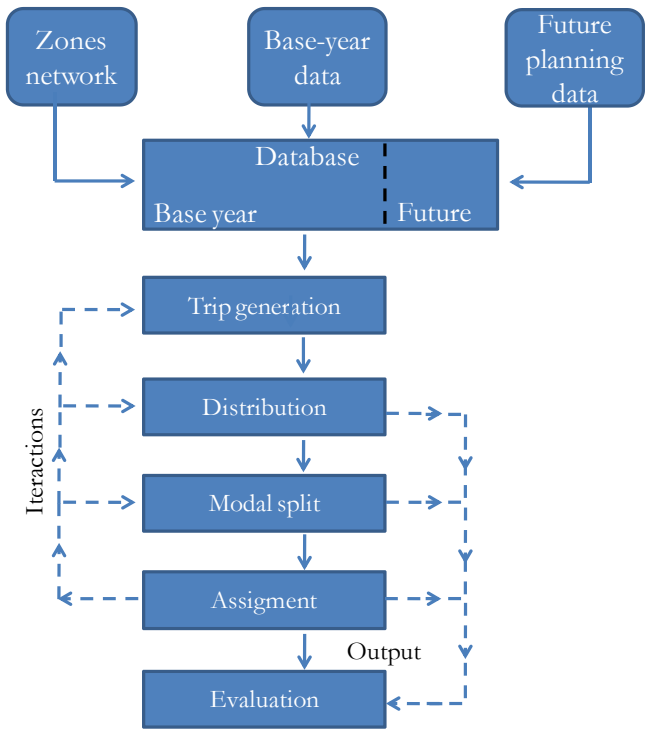


Figura 29. Modelo clásico de transporte de cuatro etapas.

Fuente: (Ortúzar & Willumsen, 2011).

Puede afirmarse que el modelo comienza con la recogida y creación de bases de datos (a partir de bases de datos existentes o encuestas) que son utilizadas posteriormente para calcular o modelar el número de viajes generados por cada zona de estudio (*Trip generation*).

El siguiente paso consiste en asignar esos viajes a orígenes-destinos (*Distribution*), posteriormente se determina el reparto modal según modo de transporte (*Modal split*) y la última etapa (*Assigment*) consiste en asignar los viajes de cada modo al tipo de red (pública o privada). Por último, se analizan o evalúan los resultados obtenidos (*Evaluation*).

El modelo de demanda aquí utilizado (modelo cuatro etapas) se ha estructurado de la siguiente forma:

1. Elaboración de una base de datos que refleje el número total de viajes y su distribución entre zonas o áreas, para un año base. Además, se repartirán estos viajes anuales, estimados para cada relación, entre la oferta de transporte existente.
2. Modelización de la demanda total y por modos mediante un modelo de generación–distribución. Se introduce una sección en la que se calibra el modelo, incluyendo un apartado con la prognosis de la demanda para un año escogido.
3. Reparto de la demanda total para cada uno de los modos de transporte.
4. Estimación de la demanda inducida en el corredor. Determinación de los nuevos viajeros que aparecen con la puesta en marcha del nuevo servicio ferroviario.
5. Evaluación de los resultados obtenidos. Se realizará para cada una de las fases anteriores de manera independiente, con el fin de extraer una serie de conclusiones tras la aplicación de los diferentes modelos en el escenario real propuesto.

Se detalla a continuación cada una de las fases que permiten la aplicación del modelo de cuatro etapas.

2.2.2.1 Base de datos de movilidad

Como se verá más adelante, la metodología empleada en la modelización de la generación y distribución de viajes se basa en la utilización de una variante de los modelos de gravedad, cuyo ajuste se realizará por mínimos cuadrados ordinarios.

Previo a la aplicación del modelo de generación-distribución, es imprescindible la recogida de aquellos datos que facultan el ajuste del modelo. Para ello, se divide esta tarea en tres fases:

- Delimitación de la zona de estudio.
- Oferta de servicios de transporte.
- Demanda según modos.

2.2.2.1.1 Delimitación de la zona de estudio

El primer paso consiste en delimitar las zonas de estudio (zonificación), actuación que ayudará para la posterior tarea basada en la recogida de datos e información sobre los tráficos y/o flujos de las zonas de estudio. Como se ha expuesto anteriormente, se empleará el corredor de Levante con el objetivo de calibrar y validar los modelos empleados. Las comunidades ámbito de estudio corresponden a la Comunidad de Madrid, Región de Murcia, Cataluña, Castilla la Mancha, Andalucía y Comunidad Valenciana.

A continuación se muestra los principales nodos para la aplicación del modelo de demanda (Figura 30).

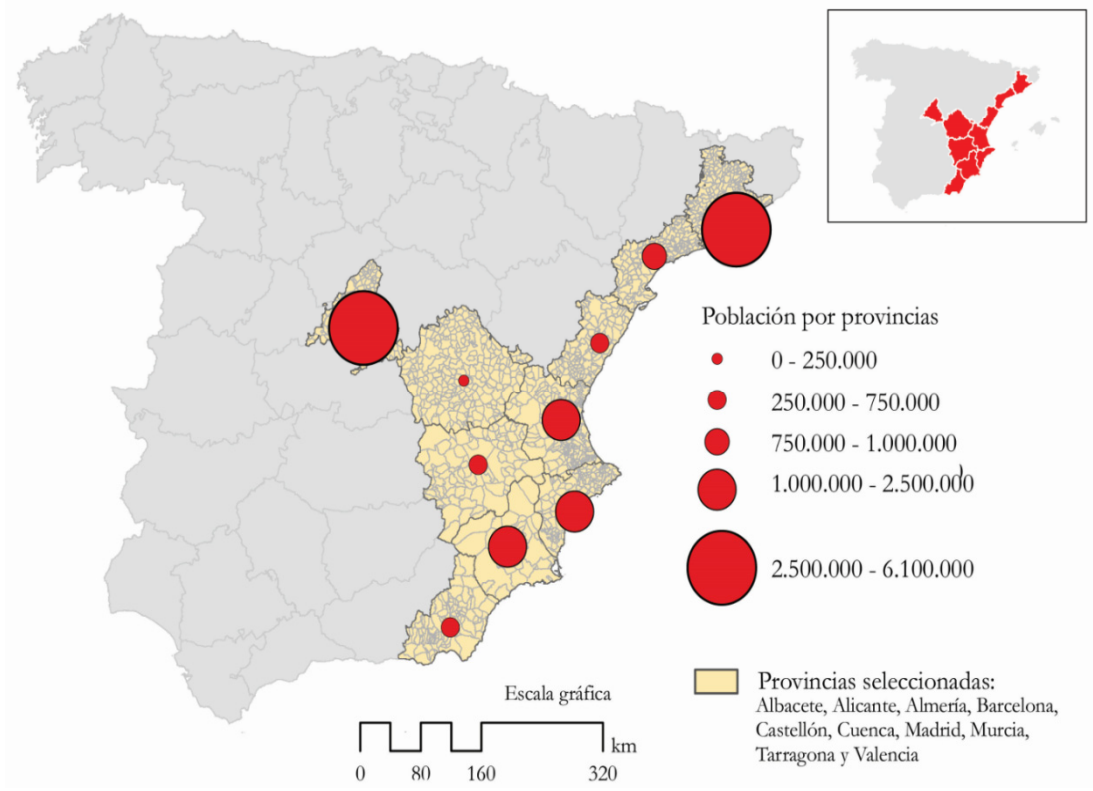


Figura 30. Corredor de Levante de Alta Velocidad.

Fuente: Elaboración propia (cartografía Luis E. Mesa)

2.2.2.1.2 Oferta de servicios de transporte de viajeros

Es imprescindible disponer de una base de datos de movilidad que refleje las necesidades de demanda, que servirá de patrón para la calibración de los modelos que serán implementados. Esta base de datos permitirá establecer una matriz de viajes que será utilizada, posteriormente, por el planificador de la infraestructura o al planificador de la explotación para dimensionar los recursos necesarios que permitan la operación.

Se entiende que cada modo de transporte presenta unas características propias que lo diferencian de los demás modos. Para unos modos resulta relativamente sencillo el acceso a datos o estadísticas y, sobretodo, conocer volúmenes de demanda globales.

Por el contrario, la diversidad y la casuística existente en otros modos para realizar un viaje es muy amplia (por ejemplo, transporte por carretera, ya sea vehículo privado o público). En estos casos, se requiere de encuestas de movilidad que reflejen los flujos.

En el Anexo 1 de esta tesis se describen los servicios prestados por los diferentes modos de transporte, cuyas fuentes de información utilizadas se especificarán para cada uno de ellos. Es importante señalar que la situación de referencia corresponde al 2007, ya que es este año del que se disponen de todos los datos necesarios.

2.2.2.1.3 La demanda de viajeros

En este apartado se pretende caracterizar la demanda de transporte por modos y, para ello, es preciso recopilar los datos que modelizan dicha demanda. La información utilizada procede de las siguientes encuestas o bases de datos:

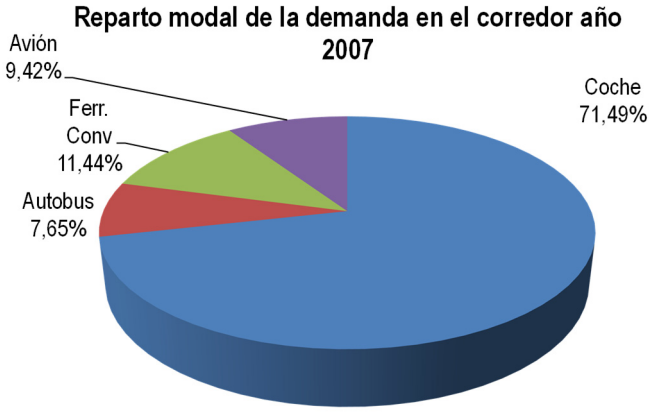
- Para el caso de la carretera, tanto del vehículo privado como público (autobús), se emplea la encuesta Movilia2007, publicada por el Ministerio de Fomento.
- En el modo ferroviario, son utilizados datos de Renfe y Adif recopilados por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- En el caso del modo aéreo, se utilizan las estadísticas del transporte aéreo publicadas por AENA.

Toda la información recabada, a partir de las bases de datos citadas anteriormente, se puede consultar en el Anejo 2. Cabe destacar que la información obtenida de estas bases de datos es, para el caso ferroviario y el modo avión, muy completa en la mayoría de las relaciones, pero en general, la información obtenida de la encuesta Movilia2007 presenta alguna dispersión con respecto a flujos reales. A pesar de todo, los datos aquí mostrados proporcionan en su conjunto una buena imagen de la situación de referencia.

A modo de resumen de toda la información recopilada, se muestra la matriz origen-destino de todos los modos recopilados en una única tabla (Tabla 14).

Tabla 14. Matriz de viajes interregionales en el corredor de Levante. Millones de viajes al año.

Origen	Destino	Coche	Autobus	Ferr. Conv	Avión	Total 2007	Origen	Destino	Coche	Autobus	Ferr. Conv	Avión	Total 2007
ALBACETE	ALICANTE	771.932	51.768	44.397	0	868.096	CUENCA	ALBACETE	55.812	885	0	0	56.697
ALBACETE	ALMERÍA	28.001	2.449	130	0	30.580	CUENCA	ALICANTE	227.609	15.264	0	0	242.873
ALBACETE	BARCELONA	62.126	6.165	12.265	0	80.557	CUENCA	ALMERÍA	10.814	946	0	0	11.760
ALBACETE	CASTELLÓN	157.575	10.567	3.435	0	171.578	CUENCA	BARCELONA	32.678	3.243	0	0	35.921
ALBACETE	CUENCA	55.812	885	0	0	56.697	CUENCA	CASTELLÓN	80.483	5.397	0	0	85.881
ALBACETE	MADRID	1.898.867	385.740	178.808	0	2.463.415	CUENCA	MADRID	1.573.652	319.675	80.210	0	1.973.537
ALBACETE	MURCIA	514.870	7.613	11.137	0	533.620	CUENCA	MURCIA	143.401	2.120	0	0	145.522
ALBACETE	TARRAGONA	10.227	1.015	2.281	0	13.523	CUENCA	TARRAGONA	5.347	531	0	0	5.878
ALBACETE	VALENCIA	961.546	64.483	84.443	0	1.110.472	CUENCA	VALENCIA	481.207	32.271	46.534	0	560.012
ALICANTE	ALBACETE	771.932	51.768	45.430	0	869.129	MADRID	ALBACETE	1.898.867	385.740	177.722	0	2.462.329
ALICANTE	ALMERÍA	132.137	17.355	0	0	149.492	MADRID	ALICANTE	1.146.548	172.404	478.776	426.740	2.224.468
ALICANTE	BARCELONA	604.529	64.685	139.368	216.543	1.025.125	MADRID	ALMERÍA	297.011	80.174	45.077	154.854	577.116
ALICANTE	CASTELLÓN	101.594	5.418	18.899	0	125.911	MADRID	BARCELONA	1.545.812	347.933	381.857	2.402.492	4.678.094
ALICANTE	CUENCA	227.609	15.264	0	0	242.873	MADRID	CASTELLÓN	365.176	55.252	36.189	0	456.617
ALICANTE	MADRID	1.146.548	172.404	470.443	433.158	2.222.553	MADRID	CUENCA	1.573.652	319.675	65.296	0	1.958.623
ALICANTE	MURCIA	3.418.681	223.564	7.533	0	3.649.778	MADRID	MURCIA	884.373	58.192	229.482	69.660	1.241.707
ALICANTE	TARRAGONA	100.324	10.735	20.965	0	132.024	MADRID	TARRAGONA	235.190	52.937	193.192	0	481.319
ALICANTE	VALENCIA	1.987.278	84.936	232.119	0	2.304.333	MADRID	VALENCIA	1.891.369	283.501	432.187	528.530	3.135.587
ALMERÍA	ALBACETE	28.001	2.449	87	0	30.537	MURCIA	ALBACETE	514.870	7.613	11.231	0	533.714
ALMERÍA	ALICANTE	132.137	17.355	0	0	149.492	MURCIA	ALICANTE	3.418.681	223.564	11.280	0	3.653.525
ALMERÍA	BARCELONA	103.257	18.161	2.929	58.023	182.370	MURCIA	ALMERÍA	300.474	19.754	0	0	320.228
ALMERÍA	CASTELLÓN	23.788	3.124	188	0	27.101	MURCIA	BARCELONA	198.960	0	44.049	0	243.009
ALMERÍA	CUENCA	10.814	946	0	0	11.760	MURCIA	CASTELLÓN	291.970	19.093	4.606	0	315.669
ALMERÍA	MADRID	297.011	80.174	43.509	0	420.694	MURCIA	CUENCA	143.401	2.120	0	0	145.522
ALMERÍA	MURCIA	300.474	19.754	0	0	320.228	MURCIA	MADRID	884.373	58.192	225.723	43.520	1.211.808
ALMERÍA	TARRAGONA	15.915	2.799	404	0	19.118	MURCIA	TARRAGONA	32.326	0	7.623	0	39.949
ALMERÍA	VALENCIA	123.024	16.158	388	0	139.570	MURCIA	VALENCIA	1.706.834	111.618	58.073	0	1.876.525
BARCELONA	ALBACETE	62.126	6.165	12.808	0	81.100	TARRAGONA	ALBACETE	10.227	1.015	2.289	0	13.531
BARCELONA	ALICANTE	604.529	64.685	143.184	223.958	1.036.356	TARRAGONA	ALICANTE	100.324	10.735	20.506	0	131.565
BARCELONA	ALMERÍA	103.257	18.161	2.922	60.466	184.806	TARRAGONA	ALMERÍA	15.915	2.799	520	0	19.234
BARCELONA	CASTELLÓN	345.329	36.951	160.684	0	542.964	TARRAGONA	BARCELONA	1.981.037	192.604	1.052.190	0	3.225.831
BARCELONA	CUENCA	32.678	3.243	0	0	35.921	TARRAGONA	CASTELLÓN	70.681	7.563	26.108	0	104.352
BARCELONA	MADRID	1.545.812	347.933	376.266	2.335.224	4.605.235	TARRAGONA	CUENCA	5.347	531	0	0	5.878
BARCELONA	MURCIA	198.960	0	44.188	0	243.148	TARRAGONA	MADRID	235.190	52.937	193.537	0	481.664
BARCELONA	TARRAGONA	1.981.037	192.604	1.011.225	0	3.184.866	TARRAGONA	MURCIA	32.326	0	7.441	0	39.767
BARCELONA	VALENCIA	1.244.504	133.163	437.918	0	1.815.585	TARRAGONA	VALENCIA	231.960	24.820	64.125	0	320.905
CASTELLÓN	ALBACETE	157.575	10.567	3.571	0	171.714	VALENCIA	ALBACETE	961.546	64.483	83.424	0	1.109.453
CASTELLÓN	ALICANTE	101.594	5.418	19.307	0	126.319	VALENCIA	ALICANTE	1.987.278	84.936	241.032	0	2.313.246
CASTELLÓN	ALMERÍA	23.788	3.124	252	0	27.165	VALENCIA	ALMERÍA	123.024	16.158	401	0	139.583
CASTELLÓN	BARCELONA	345.329	36.951	158.189	0	540.469	VALENCIA	BARCELONA	1.244.504	133.163	443.257	0	1.820.924
CASTELLÓN	CUENCA	80.483	5.397	0	0	85.881	VALENCIA	CASTELLÓN	1.987.278	84.936	34.106	0	2.106.320
CASTELLÓN	MADRID	365.176	55.252	37.292	0	457.720	VALENCIA	CUENCA	481.207	32.271	55.090	0	568.568
CASTELLÓN	MURCIA	291.970	19.093	4.634	0	315.697	VALENCIA	MADRID	1.891.369	283.501	417.717	530.628	3.123.215
CASTELLÓN	TARRAGONA	70.681	7.563	26.172	0	104.416	VALENCIA	MURCIA	1.706.834	111.618	59.038	0	1.877.490
CASTELLÓN	VALENCIA	1.987.278	84.936	32.216	0	2.104.430	VALENCIA	TARRAGONA	231.960	24.820	63.085	0	319.865



Fuente: Elaboración Propia.

Tras observar los resultados de la Tabla 14 y su correspondiente gráfica, se observa cómo el vehículo privado es el modo de transporte más empleado, con más de 56,7 millones de viajes (71,49%); 6 millones de viajes anuales se realizan en autobús

(7,65%); 9,08 millones se realizan en ferrocarril (11,44%); y 7,5 millones de viajes se realizan en avión (9,42%).

Además, se puede apreciar la gran diferencia existente entre las rutas de mayor tráfico, como son: Madrid-Valencia, con aproximadamente 6,2 millones de viajeros en ambos sentidos, y Madrid-Albacete, con 4,9 millones de viajes en ambos sentidos. Entre las de menor tráfico se cuelan Cuenca-Almería, con aproximadamente 23.500 y Cuenca-Tarragona, con 11.700 viajeros al año.

A partir de esta base de datos se procede a la modelización y la calibración del modelo de generación-atracción, lo que permitirá estimar la demanda en los diferentes años-horizonte de planificación.

2.2.2.2 Modelización de la demanda total

Conocida la demanda para el año base (2007), el siguiente paso consiste en relacionar estos valores de viajeros por rutas con aquellas variables que realmente influyen en la demanda; las llamadas variables explicativas.

Se trata pues de determinar el número total de viajes generados en un origen determinado y el número total de viajes atraídos por un destino, a partir de una serie de variables (variables explicativas). Los resultados obtenidos deben ajustarse a los datos reales recopilados. Para ello, es habitual relacionar el número de viajes con determinadas características socio-económicas de las zonas de estudio, ajustando el modelo de forma que éste se aproxime lo máximo posible a la realidad observada.

2.2.2.2.1 Modelos de generación y atracción

Los primeros modelos son los llamados métodos gravitatorios porque se inspiran en la ecuación de la gravedad de Newton. La expresión más simple supone que el tráfico entre dos núcleos es proporcional a la población de ambos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia:

$$T_{ij} = \frac{\alpha \times P_i \times P_j}{d_{ij}^2} \qquad (2.\ 1)$$

Donde:

- T_{ij}: tráfico entre i y j.
- P_i, P_j: poblaciones respectivas de los núcleos i y j.
- d_{ij}: distancia entre i y j.
- **¤**: factor de proporcionalidad, coeficiente a estimar.

Esta metodología es considerada hoy en día como demasiado simplista; algunos estudios revelan que la distancia al cuadrado no se comporta siempre como una resistencia al viaje. Tampoco hay nada que indique que la población tenga un papel proporcional.

Por ello, este modelo se ha ido modificando y generalizando, asumiendo determinados cambios. Uno de estos cambios consistió en remplazar el término distancia por una función decreciente que engloba todos los costes del viaje, no solo la distancia, sino también parámetros como el tiempo de viaje, tiempo de espera… Esta nueva función se expresa de la siguiente forma:

$$T_{ij} = \alpha \times O_i \times D_j \times f(C_{ij}) \qquad (2.\ 2)$$

Donde:

- **¤**: factor de proporcionalidad, coeficiente a estimar.
- O_i: caracteriza la generación del tráfico de desplazamiento desde la zona i.
- D_j: caracteriza la atracción de desplazamiento a la zona j,

- $f(C_{ij})$: función que caracteriza el coste de viaje entre origen y destino,
- α: coeficiente a estimar.

Se puede destacar el modelo de Wilson (Wilson, 1974) que es una versión mejorada del modelo gravitatorio simple. Este modelo plantea una fórmula más general que se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$\sum_j T_{ij} = O_i \qquad (2.\ 3)$$

$$\sum_j T_{ij} = D_j \qquad (2.\ 4)$$

$$\sum_i \sum_j T_{ij} = T = \sum_i O_i = \sum_j D_j \qquad (2.\ 5)$$

Donde:

- T_{ij}: movilidad entre origen y destino (tráfico).
- O_i: número total de viajes procedentes de i (Origen) y
- D_j: número de viajes que llegan a j (Destino).

En definitiva, esta teoría afirma que todos los viajes que salen de un origen i deben llegar a un destino j, y viceversa (Ortúzar & Willumsen, 2011). Este método también propone introducir una función de distancia que mida la impedancia (resistencia) al viaje entre i y j.

Por lo tanto, puede afirmarse que los modelos de generación consideran que el flujo entre dos zonas i y j es proporcional a los viajeros generados (generación) por la zona origen y a los atraídos (atracción) por la zona de destino, e inversamente proporcional al coste que supone este desplazamiento, variable denominada coste generalizado, que, a grandes rasgos, trata de cuantificar monetariamente el coste total del viaje.

Una de las formulaciones más empleadas combina la Generación/Atracción y también Distribución en la misma etapa y, por lo tanto, permite en la misma ecuación el cálculo de ambas fases de forma conjunta. Estos modelos se suelen ajustar a la situación de referencia (en el caso estudio año 2007) para reproducir los flujos en los diferentes años-horizontes. Este será, por tanto, el modelo empleado en este capítulo.

La formulación adoptada en este estudio se muestra a continuación:

$$V_{ij} = K \times \frac{\prod_n \left(VSE_{n,i} \times VSE_{n,j}\right)^{\alpha_n}}{f\left(CG_{ij}\right)^{\varphi}} \qquad (2.\ 6)$$

Donde:

- V_{ij}: número de viajes entre la zona i y la zona j.
- $VSE_{n,i/j}$: variable socio-económica relevante número "n" de cada zona i o j.
- K, α_n, φ: Parámetros a ajustar.
- $f(CG_{ij})$: Función de coste generalizado entre i y j, ponderada en función de todos los modos de transporte.

Variables socio-económicas (VSE)

Las variables socio-económicas más empleadas y con mayor influencia en la generación de viajes dentro de los modelos zonales son: número de habitantes de la zona, índice de motorización, indicadores económicos (PIB, renta per cápita…)

El modelo de atracción depende de las características de las zonas de destino, por lo tanto, las variables explicativas que permiten cuantificar estos tráficos son aquellas que se considera que están más ligadas con la atracción de viajes a una determinada zona: número de empleos totales y por sectores, plazas hoteleras y similar, PIB del sector turístico, existencia de grandes equipamientos (hospitales, centros comerciales, universidades etc.). La principal fuente de información de estas variables socio-económicas en España puede afirmarse que es el Instituto Nacional de Estadística (INE).

En el caso ejemplo utilizado en esta tesis, como variables exógenas o explicativas se han seleccionado: poblaciones, Producto Interior Bruto (PIB) de cada una de las regiones y tasa de motorización. Estas variables actuarán como input en el modelo de distribución espacial que, tras ser calibrado, podrá ser utilizado para hacer pronósticos de demanda.

A continuación se muestra una tabla (Tabla 15) con la evolución de las variables socio-económicas seleccionadas:

Tabla 15. Evolución de las variables socio-económicas seleccionadas para el modelo de distribución espacial.

	2005			2007			2011		
	Población	PIB 2005	Tasa de motorización (turismos) Destino	Población	PIB 2007	Tasa de motorización (turismos) Destino	Población	PIB 2011	Tasa de motorización (turismos) Destino
		Miles de €/año	vehículos		M€/año	vehículos		M€/año	vehículos
Albacete	159.518	5.906.763	157.214	164.771	6.567.351	171.789	171.390	7.156.994	180.765
Alicante	319.380	30.830.910	844.436	322.673	35.292.988	901.546	334.329	34.581.144	899.818
Almería	181.702	11.742.217	272.855	186.651	13.968.540	304.071	190.349	12.577.645	317.266
Barcelona	1.593.075	126.936.807	2.314.995	1.595.110	146.338.726	2.396.656	1.615.448	145.890.507	2.409.120
Castellón	167.455	12.129.481	254.431	172.624	13.817.826	279.708	180.114	13.059.935	285.142
Cuenca	49.912	3.291.015	89.058	52.980	3.877.835	97.672	56.703	3.876.032	104.514
Madrid	3.155.359	160.663.300	3.100.553	3.132.463	186.500.419	3.326.579	3.265.038	190.145.277	3.316.430
Murcia	409.810	23.262.279	613.009	422.861	27.100.446	673.379	442.203	27.854.629	692.012
Tarragona	128.152	17.329.824	328.314	134.163	20.234.182	359.252	134.085	21.424.247	373.713
Valencia	796.549	45.491.693	1.139.128	797.654	53.367.237	1.206.303	798.033	53.827.424	1.212.952

Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE) y Dirección General de Tráfico (DGT).

Coste generalizado (*Cgij*)

El coste generalizado cuantifica los costes (económicos o no) en los que incurren los viajeros al recibir un servicio de transporte. Es una medida que cuantifica la "desutilidad" o "resistencia" que puede suponer un desplazamiento para un individuo. En definitiva, se puede afirmar que el cálculo del coste generalizado permite entender o cuantificar el "esfuerzo" que realizan los viajeros a la hora de realizar un viaje.

Existen múltiples y diversas metodologías que estiman el coste generalizado pero, en esencia, los diferentes elementos que lo definen se pueden resumir en: precio que se paga por el transporte, otros costes asociados al viaje (comidas a bordo, desplazamientos complementarios…), tiempo empleado en sus diferentes fases (incluyendo obtención de los billetes, esperas en terminales o estaciones, viaje en el vehículo…) e incomodidades físicas relacionadas con el viaje (falta de confort, movimiento de equipajes…).

La expresión utilizada aquí para el cálculo del coste generalizado, ha sido obtenida del estudio (MCRIT SL, 2012) y presenta la siguiente formulación:

$$Cg_{ij} = Cd_{ini} + \frac{COp \times L}{Ocupación} + Tarifa \times L + Cd_{fin} + T_{disp} \times V_0 T_{disp} + T_{antelación} \times V_0 T_{antelación} + T_{abordo} \times V_0 T_{abordo} \times K_{conf} + T_{AiD} \times V_0 T_{AiD} \quad (2.7)$$

Donde:

- Cd_{ini}: coste directo inicial de acceso al modo de transporte (€).
- Cd_{fin}: coste directo final de dispersión del modo de transporte (€).
- CO_p: costes operativos de funcionamiento del vehículo privado (€/km).
- Ocupación: en el vehículo privado, el coste del viaje se divide entre los ocupantes del vehículo (viajeros/vehículo).
- Tarifa: tarifa kilométrica del modo de transporte (€/km).
- L: longitud de recorrido (km).
- T_{dis}: tiempo de espera según disponibilidad de servicio (horas).
- $T_{antelación}$: tiempo entre la llegada a la estación/aeropuerto y el inicio del servicio (horas).
- T_{abordo}: tiempo abordo del modo de transporte (horas).
- T_{AiD}: tiempo de acceso y dispersión al modo (horas).
- VoT: valor del tiempo (euros/h), este valor difiere según la fase del viaje en la que se encuentre el viajero.
- K_{conf}: factor de comodidad.

En definitiva, el coste generalizado se divide en dos componentes:

- Costes monetarios (euros).
- Costes no monetarios (tiempo).

En cuanto a los costes monetarios, se dividen en los siguientes componentes:

- Coste de acceso al modo: coste por acceder al modo de transporte (taxi, billete de metro, autobús…)
- Coste del viaje: precio del billete para transportes colectivos y costes operativos (carburante…) y peaje en el caso de transporte con vehículo privado.
- Costes de acceso al modo de transporte hasta el destino: costes por acceder al punto final del viaje (taxi, billete autobús…).
- Los costes no monetarios se pueden definir como:
- Acceso al modo de transporte: tiempo que se emplea entre el origen del viaje y el modo de transporte escogido (estación de bus, parking, aeropuerto…).
- Disponibilidad del servicio: hace referencia al tiempo de espera asociado a la oferta del servicio de cada modo de transporte. En definitiva, representa el tiempo esperando la oportunidad de viajar.
- Tiempo de antelación: tiempo, previo a la salida del servicio, que el viajero planifica para llegar a la estación/aeropuerto.
- Tiempo de viaje: tiempo de desplazamiento a bordo del vehículo.
- Acceso al modo de transporte hasta el destino: tiempo desde la llegada a destino (por ejemplo, una estación, terminal…) hasta el destino final del usuario.

Como se observa en la ecuación que estima el coste generalizado el tiempo juega un papel fundamental en la resistencia de los viajeros a viajar, de ahí que sea necesario un análisis detallado.

Tiempo de viaje y valor del tiempo

El cliente tiene que sacrificar parte de su tiempo para recibir un servicio. No solo hay que pagar el billete, sino que también debe aportar tiempo. El término "tiempo generalizado" no solo se refiere al tiempo que se aporta en un desplazamiento o viaje (tiempo que el individuo pasa dentro del vehículo) sino que también contempla el tiempo que el viajero dedica al proceso de viajar, es decir, el tiempo que se emplea desde que sale de casa, oficina… hasta que llega a su destino final.

Por lo tanto, ¿qué se entiende por valor del tiempo? Es la máxima cantidad de dinero que un individuo está dispuesto a pagar por una determinada cantidad de tiempo o, más

bien, es la máxima cantidad de dinero que una persona está dispuesta a pagar por ahorrar una cantidad de tiempo (García Álvarez & et al., 2012).

Cuantificar el "valor del tiempo" es una tarea compleja ya que cada individuo lo valora de una manera diferente e incluso, dependiendo de determinadas situaciones, una misma persona puede valorarlo de distinta manera. Por ejemplo, el tiempo parece que se hace "más largo" en momentos más desagradables y pasa "más rápido" en momentos más placenteros.

La percepción del tiempo que tienen los viajeros también varía según la fase del viaje en la que se encuentren. Por ejemplo, los tiempos de acceso (llegada a estaciones o aeropuertos, tiempo de espera…) tienen un mayor coste para el individuo, aunque en la mayoría de las ocasiones, la duración es mucho menor que el tiempo que el viajero pasa a bordo del vehículo. Otra causa que afecta a la percepción del viajero es la frecuencia con la que se realice el viaje, es decir, se valora mucho un viaje que se realiza todos los días y relativamente menos si se realiza una vez al año. Tampoco es lo mismo si el viaje se realiza por negocios o por ocio.

Una de las primeras investigaciones sobre las diferencias en el valor del tiempo en las distintas fases del viaje es la llevada a cabo por (Mohring, 1972) que diferenció, dentro del transporte en autobús, el tiempo de tránsito y el tiempo de espera. A partir de este estudio de investigación, la estimación del valor del tiempo en sus diferentes fases, ha sido ámbito de múltiples estudios, pudiéndose destacar, dentro del sector ferroviario, el desarrollado por (García Álvarez & et al., 2012). En él se propone introducir diferentes coeficientes de ponderación para cada una de las fases del viaje, reflejando mayor coste unitario si una de las fases resulta "más molesta" que las otras. Este estudio considera también diferentes valores de tiempo según modos de transporte y motivo de viaje.

El caso ejemplo que aquí se estudia considera un usuario medio (modelo agregado), es decir, no valora diferentes tipos de viajeros según motivo del viaje, por lo que se le asigna un valor del tiempo único con independencia del tipo de transporte que se utilice. Se han tomado los siguientes valores del estudio (MCRIT SL, 2012):

- Valor del tiempo de espera según disponibilidad del servicio: VoT_{disp}=30 €/hora.
- Valor del Tiempo entre la llegada a la estación/aeropuerto y el inicio del servicio: $VoT_{antelación}$= 30 €/hora.
- Valor Tiempo a bordo del modo de transporte: VoT_{abordo} = 15 €/hora.
- Valor del Tiempo de acceso y dispersión al modo: VoT_{AiD} = 15 €/hora.

Disponibilidad del servicio

Dentro de las fases del tiempo de viaje se destaca, también el tiempo de disponibilidad del servicio. Esta fase del tiempo hace referencia al tiempo que el viajero, de media, espera para viajar. Está claramente relacionado con el número de posibilidades que tiene para realizar el viaje.

En el caso del vehículo privado, podría afirmarse que las oportunidades horarias para viajar, son casi infinitas, de ahí que este parámetro se considere cero, es decir, generalmente los viajeros del coche no esperan para realizar el viaje. Pero, en los modos colectivos, los horarios están definidos con antelación y, por lo tanto, las oportunidades para viajar están limitadas. Se observa pues que, en determinados modos de transporte, el tiempo de espera o disponibilidad está relacionado con el número de servicios que se ofertan (frecuencias).

La estimación de este tiempo en la fase de diseño de la infraestructura, puede abordarse de dos formas diferentes: (i) definiendo un valor fijo o (ii) fijando unas frecuencias determinadas a partir de las cuales se estima el tiempo de espera. También se puede elegir ambas opciones como se hace para este estudio. En aquellas relaciones que tengan altas frecuencias es necesario calcular el tiempo de espera y para ello se utiliza la siguiente expresión:

$$T_{espera} = \left(\frac{14}{Frecuencia} \times \frac{1}{2}\right) \times 60 \qquad (2.\ 8)$$

Donde:

- T_{espera} o T_{dis}: tiempo de espera según disponibilidad de servicio (horas).
- Frecuencia: número de servicios al día ofertados por el operador de transporte.

Si la oferta es baja (pocas frecuencias), se obtendría tiempos de espera muy altos utilizando la ecuación (2. 8), lo que en realidad no ocurre. Es decir, un viajero no suele acercarse a la estación, por ejemplo, cuatro horas antes de la hora de partida. De ahí que se limite el tiempo de espera y se defina como un valor fijo. Se considera que un viajero, como máximo, espera un tiempo de 100 minutos para el caso de ferrocarriles y autobuses y 150 minutos en el caso del sector aéreo, entendiendo que la espera en los aeropuertos es mayor que el caso de las estaciones tanto de tren como de autobuses.

Retomando el tema del coste generalizado, la ecuación (2. 7) que permite su estimación, refleja que, además de la distancia (longitud de la línea), existen otras variables que generan un coste al viajero. Al existir diferencias entre los diferentes modos de transporte, resulta más sencillo especificar los valores que recogen estas variables para cada modo por separado. Todos y cada uno de estos valores han sido incluidos en el Anejo 3 de esta tesis.

La tabla que se muestra a continuación (Tabla 16) resume todos los resultados obtenidos para cada modo que presta servicio en el corredor que es ámbito de estudio en este capítulo (corredor de Levante):

Tabla 16. Coste generalizado (euros) para cada relación y cada modo de transporte.

Origen	Destino	Coche	Autobus	Ferr. Conv	Avión	Tren AV	Promedio 2007	Origen	Destino	Coche	Autobus	Ferr. Conv	Avión	Tren AV	Promedio 2007
ALBACETE	ALICANTE	67,71	95,72	128,10	0,00	114,59	73,90	CUENCA	ALBACETE	69,63	138,32	175,34	0,00	104,53	70,70
ALBACETE	ALMERÍA	121,50	191,45	246,59	0,00	171,33	127,63	CUENCA	ALICANTE	118,15	190,16	206,13	0,00	144,12	122,68
ALBACETE	BARCELONA	208,60	244,89	223,48	0,00	200,66	213,64	CUENCA	ALMERÍA	171,94	247,55	288,93	0,00	200,86	178,02
ALBACETE	CASTELLÓN	101,25	129,59	146,06	0,00	134,87	103,89	CUENCA	BARCELONA	213,47	257,99	250,72	0,00	203,54	217,49
ALBACETE	CUENCA	68,44	105,09	166,26	0,00	104,53	69,01	CUENCA	CASTELLÓN	106,13	173,09	173,30	0,00	137,75	110,34
ALBACETE	MADRID	91,87	145,01	159,02	0,00	148,65	106,83	CUENCA	MADRID	65,73	102,98	148,39	0,00	119,12	78,30
ALBACETE	MURCIA	59,18	83,62	127,61	0,00	124,42	60,96	CUENCA	MURCIA	109,63	180,98	228,72	0,00	153,95	110,67
ALBACETE	TARRAGONA	163,33	210,74	192,10	0,00	177,07	171,74	CUENCA	TARRAGONA	168,21	223,92	233,31	0,00	179,97	173,24
ALBACETE	VALENCIA	73,58	107,88	128,12	0,00	119,70	82,03	CUENCA	VALENCIA	84,45	153,33	155,36	0,00	122,59	102,86
ALICANTE	ALBACETE	67,07	133,34	124,25	0,00	114,59	75,69	MADRID	ALBACETE	91,89	145,01	159,02	0,00	148,65	106,78
ALICANTE	ALMERÍA	104,98	165,64	292,29	0,00	140,18	112,02	MADRID	ALICANTE	140,42	188,17	189,59	161,81	160,74	158,81
ALICANTE	BARCELONA	207,41	214,66	236,48	180,31	173,58	206,10	MADRID	ALMERÍA	180,89	226,66	247,94	198,92	217,48	197,32
ALICANTE	CASTELLÓN	100,08	128,69	153,42	0,00	135,29	109,31	MADRID	BARCELONA	226,53	239,05	231,30	164,12	247,66	195,80
ALICANTE	CUENCA	117,78	189,71	209,27	0,00	144,12	122,30	MADRID	CASTELLÓN	144,16	197,63	215,26	0,00	181,87	156,26
ALICANTE	MADRID	140,75	188,56	189,59	163,04	160,74	159,14	MADRID	CUENCA	65,43	102,59	148,39	0,00	119,12	76,82
ALICANTE	MURCIA	42,67	66,61	110,79	0,00	93,27	44,33	MADRID	MURCIA	131,89	161,86	195,98	211,43	170,57	149,60
ALICANTE	TARRAGONA	162,16	184,60	206,73	0,00	177,51	171,06	MADRID	TARRAGONA	193,38	223,15	206,03	0,00	224,09	201,73
ALICANTE	VALENCIA	72,42	96,88	130,49	0,00	120,13	82,76	MADRID	VALENCIA	122,81	164,20	189,59	140,03	139,21	139,81
ALMERÍA	ALBACETE	121,20	191,26	245,77	0,00	171,33	127,18	MURCIA	ALBACETE	58,82	100,80	127,06	0,00	124,42	60,85
ALMERÍA	ALICANTE	104,51	153,25	292,84	0,00	140,18	110,17	MURCIA	ALICANTE	42,13	67,59	107,77	0,00	93,27	43,99
ALMERÍA	BARCELONA	283,74	323,90	418,88	270,62	230,32	285,73	MURCIA	ALMERÍA	81,92	129,00	291,63	0,00	121,91	84,82
ALMERÍA	CASTELLÓN	176,39	238,99	310,81	0,00	192,02	184,54	MURCIA	BARCELONA	221,35	234,34	256,40	0,00	210,91	227,70
ALMERÍA	CUENCA	171,91	247,62	287,83	0,00	200,86	178,00	MURCIA	CASTELLÓN	114,01	145,28	182,64	0,00	145,12	116,90
ALMERÍA	MADRID	181,78	227,37	247,94	199,03	217,48	197,31	MURCIA	CUENCA	109,20	180,52	232,02	0,00	153,95	110,24
ALMERÍA	MURCIA	81,56	128,67	296,75	0,00	121,91	84,47	MURCIA	MADRID	132,17	162,25	195,98	211,48	170,57	148,35
ALMERÍA	TARRAGONA	238,80	283,20	356,84	0,00	234,24	247,80	MURCIA	TARRAGONA	176,09	204,44	227,76	0,00	187,33	185,95
ALMERÍA	VALENCIA	148,74	205,78	292,86	0,00	176,86	155,74	MURCIA	VALENCIA	86,35	112,15	152,21	0,00	129,95	91,75
BARCELONA	ALBACETE	209,66	253,88	218,80	0,00	200,66	214,47	TARRAGONA	ALBACETE	164,38	220,05	193,20	0,00	177,07	173,43
BARCELONA	ALICANTE	208,52	226,89	235,66	181,63	173,58	207,60	TARRAGONA	ALICANTE	163,23	208,81	207,28	0,00	177,51	173,82
BARCELONA	ALMERÍA	285,60	325,72	405,68	200,91	257,82	263,73	TARRAGONA	ALMERÍA	240,32	291,83	358,21	0,00	234,24	251,00
BARCELONA	CASTELLÓN	128,17	141,31	154,66	0,00	140,79	137,67	TARRAGONA	BARCELONA	57,67	86,58	107,53	0,00	98,57	111,14
BARCELONA	CUENCA	213,36	257,75	251,66	0,00	203,54	217,36	TARRAGONA	CASTELLÓN	82,89	136,48	126,56	0,00	117,22	99,06
BARCELONA	MADRID	224,66	237,17	231,30	165,25	247,66	196,02	TARRAGONA	CUENCA	168,07	223,91	226,05	0,00	179,97	173,11
BARCELONA	MURCIA	220,65	240,09	264,01	0,00	210,91	228,53	TARRAGONA	MADRID	193,12	223,15	194,91	0,00	224,09	197,14
BARCELONA	TARRAGONA	58,90	87,63	105,10	0,00	98,57	109,17	TARRAGONA	MURCIA	177,68	224,86	238,41	0,00	187,33	189,04
BARCELONA	VALENCIA	154,64	178,33	178,18	0,00	155,95	162,84	TARRAGONA	VALENCIA	109,36	139,50	150,90	0,00	132,38	121,53
CASTELLÓN	ALBACETE	105,51	130,43	150,19	0,00	134,87	107,97	VALENCIA	ALBACETE	72,54	131,21	126,74	0,00	119,70	82,32
CASTELLÓN	ALICANTE	100,59	129,14	158,53	0,00	135,29	110,67	VALENCIA	ALICANTE	72,15	96,49	132,64	0,00	120,13	83,36
CASTELLÓN	ALMERÍA	177,67	248,24	311,91	0,00	192,02	187,03	VALENCIA	ALMERÍA	149,23	213,17	291,76	0,00	176,86	157,04
CASTELLÓN	BARCELONA	128,27	141,57	158,51	0,00	140,79	139,70	VALENCIA	BARCELONA	153,98	148,98	181,48	0,00	155,95	162,05
CASTELLÓN	CUENCA	105,43	172,24	179,74	0,00	137,75	109,62	VALENCIA	CASTELLÓN	46,64	87,83	95,45	0,00	90,16	49,25
CASTELLÓN	MADRID	144,51	176,08	215,26	0,00	181,87	154,09	VALENCIA	CUENCA	83,63	152,48	159,60	0,00	122,59	105,08
CASTELLÓN	MURCIA	115,36	146,65	183,08	0,00	145,12	118,24	VALENCIA	MADRID	122,72	164,20	189,59	140,03	139,21	138,86
CASTELLÓN	TARRAGONA	83,01	112,67	127,66	0,00	117,22	97,90	VALENCIA	MURCIA	86,92	139,60	171,95	0,00	129,95	94,68
CASTELLÓN	VALENCIA	46,71	92,83	97,93	0,00	90,16	49,52	VALENCIA	TARRAGONA	109,05	118,17	148,43	0,00	132,38	118,67

Fuente: Elaboración propia.

Se puede afirmar que, prácticamente en todas las relaciones, el coste generalizado del vehículo privado es el más bajo y esto se debe, principalmente, a que su tiempo generalizado corresponde al tiempo de desplazamiento (T_{abordo}), lo que elimina de la ecuación parámetros tales como el tiempo de espera ($T_{disponibilidad}$) y el tiempo de antelación.

Si se analiza o compara el coste entre los diferentes modos de transporte (avión, tren de alta velocidad y autobús), puede afirmarse que toma valores similares, ya que las condiciones o hipótesis de entrada (tiempo de antelación, tiempo de espera…) son parecidas. Se observa una pequeña reducción de los costes del tren de alta velocidad en relación al autobús en prácticamente todas las relaciones debido, principalmente, a que la velocidad media utilizada para el caso de la alta velocidad es de 220km/h y esto hace que los tiempos de desplazamiento (T_{abordo}) sean muy reducidos.

Entre el tren y el avión no es posible afirmar que en todos los escenarios un modo presente un coste inferior al otro. Se observa que, aunque el tiempo de viaje en todas las relaciones en las que coexisten ambos modos de transporte, el avión es más competitivo y, por lo tanto, podría suponer un coste generalizado menor, se comprueba que la combinación del tiempo de espera y el tiempo de antelación compensan esta ventaja. Por ello, se puede afirmar que en aquellas relaciones en las que el tiempo de espera es alto, el avión pierde competitividad con el tren de alta velocidad (considerando una velocidad media de 220km/h). El tiempo de espera es un término que marca la competitividad entre estos modos de transporte.

Una vez calculado el coste generalizado para cada uno de los modos de transporte, se calcula el promedio en cada una de las relaciones teniendo en cuenta todos los modos de transporte menos alta velocidad (ya que en el año 2007 no existía este servicio, por lo que, no puede ser considerado para la calibración del modelo). En definitiva, esta ponderación se realiza en función del número de viajeros (Tabla 14).

2.2.2.2.2 Calibración del modelo

Conocidas las variables socio-económicas (Tabla 15), la demanda total en cada uno de los trayectos (Tabla 14) y el coste generalizado (Tabla 16), todos ellos referentes al año 2007, la calibración del modelo gravitatorio se realiza mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO).

Para poder utilizar el método de mínimos cuadrados ordinarios en el modelo gravitatorio descrito anteriormente (ecuación (2. 6)), primero es necesario linealizarlo. Para ello, se han empleado logaritmos naturales, quedando la ecuación (2. 6) de la siguiente forma:

$$LnV_{ij} = LnK + \alpha \times Ln\left(P_i \times P_j\right) + \beta \times Ln\left(PIB_i \times PIB_j\right) + \gamma \times Ln\left(TM_i \times TM_j\right) + \varphi \times Ln(Cg) \quad (2.\ 9)$$

Donde:

- V_{ij}: número de viajes entre la zona i y la zona j.
- Pi, P_j: población activa de la zona i (origen) y j (destino) respectivamente.
- PIBi, PIB_j: Producto Interior Bruto (PIB) de las zonas i y j.
- TMi, TM_j: tasa de motorización de las zonas i, j.
- K, ◘ ◘, ◘: parámetros a ajustar.
- Cg: función de coste generalizado entre i y j, ponderada en función de los viajeros.

La ecuación ((2. 9)) tiene ahora la forma de una función de regresión lineal múltiple, y, por lo tanto, ya puede utilizarse el modelo de mínimos cuadrados para obtener el valor de los parámetros a ajustar que permiten calibrar el modelo.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \times X_1 + \beta_2 \times X_2 + \beta_3 \times X_3 \qquad (2.\ 10)$$

Resultados del análisis de regresión múltiple

Una vez especificado el método a emplear (mínimos cuadrados ordinarios), el modelo empleado (ecuación (2. 6)) y los datos de entrada (demanda total, variables socio-económicas y coste generalizado ponderado), se procede al cálculo de los coeficientes o parámetros de ajuste.
A continuación, se muestran los valores obtenidos tras la calibración.

Tabla 17. Valores estimados de los coeficientes que calibran el modelo gravitatorio empleado para estimar la demanda en el corredor de Levante.

	Coeficiente	*Desv. Típica*	*Estadístico t*	*p-value*
Const	-4,3729	1,768	-2,4733	0,01538
Ln(Pi_Pj)	0,5110	0,140	3,6454	0,00046
Ln(PIBi_PIBj)	0,5786	0,210	2,7542	0,0072
Ln(TMi_TMj)	-0,1186	0,155	-0,7640	0,44696
LnCg_ponderado	-2,6079	0,163	-1,5994	<0,00001

Media de la vble. dep.	12,60	D.T. de la vble. dep.	1,729
Suma de cuad. residuos	28,46	D.T. de la regresión	0,579
R-cuadrado	0,89	R-cuadrado corregido	0,888
F(4, 85)	177,45	Valor p (de F)	2,14E-40
Log-verosimilitud	-75,89	Criterio de Akaike	161,8
Criterio de Schwarz	174,28	Crit. de Hannan-Quinn	166,8

Fuente: Se emplea el software Gretl para el cálculo de la regresión lineal múltiple.

El análisis de regresión múltiple mediante mínimos cuadrados ha proporcionado un coeficiente de determinación más que aceptable: R^2=0.89 y R^2 ajustado= 0,88 y, por lo tanto, se puede dar por válido el ajuste.

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación (2. 9), se obtiene la ecuación (2. 11), que es la expresión calibrada del modelo en su forma log – lineal.

$$LnV_{ij} = -4{,}37291 + 0{,}510957 \times Ln\left(P_i \times P_j\right) + 0{,}578638 \times Ln\left(PIB_i \times PIB_j\right) - 0{,}118604 \times Ln\left(TM_i \times TM_j\right) - 2{,}607 \times Ln(Cg) \qquad (2.\ 11)$$

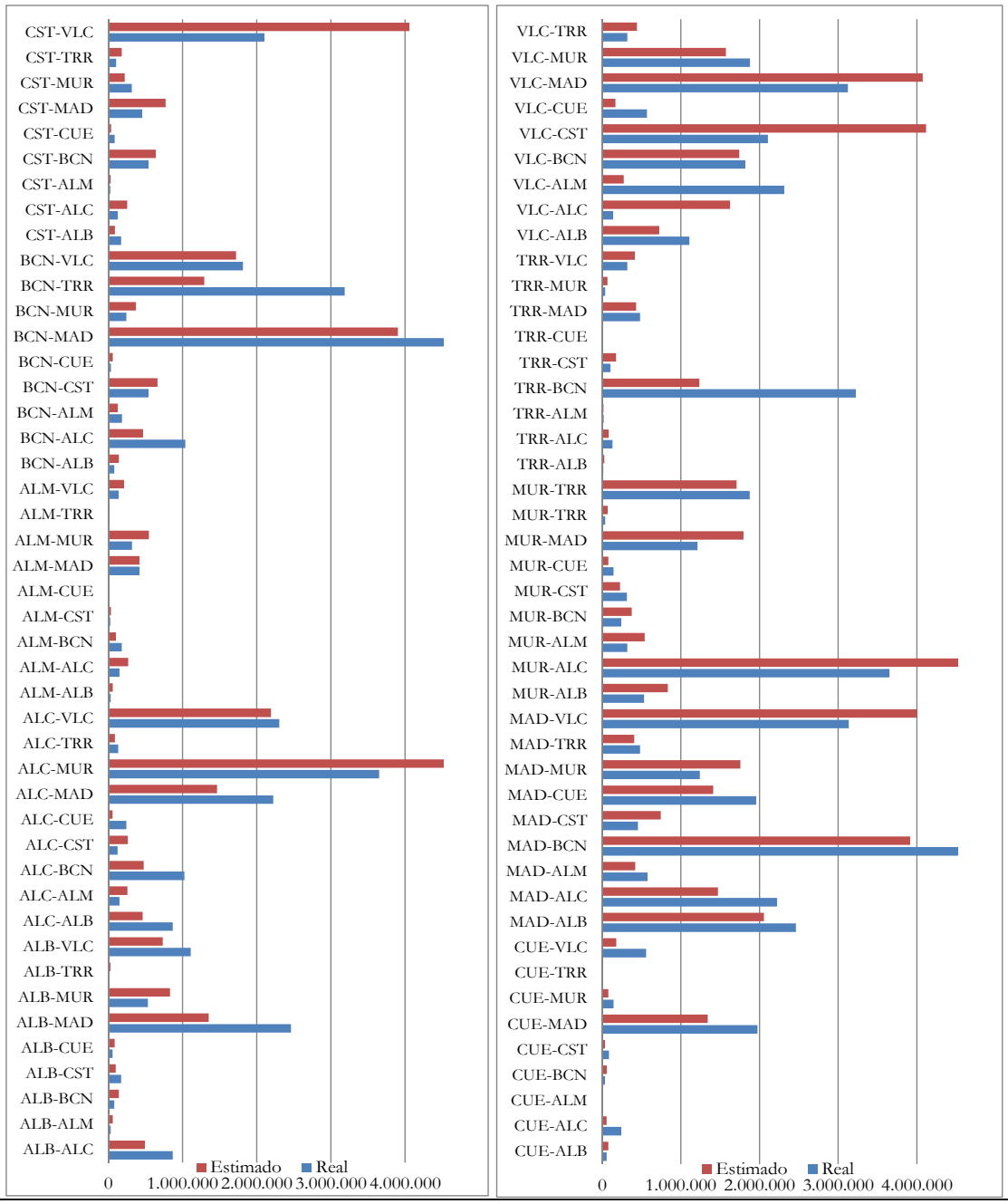
Mientras que la expresión calibrada del modelo en su forma original queda de la siguiente forma:

$$V_{ij} = 0{,}0126 \times \left(P_i \times P_j\right)^{0{,}510957} \times \left(PIB_i \times PIB_j\right)^{0{,}578638} \times \left(TM_i \times TM\right)^{-0{,}118604} \times (Cg)^{-2{,}607} \qquad (2.\ 12)$$

A partir de esta ecuación (2. 12) se estiman los flujos para todas las relaciones lo que permite comprobar el ajuste del modelo a los datos observados. La tabla que se muestra a continuación (Tabla 18) resume los datos obtenidos y su variación con los valores reales de cada una de las relaciones.

Tabla 18. Resultados de la calibración del modelo gravitatorio en el corredor de Levante.

Real	Estimado	Diferencias	% Error
79.409.695	78.507.057	902.638	1,14%



Fuente: Elaboración propia

Puede observarse que el modelo se ajusta muy bien a los datos reales, el error global cometido en la estimación es de sólo un 1,14% y, por lo tanto, puede afirmarse que el modelo generación-distribución se ajusta muy bien a la realidad observada.

2.2.2.2.3 Prognosis de la demanda

Una vez que el modelo ha sido calibrado y se conoce la evolución de las variables socio-económicas para los sucesivos años, es posible realizar una prognosis del tráfico para

el año 2011 (año que se ha considerado base para el cálculo del reparto modal). La estimación del posible tráfico en el momento de la puesta en servicio es indispensable para la determinación de la demanda que tiene que atender el ferrocarril de alta velocidad.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la demanda estimada para el año 2011 a partir del modelo gravitacional calibrado.

Tabla 19. Demanda estimada de todos los modos de transporte para el año 2011 en el corredor de Levante.

Origen	Destino	Demanda Total Estimada 2011	Origen	Destino	Demanda Total Estimada 2011
ALBACETE	ALICANTE	529.255	CUENCA	ALBACETE	85.548
ALBACETE	ALMERÍA	59.554	CUENCA	ALICANTE	58.928
ALBACETE	BARCELONA	151.021	CUENCA	ALMERÍA	10.633
ALBACETE	CASTELLÓN	101.292	CUENCA	BARCELONA	61.298
ALBACETE	CUENCA	89.789	CUENCA	CASTELLÓN	36.820
ALBACETE	MADRID	1.458.146	CUENCA	MADRID	1.394.284
ALBACETE	MURCIA	897.262	CUENCA	MURCIA	80.570
ALBACETE	TARRAGONA	30.962	CUENCA	TARRAGONA	12.872
ALBACETE	VALENCIA	783.747	CUENCA	VALENCIA	184.721
ALICANTE	ALBACETE	487.230	MADRID	ALBACETE	1.461.823
ALICANTE	ALMERÍA	242.145	MADRID	ALICANTE	1.505.201
ALICANTE	BARCELONA	479.949	MADRID	ALMERÍA	407.130
ALICANTE	CASTELLÓN	256.705	MADRID	BARCELONA	4.037.212
ALICANTE	CUENCA	58.426	MADRID	CASTELLÓN	744.019
ALICANTE	MADRID	1.492.507	MADRID	CUENCA	1.446.023
ALICANTE	MURCIA	5.957.183	MADRID	MURCIA	1.838.256
ALICANTE	TARRAGONA	90.527	MADRID	TARRAGONA	433.361
ALICANTE	VALENCIA	2.215.682	MADRID	VALENCIA	4.154.764
ALMERÍA	ALBACETE	59.507	MURCIA	ALBACETE	903.786
ALMERÍA	ALICANTE	250.879	MURCIA	ALICANTE	6.107.177
ALMERÍA	BARCELONA	96.764	MURCIA	ALMERÍA	525.256
ALMERÍA	CASTELLÓN	30.966	MURCIA	BARCELONA	388.615
ALMERÍA	CUENCA	10.377	MURCIA	CASTELLÓN	226.269
ALMERÍA	MADRID	402.679	MURCIA	CUENCA	80.425
ALMERÍA	MURCIA	524.245	MURCIA	MADRID	1.882.183
ALMERÍA	TARRAGONA	16.278	MURCIA	TARRAGONA	76.465
ALMERÍA	VALENCIA	201.389	MURCIA	VALENCIA	1.778.196
BARCELONA	ALBACETE	147.480	TARRAGONA	ALBACETE	29.573
BARCELONA	ALICANTE	465.465	TARRAGONA	ALICANTE	85.245
BARCELONA	ALMERÍA	118.831	TARRAGONA	ALMERÍA	15.580
BARCELONA	CASTELLÓN	643.883	TARRAGONA	BARCELONA	1.267.272
BARCELONA	CUENCA	59.684	TARRAGONA	CASTELLÓN	175.050
BARCELONA	MADRID	3.966.530	TARRAGONA	CUENCA	12.453
BARCELONA	MURCIA	378.680	TARRAGONA	MADRID	450.405
BARCELONA	TARRAGONA	1.336.614	TARRAGONA	MURCIA	71.574
BARCELONA	VALENCIA	1.736.178	TARRAGONA	VALENCIA	429.195
CASTELLÓN	ALBACETE	91.759	VALENCIA	ALBACETE	761.219
CASTELLÓN	ALICANTE	249.486	VALENCIA	ALICANTE	1.615.111
CASTELLÓN	ALMERÍA	30.255	VALENCIA	ALMERÍA	258.131
CASTELLÓN	BARCELONA	629.233	VALENCIA	BARCELONA	1.747.434
CASTELLÓN	CUENCA	36.964	VALENCIA	CASTELLÓN	3.994.065
CASTELLÓN	MADRID	772.127	VALENCIA	CUENCA	168.817
CASTELLÓN	MURCIA	219.399	VALENCIA	MADRID	4.141.856
CASTELLÓN	TARRAGONA	184.539	VALENCIA	MURCIA	1.601.719
CASTELLÓN	VALENCIA	4.021.592	VALENCIA	TARRAGONA	456.919

Fuente: Elaboración propia.

El volumen de tráfico en el total del corredor se incrementó aproximadamente un 1%, pasando de 78,5 millones de viajeros en 2007 a 79,2 millones en 2011. Además, se estiman, para el año 2011, grandes volúmenes de tráficos como por ejemplo Castellón-Valencia (4 millones de viajeros) o Madrid-Valencia (4,1 millones), rutas en las que el ferrocarril de alta velocidad puede ser muy competitivo.

Los cálculos aquí obtenidos presentan una buena imagen del tráfico por el que los diferentes modos de transporte pueden competir, de ahí que el siguiente paso consista en determinar la cuota de mercado de cada modo, para determinar, posteriormente, el número de viajeros que transporta cada uno de ellos.

2.2.2.3 Modelo de reparto modal

Conocida la demanda total del corredor y de cada una de las relaciones, es necesario determinar el número de pasajeros que atendería cada modo de transporte debido a su oferta. Para ello, se emplean los modelos de reparto modal. Puede afirmarse que la elección de un modo de transporte está íntimamente relacionada con la percepción que tienen los viajeros sobre las ventajas que tiene el modo elegido, frente a los demás modos de transporte. Según (García Álvarez, 2008) *"La demanda de transporte, en general, será mayor cuanto más valor aporte a la persona que se dispone a viajar y cuanto menor sea el esfuerzo de todo tipo que se requiera para obtener este valor".*

Existen diferentes metodologías que permiten el cálculo de la cuota de mercado en una relación determinada, entre ellos se puede destacar los modelos *"Logit"* y los modelos *"Probit"*.

2.2.2.3.1 Modelo Logit

Posiblemente sea uno de los modelos más utilizados y a la vez más interesantes para el cálculo de la elección modal, cuya expresión más común es la mostrada en la ecuación (2. 13).

$$P_i = \frac{exp(\beta \times C_{gi})}{\sum_{j=1}^{n} exp(\beta \times C_{gj})} \qquad (2.\ 13)$$

Donde:

- P_i: probabilidad de elección de un modo de transporte.
- C_{gi}: coste generalizado de viaje con el modo.
- "j"; n: modos de transporte.
- **¤**: parámetro de sensibilidad del modelo.

Estos modelos se basan en el concepto de la utilidad aleatoria, es decir, que cada individuo elegirá aquélla opción (modo de transporte) que le proporcione el mayor nivel de utilidad (García Álvarez & et al., 2012). Al existir distintas opciones o niveles de tiempo, dinero o molestias, se entiende que el viajero elige la de "menos" tiempo, "menos" coste, etc., por lo que se puede hablar de desutilidad, término que se identifica y es una evolución del concepto llamado "coste generalizado".

Los modelos logit presentan algunas desventajas o problemas de resolución con respecto a otros modelos, por ejemplo, cuando hay variaciones en las preferencias de los viajeros, es decir, si la percepción de los costes varía con el ingreso y no se ha medido esta tendencia, estos modelos son incapaces de tenerla en cuenta. Los modelos que sí pueden solventar estos problemas son los llamados modelos probit.

2.2.2.3.2 Modelo probit

El modelo probit puede entenderse derivado de una distribución normal multivariada. Aunque estos modelos tienen la capacidad de solventar los problemas que presentan los modelos logit, presentan grandes dificultades para resolverlos. Autores como (Ortúzar & Willumsen, 2011) afirman que: *"Cuando fuera posible implementar un modelo probit, su completa generalidad sería un lujo innecesario".*

Una vez analizadas las diferentes características de los modelos de reparto modal más utilizados, se decide emplear un modelo logit para el caso ejemplo que se está desarrollando en este estudio.

Como puede observarse, estos modelos dependen principalmente del coste generalizado de cada uno de los modos de transporte (valores calculados anteriormente Tabla 16). Así pues, conocido éste, se procede al cálculo de la cuota de mercado en cada relación.

En primer lugar, se determina la cuota de mercado sin actuación, es decir, en la situación en la que no se construye el proyecto para, posteriormente, determinar la cuota de mercado de todos los modos de transporte que compiten en cada una de las rutas cuando el proyecto (infraestructura de alta velocidad) se construye. Es importante mencionar que, en este caso ejemplo, se considera que con la aparición de la infraestructura de alta velocidad desaparecen los servicios convencionales de ferrocarril, suponiendo que la competencia en el corredor se produce solamente entre el vehículo privado, el autobús, el avión y el tren de alta velocidad.

En cuanto al parámetro de ajuste o de sensibilidad ß del modelo, presente en la ecuación (2. 13) toma el valor ß=0,05, valor estimado en el proyecto Mcrit (MCRIT SL, 2012). Este parámetro ha sido contrastado y calibrado a partir de 30 relaciones de oferta y demanda de la red ferroviaria española para el año 2007.

A continuación se muestra (Tabla 20) el reparto modal en la situación en la que el nuevo proyecto aún no se ha llevado a cabo (sin actuación).

Tabla 20. Reparto modal (sin actuación)

Sin Actuación											
Origen	Destino	% Coche	% Autobus	% Ferr. Conv	% Avión	Origen	Destino	% Coche	% Autobus	% Ferr. Conv	% Avión
ALBACETE	ALICANTE	77,2%	19,0%	3,8%	0,0%	CUENCA	ALBACETE	96,4%	3,1%	0,5%	0,0%
ALBACETE	ALMERÍA	96,9%	2,9%	0,2%	0,0%	CUENCA	ALICANTE	96,2%	2,6%	1,2%	0,0%
ALBACETE	BARCELONA	61,0%	9,9%	29,0%	0,0%	CUENCA	ALMERÍA	97,5%	2,2%	0,3%	0,0%
ALBACETE	CASTELLÓN	74,1%	18,0%	7,9%	0,0%	CUENCA	BARCELONA	79,2%	8,5%	12,3%	0,0%
ALBACETE	CUENCA	85,7%	13,7%	0,6%	0,0%	CUENCA	CASTELLÓN	93,5%	3,3%	3,3%	0,0%
ALBACETE	MADRID	90,5%	6,3%	3,2%	0,0%	CUENCA	MADRID	85,4%	13,3%	1,4%	0,0%
ALBACETE	MURCIA	75,3%	22,2%	2,5%	0,0%	CUENCA	MURCIA	97,0%	2,7%	0,3%	0,0%
ALBACETE	TARRAGONA	75,1%	7,0%	17,8%	0,0%	CUENCA	TARRAGONA	90,9%	5,6%	3,5%	0,0%
ALBACETE	VALENCIA	80,3%	14,4%	5,3%	0,0%	CUENCA	VALENCIA	94,3%	3,0%	2,7%	0,0%
ALICANTE	ALBACETE	91,4%	3,3%	5,2%	0,0%	MADRID	ALBACETE	90,5%	6,4%	3,2%	0,0%
ALICANTE	ALMERÍA	95,4%	4,6%	0,0%	0,0%	MADRID	ALICANTE	65,8%	6,0%	5,6%	22,6%
ALICANTE	BARCELONA	17,2%	12,0%	4,0%	66,8%	MADRID	ALMERÍA	64,8%	6,6%	2,3%	26,3%
ALICANTE	CASTELLÓN	76,4%	18,3%	5,3%	0,0%	MADRID	BARCELONA	4,0%	2,1%	3,2%	90,7%
ALICANTE	CUENCA	96,4%	2,6%	1,0%	0,0%	MADRID	CASTELLÓN	91,1%	6,3%	2,6%	0,0%
ALICANTE	MADRID	66,4%	6,1%	5,8%	21,8%	MADRID	CUENCA	85,3%	13,3%	1,3%	0,0%
ALICANTE	MURCIA	74,9%	22,6%	2,5%	0,0%	MADRID	MURCIA	78,0%	17,4%	3,2%	1,5%
ALICANTE	TARRAGONA	69,8%	22,7%	7,5%	0,0%	MADRID	TARRAGONA	56,9%	12,8%	30,2%	0,0%
ALICANTE	VALENCIA	74,1%	21,8%	4,1%	0,0%	MADRID	VALENCIA	63,1%	8,0%	2,2%	26,7%
ALMERÍA	ALBACETE	96,9%	2,9%	0,2%	0,0%	MURCIA	ALBACETE	86,5%	10,6%	2,9%	0,0%
ALMERÍA	ALICANTE	92,0%	8,0%	0,0%	0,0%	MURCIA	ALICANTE	75,9%	21,2%	2,9%	0,0%
ALMERÍA	BARCELONA	32,7%	4,4%	0,0%	62,9%	MURCIA	ALMERÍA	91,3%	8,7%	0,0%	0,0%
ALMERÍA	CASTELLÓN	95,7%	4,2%	0,1%	0,0%	MURCIA	BARCELONA	59,0%	30,8%	10,2%	0,0%
ALMERÍA	CUENCA	97,5%	2,2%	0,3%	0,0%	MURCIA	CASTELLÓN	80,5%	16,9%	2,6%	0,0%
ALMERÍA	MADRID	64,1%	6,6%	2,3%	27,0%	MURCIA	CUENCA	97,0%	2,7%	0,2%	0,0%
ALMERÍA	MURCIA	91,3%	8,7%	0,0%	0,0%	MURCIA	MADRID	78,0%	17,3%	3,2%	1,5%
ALMERÍA	TARRAGONA	90,0%	9,8%	0,2%	0,0%	MURCIA	TARRAGONA	75,9%	18,4%	5,7%	0,0%
ALMERÍA	VALENCIA	94,5%	5,5%	0,1%	0,0%	MURCIA	VALENCIA	76,2%	21,0%	2,8%	0,0%
BARCELONA	ALBACETE	57,4%	6,3%	36,3%	0,0%	TARRAGONA	ALBACETE	77,0%	4,8%	18,2%	0,0%
BARCELONA	ALICANTE	18,2%	7,3%	4,7%	69,8%	TARRAGONA	ALICANTE	82,4%	8,4%	9,1%	0,0%
BARCELONA	ALMERÍA	88,0%	11,8%	0,2%	0,0%	TARRAGONA	ALMERÍA	92,7%	7,1%	0,3%	0,0%
BARCELONA	CASTELLÓN	56,0%	29,1%	14,9%	0,0%	TARRAGONA	BARCELONA	75,9%	17,9%	6,3%	0,0%
BARCELONA	CUENCA	79,6%	8,7%	11,7%	0,0%	TARRAGONA	CASTELLÓN	84,7%	5,8%	9,5%	0,0%
BARCELONA	MADRID	4,6%	2,5%	3,3%	89,6%	TARRAGONA	CUENCA	89,6%	5,5%	4,9%	0,0%
BARCELONA	MURCIA	67,0%	25,4%	7,7%	0,0%	TARRAGONA	MADRID	46,8%	10,4%	42,8%	0,0%
BARCELONA	TARRAGONA	74,8%	17,8%	7,4%	0,0%	TARRAGONA	MURCIA	87,5%	8,3%	4,2%	0,0%
BARCELONA	VALENCIA	62,0%	19,0%	19,1%	0,0%	TARRAGONA	VALENCIA	74,2%	16,5%	9,3%	0,0%
CASTELLÓN	ALBACETE	71,7%	20,6%	7,7%	0,0%	VALENCIA	ALBACETE	89,3%	4,8%	5,9%	0,0%
CASTELLÓN	ALICANTE	77,2%	18,5%	4,3%	0,0%	VALENCIA	ALICANTE	74,4%	22,0%	3,6%	0,0%
CASTELLÓN	ALMERÍA	97,0%	2,8%	0,1%	0,0%	VALENCIA	ALMERÍA	96,0%	3,9%	0,1%	0,0%
CASTELLÓN	BARCELONA	57,6%	29,7%	12,7%	0,0%	VALENCIA	BARCELONA	39,4%	50,6%	10,0%	0,0%
CASTELLÓN	CUENCA	94,4%	3,3%	2,3%	0,0%	VALENCIA	CASTELLÓN	82,3%	10,5%	7,2%	0,0%
CASTELLÓN	MADRID	80,9%	16,7%	2,4%	0,0%	VALENCIA	CUENCA	94,8%	3,0%	2,1%	0,0%
CASTELLÓN	MURCIA	80,5%	16,8%	2,7%	0,0%	VALENCIA	MADRID	63,2%	7,9%	2,2%	26,6%
CASTELLÓN	TARRAGONA	74,9%	17,0%	8,0%	0,0%	VALENCIA	MURCIA	92,1%	6,6%	1,3%	0,0%
CASTELLÓN	VALENCIA	85,0%	8,5%	6,6%	0,0%	VALENCIA	TARRAGONA	56,4%	35,7%	7,9%	0,0%

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente tabla (Tabla 21) muestra el reparto modal en el caso que en el que sí se ha llevado a cabo el proyecto de construcción de la línea de alta velocidad.

Tabla 21. Reparto modal (con actuación).

Con Actuación											
Origen	Destino	% Coche	% Autobus	% Tren AV	% Avión	Origen	Destino	% Coche	% Autobus	% Tren AV	% Avión
ALBACETE	ALICANTE	74,5%	18,4%	7,1%	0,0%	CUENCA	ALBACETE	82,9%	2,7%	14,5%	0,0%
ALBACETE	ALMERÍA	89,8%	2,7%	7,4%	0,0%	CUENCA	ALICANTE	76,9%	2,1%	21,0%	0,0%
ALBACETE	BARCELONA	37,7%	6,1%	56,1%	0,0%	CUENCA	ALMERÍA	79,5%	1,8%	18,7%	0,0%
ALBACETE	CASTELLÓN	70,0%	17,0%	13,0%	0,0%	CUENCA	BARCELONA	36,4%	3,9%	59,7%	0,0%
ALBACETE	CUENCA	75,5%	12,1%	12,4%	0,0%	CUENCA	CASTELLÓN	80,6%	2,8%	16,6%	0,0%
ALBACETE	MADRID	88,6%	6,2%	5,2%	0,0%	CUENCA	MADRID	81,7%	12,7%	5,7%	0,0%
ALBACETE	MURCIA	75,0%	22,1%	2,9%	0,0%	CUENCA	MURCIA	87,9%	2,5%	9,6%	0,0%
ALBACETE	TARRAGONA	62,6%	5,9%	31,5%	0,0%	CUENCA	TARRAGONA	61,8%	3,8%	34,4%	0,0%
ALBACETE	VALENCIA	78,2%	14,1%	7,8%	0,0%	CUENCA	VALENCIA	84,7%	2,7%	12,6%	0,0%
ALICANTE	ALBACETE	88,6%	3,2%	8,2%	0,0%	MADRID	ALBACETE	88,6%	6,2%	5,2%	0,0%
ALICANTE	ALMERÍA	82,0%	3,9%	14,1%	0,0%	MADRID	ALICANTE	55,6%	5,1%	20,1%	19,1%
ALICANTE	BARCELONA	9,1%	6,3%	49,3%	35,2%	MADRID	ALMERÍA	60,0%	6,1%	9,6%	24,3%
ALICANTE	CASTELLÓN	70,9%	16,9%	12,2%	0,0%	MADRID	BARCELONA	4,1%	2,2%	1,4%	92,3%
ALICANTE	CUENCA	77,2%	2,1%	20,7%	0,0%	MADRID	CASTELLÓN	81,9%	5,7%	12,4%	0,0%
ALICANTE	MADRID	55,9%	5,1%	20,6%	18,4%	MADRID	CUENCA	81,7%	12,7%	5,6%	0,0%
ALICANTE	MURCIA	72,4%	21,9%	5,8%	0,0%	MADRID	MURCIA	72,1%	16,1%	10,4%	1,4%
ALICANTE	TARRAGONA	55,9%	18,2%	25,9%	0,0%	MADRID	TARRAGONA	69,4%	15,7%	14,9%	0,0%
ALICANTE	VALENCIA	72,1%	21,2%	6,6%	0,0%	MADRID	VALENCIA	50,3%	6,3%	22,1%	21,2%
ALMERÍA	ALBACETE	90,0%	2,7%	7,3%	0,0%	MURCIA	ALBACETE	86,2%	10,6%	3,2%	0,0%
ALMERÍA	ALICANTE	79,7%	7,0%	13,4%	0,0%	MURCIA	ALICANTE	73,7%	20,6%	5,7%	0,0%
ALMERÍA	BARCELONA	5,7%	0,8%	82,5%	11,0%	MURCIA	ALMERÍA	81,3%	7,7%	11,0%	0,0%
ALMERÍA	CASTELLÓN	66,6%	2,9%	30,5%	0,0%	MURCIA	BARCELONA	31,2%	16,3%	52,5%	0,0%
ALMERÍA	CUENCA	79,5%	1,8%	18,7%	0,0%	MURCIA	CASTELLÓN	70,4%	14,7%	14,9%	0,0%
ALMERÍA	MADRID	59,1%	6,0%	9,9%	24,9%	MURCIA	CUENCA	88,1%	2,5%	9,4%	0,0%
ALMERÍA	MURCIA	81,4%	7,7%	10,8%	0,0%	MURCIA	MADRID	72,1%	16,0%	10,6%	1,4%
ALMERÍA	TARRAGONA	42,3%	4,6%	53,1%	0,0%	MURCIA	TARRAGONA	55,2%	13,4%	31,5%	0,0%
ALMERÍA	VALENCIA	76,8%	4,4%	18,8%	0,0%	MURCIA	VALENCIA	72,0%	19,8%	8,1%	0,0%
BARCELONA	ALBACETE	37,3%	4,1%	58,6%	0,0%	TARRAGONA	ALBACETE	62,8%	3,9%	33,3%	0,0%
BARCELONA	ALICANTE	9,1%	3,6%	52,3%	35,0%	TARRAGONA	ALICANTE	62,8%	6,4%	30,8%	0,0%
BARCELONA	ALMERÍA	19,4%	2,6%	78,0%	0,0%	TARRAGONA	ALMERÍA	41,1%	3,1%	55,7%	0,0%
BARCELONA	CASTELLÓN	48,8%	25,3%	25,9%	0,0%	TARRAGONA	BARCELONA	73,3%	17,3%	9,5%	0,0%
BARCELONA	CUENCA	36,5%	4,0%	59,6%	0,0%	TARRAGONA	CASTELLÓN	80,1%	5,5%	14,4%	0,0%
BARCELONA	MADRID	4,7%	2,5%	1,5%	91,3%	TARRAGONA	CUENCA	62,0%	3,8%	34,2%	0,0%
BARCELONA	MURCIA	33,3%	12,6%	54,1%	0,0%	TARRAGONA	MADRID	69,7%	15,5%	14,8%	0,0%
BARCELONA	TARRAGONA	72,7%	17,3%	10,0%	0,0%	TARRAGONA	MURCIA	58,4%	5,5%	36,1%	0,0%
BARCELONA	VALENCIA	44,6%	13,6%	41,8%	0,0%	TARRAGONA	VALENCIA	65,0%	14,4%	20,6%	0,0%
CASTELLÓN	ALBACETE	65,9%	18,9%	15,2%	0,0%	VALENCIA	ALBACETE	87,1%	4,6%	8,2%	0,0%
CASTELLÓN	ALICANTE	70,6%	16,9%	12,5%	0,0%	VALENCIA	ALICANTE	72,1%	21,3%	6,5%	0,0%
CASTELLÓN	ALMERÍA	65,9%	1,9%	32,2%	0,0%	VALENCIA	ALMERÍA	77,4%	3,2%	19,4%	0,0%
CASTELLÓN	BARCELONA	48,8%	25,1%	26,1%	0,0%	VALENCIA	BARCELONA	31,4%	40,2%	28,4%	0,0%
CASTELLÓN	CUENCA	81,0%	2,9%	16,1%	0,0%	VALENCIA	CASTELLÓN	80,6%	10,3%	9,1%	0,0%
CASTELLÓN	MADRID	73,5%	15,2%	11,4%	0,0%	VALENCIA	CUENCA	85,1%	2,7%	12,1%	0,0%
CASTELLÓN	MURCIA	69,7%	14,6%	15,7%	0,0%	VALENCIA	MADRID	50,4%	6,3%	22,1%	21,2%
CASTELLÓN	TARRAGONA	71,0%	16,1%	12,8%	0,0%	VALENCIA	MURCIA	84,2%	6,0%	9,8%	0,0%
CASTELLÓN	VALENCIA	82,4%	8,2%	9,4%	0,0%	VALENCIA	TARRAGONA	51,4%	32,6%	16,0%	0,0%

Fuente: Elaboración propia.

Tras los resultados obtenidos se puede afirmar que, mayoritariamente, el coche es el modo de transporte más “atractivo” (con mayor cuota de mercado) y esto es debido al bajo coste generalizado en relación a los demás modos de transporte que compiten con él.

Es preciso prestar atención a la relación Madrid-Barcelona, que presenta una cuota de mercado muy baja para el tren de alta velocidad y muy alta en el caso del avión. Esto sucede, principalmente, porque el tiempo de desplazamiento del avión es infinitamente mejor en relación al resto de modos, ya que el trayecto que en este caso realiza el tren de alta velocidad (en el caso ejemplo) no es el que realiza actualmente, sino que se está comparando con la ruta que haría por Cuenca-Valencia-Castellón y desde allí hasta Barcelona.

Se observa que en las rutas donde compiten tren y avión, a excepción de las rutas Madrid-Barcelona y Almería-Madrid, la cuota de mercado del tren de alta velocidad es mayor que la del avión debido, principalmente, a que el tiempo de viaje es muy competitivo, lo que implica costes generalizados bajos.

Finalmente, si se comparan los resultados entre el tren y el autobús se observa que el reparto modal es parecido en la mayoría de las relaciones, siendo un poco menor en el caso del autobús. En definitiva, el tren es más "atractivo" que el autobús, exceptuando algunas relaciones con origen o destino Murcia y Cartagena, ya que el autobús dispone de gran número de frecuencias que reducen mucho el tiempo de espera.

Conocida la demanda total para el año 2011 (Tabla 19) y su cuota de mercado para cada uno de los modos de transporte considerados, se calcula el tráfico por modo (Tabla 22). En primer lugar, se expone la demanda por modo en el caso de que no se lleve a cabo el proyecto, para después calcular la demanda con la introducción del ferrocarril de alta velocidad.

Tabla 22. Número de viajeros por modo de transporte para el año 2011 (sin actuación).

Origen	Destino	Coche	Autobus	Ferr. Conv	Avión	Origen	Destino	Coche	Autobus	Ferr.Cov	Avión
ALBACETE	ALICANTE	408.598	100.703	19.954	0	CUENCA	ALBACETE	82.472	2.658	418	0
ALBACETE	ALMERÍA	57.697	1.746	111	0	CUENCA	ALICANTE	56.683	1.548	697	0
ALBACETE	BARCELONA	92.197	15.015	43.809	0	CUENCA	ALMERÍA	10.367	236	30	0
ALBACETE	CASTELLÓN	75.094	18.209	7.989	0	CUENCA	BARCELONA	48.523	5.238	7.537	0
ALBACETE	CUENCA	76.907	12.305	578	0	CUENCA	CASTELLÓN	34.413	1.210	1.197	0
ALBACETE	MADRID	1.319.648	92.553	45.944	0	CUENCA	MADRID	1.190.349	184.851	19.084	0
ALBACETE	MURCIA	675.997	199.183	22.082	0	CUENCA	MURCIA	78.161	2.206	203	0
ALBACETE	TARRAGONA	23.265	2.174	5.523	0	CUENCA	TARRAGONA	11.699	722	451	0
ALBACETE	VALENCIA	629.352	113.232	41.164	0	CUENCA	VALENCIA	174.134	5.562	5.025	0
ALICANTE	ALBACETE	445.481	16.208	25.540	0	MADRID	ALBACETE	1.322.831	92.884	46.108	0
ALICANTE	ALMERÍA	230.997	11.129	20	0	MADRID	ALICANTE	989.846	90.940	84.688	339.726
ALICANTE	BARCELONA	82.653	57.531	19.319	320.445	MADRID	ALMERÍA	263.956	26.771	9.236	107.167
ALICANTE	CASTELLÓN	196.161	46.917	13.627	0	MADRID	BARCELONA	161.628	86.438	127.337	3.661.808
ALICANTE	CUENCA	56.302	1.544	581	0	MADRID	CASTELLÓN	677.880	46.766	19.373	0
ALICANTE	MADRID	990.648	90.719	86.145	324.996	MADRID	CUENCA	1.234.052	192.483	19.488	0
ALICANTE	MURCIA	4.461.430	1.347.779	147.974	0	MADRID	MURCIA	1.433.037	320.200	58.155	26.865
ALICANTE	TARRAGONA	63.159	20.567	6.800	0	MADRID	TARRAGONA	246.640	55.672	131.049	0
ALICANTE	VALENCIA	1.642.264	483.375	90.043	0	MADRID	VALENCIA	2.622.330	330.996	93.011	1.108.427
ALMERÍA	ALBACETE	57.657	1.736	114	0	MURCIA	ALBACETE	782.120	95.877	25.788	0
ALMERÍA	ALICANTE	230.691	20.169	19	0	MURCIA	ALICANTE	4.635.554	1.297.535	174.087	0
ALMERÍA	BARCELONA	31.597	4.243	37	60.887	MURCIA	ALMERÍA	479.684	45.559	13	0
ALMERÍA	CASTELLÓN	29.635	1.296	36	0	MURCIA	BARCELONA	229.206	119.675	39.733	0
ALMERÍA	CUENCA	10.117	230	31	0	MURCIA	CASTELLÓN	182.219	38.156	5.893	0
ALMERÍA	MADRID	257.968	26.392	9.436	108.882	MURCIA	CUENCA	78.051	2.207	168	0
ALMERÍA	MURCIA	478.829	45.405	10	0	MURCIA	MADRID	1.467.799	326.149	60.402	27.833
ALMERÍA	TARRAGONA	14.647	1.591	40	0	MURCIA	TARRAGONA	58.019	14.065	4.381	0
ALMERÍA	VALENCIA	190.267	10.981	141	0	MURCIA	VALENCIA	1.354.849	373.005	50.343	0
BARCELONA	ALBACETE	84.626	9.274	53.580	0	TARRAGONA	ALBACETE	22.774	1.408	5.391	0
BARCELONA	ALICANTE	84.756	33.827	21.817	325.066	TARRAGONA	ALICANTE	70.279	7.197	7.768	0
BARCELONA	ALMERÍA	104.513	14.060	258	0	TARRAGONA	ALMERÍA	14.441	1.099	40	0
BARCELONA	CASTELLÓN	360.850	187.077	95.956	0	TARRAGONA	BARCELONA	961.278	226.501	79.493	0
BARCELONA	CUENCA	47.520	5.164	7.001	0	TARRAGONA	CASTELLÓN	148.195	10.164	16.691	0
BARCELONA	MADRID	182.355	97.586	130.835	3.555.755	TARRAGONA	CUENCA	11.155	684	614	0
BARCELONA	MURCIA	253.661	95.998	29.022	0	TARRAGONA	MADRID	210.746	46.952	192.708	0
BARCELONA	TARRAGONA	999.673	237.712	99.229	0	TARRAGONA	MURCIA	62.646	5.921	3.008	0
BARCELONA	VALENCIA	1.075.629	329.074	331.474	0	TARRAGONA	VALENCIA	318.677	70.603	39.915	0
CASTELLÓN	ALBACETE	65.792	18.921	7.046	0	VALENCIA	ALBACETE	679.824	36.171	45.224	0
CASTELLÓN	ALICANTE	192.654	46.202	10.630	0	VALENCIA	ALICANTE	1.201.113	355.636	58.362	0
CASTELLÓN	ALMERÍA	29.357	862	36	0	VALENCIA	ALMERÍA	247.801	10.131	199	0
CASTELLÓN	BARCELONA	362.696	186.572	79.965	0	VALENCIA	BARCELONA	688.931	884.363	174.140	0
CASTELLÓN	CUENCA	34.880	1.235	849	0	VALENCIA	CASTELLÓN	3.288.364	419.250	286.451	0
CASTELLÓN	MADRID	625.011	128.933	18.183	0	VALENCIA	CUENCA	160.112	5.119	3.586	0
CASTELLÓN	MURCIA	176.509	36.916	5.974	0	VALENCIA	MADRID	2.618.375	329.102	92.479	1.101.900
CASTELLÓN	TARRAGONA	138.306	31.398	14.835	0	VALENCIA	MURCIA	1.474.835	105.886	20.998	0
CASTELLÓN	VALENCIA	3.417.177	340.479	263.936	0	VALENCIA	TARRAGONA	257.682	163.271	35.966	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Número de viajeros por modo de transporte para el año 2011 (con actuación).

Origen	Destino	Coche	Autobus	Tren AV	Avión	Origen	Destino	Coche	Autobus	Tren AV	Avión
ALBACETE	ALICANTE	394.257	97.168	37.830	0	CUENCA	ALBACETE	70.885	2.285	12.378	0
ALBACETE	ALMERÍA	53.505	1.620	4.429	0	CUENCA	ALICANTE	45.320	1.238	12.371	0
ALBACETE	BARCELONA	56.987	9.281	84.753	0	CUENCA	ALMERÍA	8.450	193	1.991	0
ALBACETE	CASTELLÓN	70.896	17.191	13.204	0	CUENCA	BARCELONA	22.283	2.405	36.610	0
ALBACETE	CUENCA	67.788	10.846	11.156	0	CUENCA	CASTELLÓN	29.672	1.043	6.105	0
ALBACETE	MADRID	1.291.973	90.612	75.560	0	CUENCA	MADRID	1.138.587	176.812	78.885	0
ALBACETE	MURCIA	673.130	198.338	25.794	0	CUENCA	MURCIA	70.845	2.000	7.726	0
ALBACETE	TARRAGONA	19.393	1.812	9.756	0	CUENCA	TARRAGONA	7.959	491	4.422	0
ALBACETE	VALENCIA	612.523	110.204	61.021	0	CUENCA	VALENCIA	156.479	4.998	23.244	0
ALICANTE	ALBACETE	431.442	15.697	40.090	0	MADRID	ALBACETE	1.295.061	90.934	75.828	0
ALICANTE	ALMERÍA	198.440	9.560	34.145	0	MADRID	ALICANTE	837.523	76.946	303.286	287.447
ALICANTE	BARCELONA	43.625	30.366	236.823	169.135	MADRID	ALMERÍA	244.088	24.756	39.185	99.101
ALICANTE	CASTELLÓN	181.915	43.510	31.281	0	MADRID	BARCELONA	164.527	87.989	57.207	3.727.489
ALICANTE	CUENCA	45.104	1.237	12.085	0	MADRID	CASTELLÓN	609.483	42.047	92.488	0
ALICANTE	MADRID	834.879	76.454	307.281	273.893	MADRID	CUENCA	1.181.177	184.236	80.610	0
ALICANTE	MURCIA	4.311.341	1.302.438	343.405	0	MADRID	MURCIA	1.325.536	296.179	191.692	24.849
ALICANTE	TARRAGONA	50.577	16.470	23.481	0	MADRID	TARRAGONA	300.712	67.877	64.772	0
ALICANTE	VALENCIA	1.598.167	470.396	147.120	0	MADRID	VALENCIA	2.088.547	263.621	919.793	882.803
ALMERÍA	ALBACETE	53.529	1.612	4.366	0	MURCIA	ALBACETE	778.981	95.493	29.312	0
ALMERÍA	ALICANTE	199.826	17.471	33.583	0	MURCIA	ALICANTE	4.499.048	1.259.326	348.804	0
ALMERÍA	BARCELONA	5.524	742	79.854	10.644	MURCIA	ALMERÍA	426.915	40.547	57.795	0
ALMERÍA	CASTELLÓN	20.624	902	9.440	0	MURCIA	BARCELONA	121.155	63.258	204.201	0
ALMERÍA	CUENCA	8.250	187	1.940	0	MURCIA	CASTELLÓN	159.283	33.353	33.633	0
ALMERÍA	MADRID	237.960	24.345	39.936	100.437	MURCIA	CUENCA	70.857	2.003	7.564	0
ALMERÍA	MURCIA	426.973	40.488	56.784	0	MURCIA	MADRID	1.356.225	301.357	198.883	25.717
ALMERÍA	TARRAGONA	6.884	748	8.647	0	MURCIA	TARRAGONA	42.187	10.227	24.051	0
ALMERÍA	VALENCIA	154.587	8.922	37.880	0	MURCIA	VALENCIA	1.280.797	352.617	144.782	0
BARCELONA	ALBACETE	55.067	6.035	86.379	0	TARRAGONA	ALBACETE	18.577	1.148	9.847	0
BARCELONA	ALICANTE	42.427	16.933	243.386	162.719	TARRAGONA	ALICANTE	53.536	5.483	26.227	0
BARCELONA	ALMERÍA	23.092	3.106	92.633	0	TARRAGONA	ALMERÍA	6.409	488	8.684	0
BARCELONA	CASTELLÓN	314.018	162.798	167.067	0	TARRAGONA	BARCELONA	928.406	218.756	120.111	0
BARCELONA	CUENCA	21.766	2.365	35.553	0	TARRAGONA	CASTELLÓN	140.233	9.618	25.199	0
BARCELONA	MADRID	185.778	99.418	58.827	3.622.507	TARRAGONA	CUENCA	7.720	473	4.259	0
BARCELONA	MURCIA	125.958	47.669	205.054	0	TARRAGONA	MADRID	313.788	69.908	66.710	0
BARCELONA	TARRAGONA	971.837	231.093	133.684	0	TARRAGONA	MURCIA	41.817	3.952	25.805	0
BARCELONA	VALENCIA	774.282	236.881	725.014	0	TARRAGONA	VALENCIA	279.094	61.833	88.268	0
CASTELLÓN	ALBACETE	60.447	17.383	13.929	0	VALENCIA	ALBACETE	663.200	35.286	62.732	0
CASTELLÓN	ALICANTE	176.165	42.248	31.074	0	VALENCIA	ALICANTE	1.164.544	344.808	105.759	0
CASTELLÓN	ALMERÍA	19.941	585	9.728	0	VALENCIA	ALMERÍA	199.783	8.168	50.180	0
CASTELLÓN	BARCELONA	307.070	157.958	164.205	0	VALENCIA	BARCELONA	547.872	703.289	496.272	0
CASTELLÓN	CUENCA	29.953	1.061	5.950	0	VALENCIA	CASTELLÓN	3.218.489	410.342	365.234	0
CASTELLÓN	MADRID	567.423	117.053	87.651	0	VALENCIA	CUENCA	143.735	4.595	20.486	0
CASTELLÓN	MURCIA	152.893	31.977	34.528	0	VALENCIA	MADRID	2.086.512	262.252	915.018	878.074
CASTELLÓN	TARRAGONA	131.081	29.758	23.700	0	VALENCIA	MURCIA	1.348.173	96.793	156.753	0
CASTELLÓN	VALENCIA	3.314.013	330.200	377.379	0	VALENCIA	TARRAGONA	234.917	148.847	73.155	0

Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.4 Demanda inducida

La introducción de oferta de alta velocidad supone un gran cambio en la oferta de movilidad del corredor y, como consecuencia aparece una demanda inducida que obedece a las "ventajas" de este nuevo servicio. En definitiva, la demanda inducida se concreta en los nuevos viajes que no se producían antes de la entrada en servicio de la nueva infraestructura y que no provienen de otros modos de transporte.

Al igual que las metodologías de reparto modal y coste generalizado anteriormente citadas, en el cálculo de la demanda existen diferentes estudios y modelos que permiten su determinación. Aquí se emplea la metodología desarrollada por (MCRIT SL, 2012) que afirma que la demanda inducida se puede estimar aplicando la siguiente expresión:

$$y=5{,}5413\cdot x^4-9{,}3647\cdot x^3+4{,}6758\cdot x^2-0{,}2788\cdot x \qquad (2.\ 14)$$

Donde:

- y: porcentaje de demanda del tren de alta velocidad generada por el mismo tras su puesta en servicio (%),
- x: porcentaje de reducción del tiempo de viaje en ferrocarril de alta velocidad en relación al tiempo de viaje del ferrocarril convencional (%).

Esta expresión se ha calibrado a partir de los resultados del modelo de reparto modal y las demandas reales de las líneas de AVE posteriores a 2007.

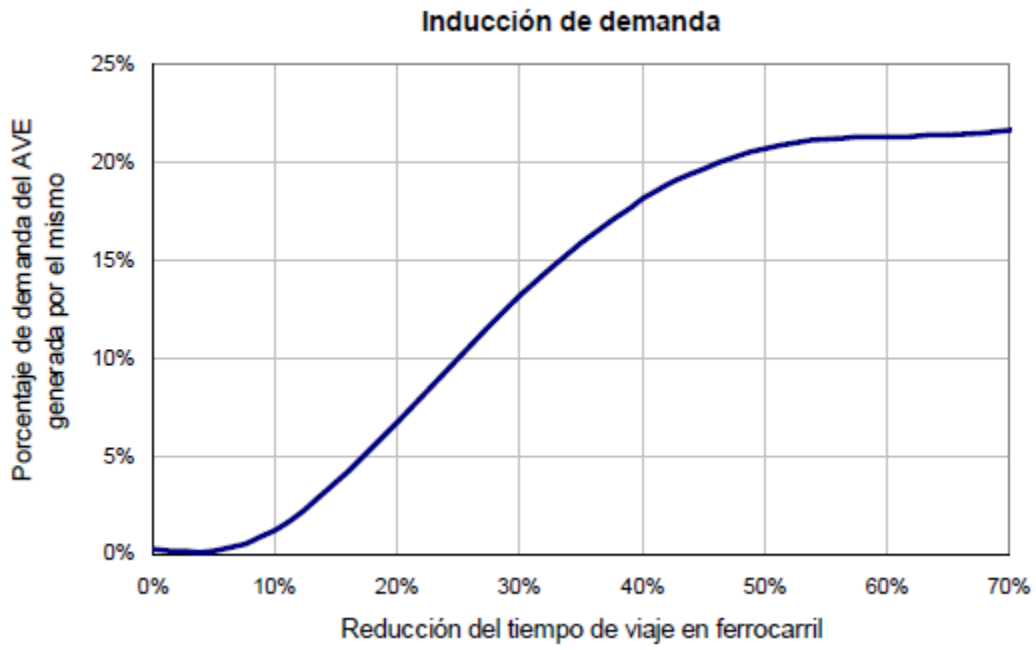


Figura 31. Porcentaje de demanda inducida debido a la reducción de tiempo que supone la puesta en servicio del tren de alta velocidad en una ruta determinada.

Fuente: (MCRIT SL, 2012)

Aplicando esta metodología para el caso ejemplo que se emplea en esta tesis, se obtiene la siguiente demanda inducida que, sumada a la demanda total debida al reparto modal, permite obtener la demanda total que tiene que atender el tren de alta velocidad en cada una de las rutas objeto de estudio (Tabla 24).

Tabla 24. Demanda total contabilizando la demanda inducida

Origen	Destino	Tiempo FFCC	Tiempo AV	Ahorro de tiempo en %	% demanda inducida	D. total + D. inducida	Origen	Destino	Tiempo FFCC	Tiempo AV	Ahorro de tiempo en %	% demanda inducida	D. total + D. inducida
ALBACETE	ALICANTE	1,90	0,77	60%	21%	48.056	CUENCA	ALBACETE	5,55	0,57	90%	34%	18.838
ALBACETE	ALMERÍA	6,47	1,87	71%	22%	5.665	CUENCA	ALICANTE	5,10	1,34	74%	22%	15.917
ALBACETE	BARCELONA	4,95	2,44	51%	21%	107.124	CUENCA	ALMERÍA	8,16	2,44	70%	22%	2.542
ALBACETE	CASTELLÓN	2,23	1,16	48%	20%	16.596	CUENCA	BARCELONA	6,64	2,49	62%	21%	46.570
ALBACETE	CUENCA	5,00	0,57	89%	33%	16.568	CUENCA	CASTELLÓN	3,92	1,22	69%	22%	7.785
ALBACETE	MADRID	3,02	1,43	53%	21%	95.754	CUENCA	MADRID	2,94	0,86	71%	22%	100.858
ALBACETE	MURCIA	1,86	0,96	49%	21%	32.463	CUENCA	MURCIA	5,20	1,53	71%	22%	9.872
ALBACETE	TARRAGONA	3,66	1,98	46%	20%	12.195	CUENCA	TARRAGONA	5,53	2,03	63%	21%	5.625
ALBACETE	VALENCIA	1,68	0,87	48%	21%	76.758	CUENCA	VALENCIA	3,37	0,92	73%	22%	29.818
ALICANTE	ALBACETE	1,67	0,77	54%	21%	50.865	MADRID	ALBACETE	3,02	1,43	53%	21%	96.094
ALICANTE	ALMERÍA	7,95	1,26	84%	28%	47.211	MADRID	ALICANTE	3,58	2,19	39%	18%	368.346
ALICANTE	BARCELONA	5,28	2,44	54%	21%	300.429	MADRID	ALMERÍA	6,42	3,29	49%	21%	49.327
ALICANTE	CASTELLÓN	2,47	1,17	53%	21%	39.639	MADRID	BARCELONA	4,99	3,35	33%	15%	67.178
ALICANTE	CUENCA	5,30	1,34	75%	23%	15.600	MADRID	CASTELLÓN	4,38	2,07	53%	21%	117.206
ALICANTE	MADRID	3,58	2,19	39%	18%	373.199	MADRID	CUENCA	2,94	0,86	71%	22%	103.063
ALICANTE	MURCIA	1,58	0,35	78%	23%	448.788	MADRID	MURCIA	3,97	2,39	40%	18%	234.047
ALICANTE	TARRAGONA	4,19	1,99	53%	21%	29.750	MADRID	TARRAGONA	2,55	2,89	-	0%	64.772
ALICANTE	VALENCIA	1,70	0,87	49%	21%	185.146	MADRID	VALENCIA	3,41	1,78	48%	20%	1.155.878
ALMERÍA	ALBACETE	6,42	1,87	71%	22%	5.582	MURCIA	ALBACETE	1,83	0,96	48%	20%	36.811
ALMERÍA	ALICANTE	7,98	1,26	84%	28%	46.472	MURCIA	ALICANTE	1,39	0,35	75%	22%	450.000
ALMERÍA	BARCELONA	10,94	3,54	68%	21%	101.715	MURCIA	ALMERÍA	7,88	0,91	88%	33%	85.674
ALMERÍA	CASTELLÓN	8,31	2,27	73%	22%	12.113	MURCIA	BARCELONA	6,55	2,63	60%	21%	259.722
ALMERÍA	CUENCA	8,09	2,44	70%	22%	2.477	MURCIA	CASTELLÓN	4,00	1,36	66%	21%	42.807
ALMERÍA	MADRID	6,42	3,29	49%	21%	50.273	MURCIA	CUENCA	5,40	1,53	72%	22%	9.684
ALMERÍA	MURCIA	8,21	0,91	89%	33%	84.990	MURCIA	MADRID	3,97	2,39	40%	18%	242.828
ALMERÍA	TARRAGONA	9,74	3,09	68%	22%	11.020	MURCIA	TARRAGONA	5,42	2,18	60%	21%	30.590
ALMERÍA	VALENCIA	7,76	1,97	75%	22%	48.865	MURCIA	VALENCIA	2,77	1,07	62%	21%	184.164
BARCELONA	ALBACETE	4,67	2,44	48%	20%	108.530	TARRAGONA	ALBACETE	3,73	1,98	47%	20%	12.342
BARCELONA	ALICANTE	5,23	2,44	53%	21%	308.622	TARRAGONA	ALICANTE	4,22	1,99	53%	21%	33.244
BARCELONA	ALMERÍA	10,77	3,54	67%	21%	117.957	TARRAGONA	ALMERÍA	9,82	3,09	69%	22%	11.069
BARCELONA	CASTELLÓN	2,52	1,28	49%	21%	210.590	TARRAGONA	BARCELONA	1,25	0,46	63%	21%	152.795
BARCELONA	CUENCA	6,71	2,49	63%	21%	45.226	TARRAGONA	CASTELLÓN	1,52	0,82	46%	20%	31.524
BARCELONA	MADRID	4,99	3,35	33%	15%	69.080	TARRAGONA	CUENCA	5,76	2,03	65%	21%	5.419
BARCELONA	MURCIA	6,12	2,63	57%	21%	260.648	TARRAGONA	MADRID	2,55	2,89	-	0%	66.710
BARCELONA	TARRAGONA	1,00	0,46	54%	21%	169.671	TARRAGONA	MURCIA	5,17	2,18	58%	21%	32.812
BARCELONA	VALENCIA	3,31	1,57	53%	21%	918.668	TARRAGONA	VALENCIA	2,37	1,11	53%	21%	111.894
CASTELLÓN	ALBACETE	2,48	1,16	53%	21%	17.661	VALENCIA	ALBACETE	1,59	0,87	46%	20%	78.348
CASTELLÓN	ALICANTE	2,78	1,17	58%	21%	39.511	VALENCIA	ALICANTE	1,83	0,87	52%	21%	133.937
CASTELLÓN	ALMERÍA	8,38	2,27	73%	22%	12.490	VALENCIA	ALMERÍA	7,69	1,97	74%	22%	64.684
CASTELLÓN	BARCELONA	2,75	1,28	54%	21%	208.281	VALENCIA	BARCELONA	3,51	1,57	55%	21%	630.328
CASTELLÓN	CUENCA	4,32	1,22	72%	22%	7.620	VALENCIA	CASTELLÓN	0,62	0,29	53%	21%	462.771
CASTELLÓN	MADRID	4,38	2,07	53%	21%	111.077	VALENCIA	CUENCA	3,63	0,92	75%	22%	26.432
CASTELLÓN	MURCIA	4,11	1,36	67%	21%	43.964	VALENCIA	MADRID	3,41	1,78	48%	20%	1.149.876
CASTELLÓN	TARRAGONA	1,59	0,82	48%	21%	29.820	VALENCIA	MURCIA	3,04	1,07	65%	21%	199.450
CASTELLÓN	VALENCIA	0,77	0,29	62%	21%	480.033	VALENCIA	TARRAGONA	2,22	1,11	50%	21%	92.309

Fuente: Elaboración propia.

2.3 RELACIÓN ENTRE LA CUOTA DE MERCADO Y LA VELOCIDAD MEDIA DEL TREN DE ALTA VELOCIDAD

En la expresión que permite el cálculo del coste generalizado (ecuación (2. 7)), coste que después influye en la determinación de la cuota de mercado (ecuación (2. 13)), el único parámetro que se ve influenciado por la velocidad media es el tiempo de viaje (T_{abordo}). A medida que se aumenta la velocidad media, el tiempo de viaje disminuye y, por lo tanto, el coste generalizado que tiene que asumir cada viajero por utilizar el tren de alta velocidad se reduce, siempre y cuando se mantengan constantes el resto de variables que influyen en el coste generalizado. Esto provoca que la cuota de mercado del ferrocarril aumente (siempre que se mantenga constante el coste generalizado del resto de modos de transporte).

Teniendo como premisa la afirmación anterior, se incrementa la velocidad media del tren de alta velocidad (pasando de 180km/h a 350km/h) a las 45 relaciones que se consideran del corredor de Levante (90 relaciones considerando ambos sentidos). Manteniendo constantes el resto de las variables se calcula el nuevo coste generalizado y, posteriormente, su cuota de mercado.

A continuación, se muestra de forma gráfica la cuota de mercado en función de la velocidad media para una serie de relaciones origen-destino del corredor de Levante (no se han introducido todas las relaciones porque nos encontraríamos con una gráfica de 45 curvas que no permitiría obtener conclusiones).

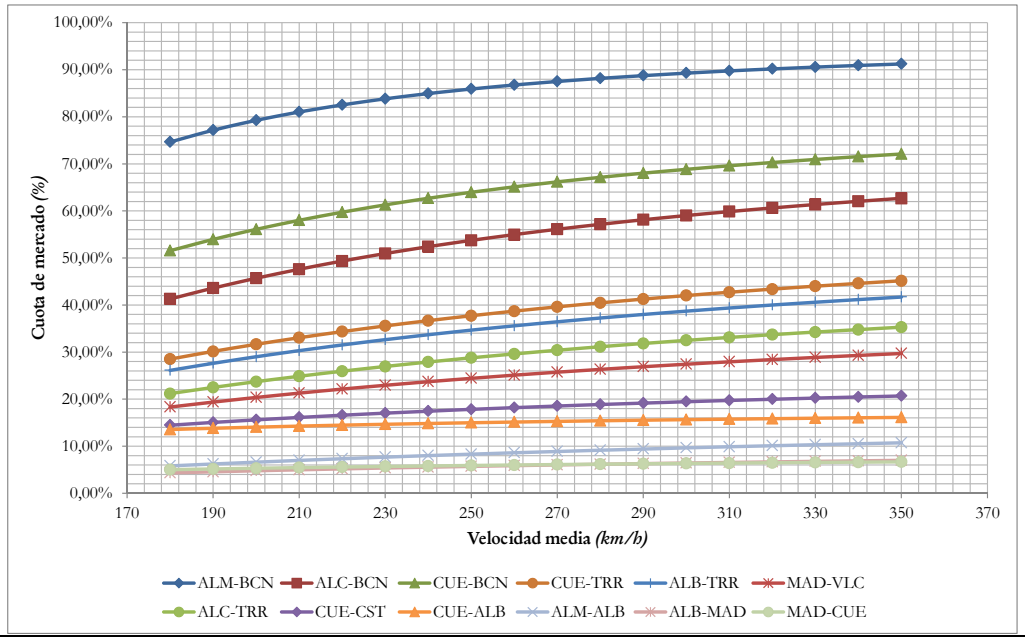


Figura 32. Influencia de la velocidad media en la cuota de mercado en alguna de las relaciones del corredor de Levante.

Fuente: Elaboración propia.

Puede afirmarse que la evolución de la cuota de mercado tiene una tendencia aproximadamente lineal para todas las relaciones, diferenciándose unas de otras en la pendiente (en la variación de las cuotas de mercado), es decir para cuotas de mercado bajas (5%-20%) la recta es casi horizontal y, por lo tanto, la velocidad no modifica o no incrementa demasiado la cuota de mercado (demanda inelástica), mientras que si nos movemos a cuotas de mercado entre 40%-90% la velocidad media es un factor importante en este incremento del tráfico (demanda elástica).

Como se exponía anteriormente, el objetivo de este capítulo consiste en estimar la variación de la demanda en función de la variación del tiempo de viaje (o velocidad media), tarea, que como se observa en la gráfica, se ha cumplido. El objetivo ahora es cuantificar o más bien obtener un valor o unos valores medios que se ajusten a estas tendencias observadas, de manera que permita de forma rápida y sencilla determinar la variación de la demanda en función de la variación de la velocidad media en el corredor que se analiza.

Para ello, se utilizará el concepto de elasticidades medias, entendiendo por elasticidad el parámetro que mide el cambio que se produce en una variable, debido a un pequeño cambio que se produzca en otra (véase Figura 33). De esta forma, una variable es elástica cuando pequeños cambios en ésta producen grandes cambios en la otra, siendo inelástica cuando ocurre lo contrario.

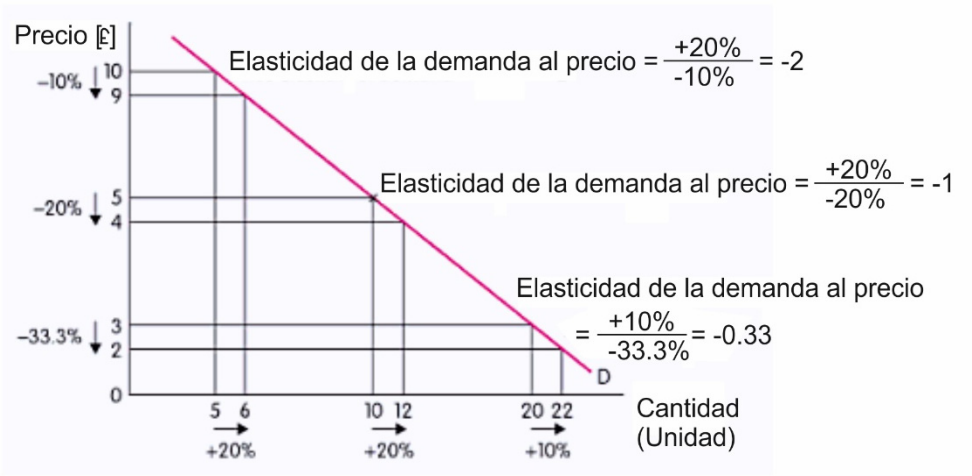


Figura 33. Elasticidad de la demanda al precio

Fuente: (Yousefi Mojir, 2011).

Para el cálculo de las elasticidades puede emplearse la siguiente expresión, (Yousefi Mojir, 2011):

$$Elasticidad = \frac{Porcentaje\ de\ cambio\ de\ la\ demanda\ (\%)}{Porcentaje\ de\ cambio\ del\ tiempo\ de\ viaje\ (\%)} \qquad (2.\ 15)$$

Aplicando esta metodología en cada una de las relaciones es posible cuantificar el cambio de la demanda cuando el tiempo de viaje cambia.

En el estudio realizado se observa cómo la elasticidad al tiempo de viaje no puede tomarse como un valor fijo, sino que está relacionado con la ruta escogida (véase Figura 34). En el siguiente gráfico puede observarse cómo la elasticidad es diferente según la ruta, pasando de valores cercanos a -0,2 para pequeños intervalos de tiempo, hasta valores de -1.8 para tiempos de viaje que rondan los 140 minutos.

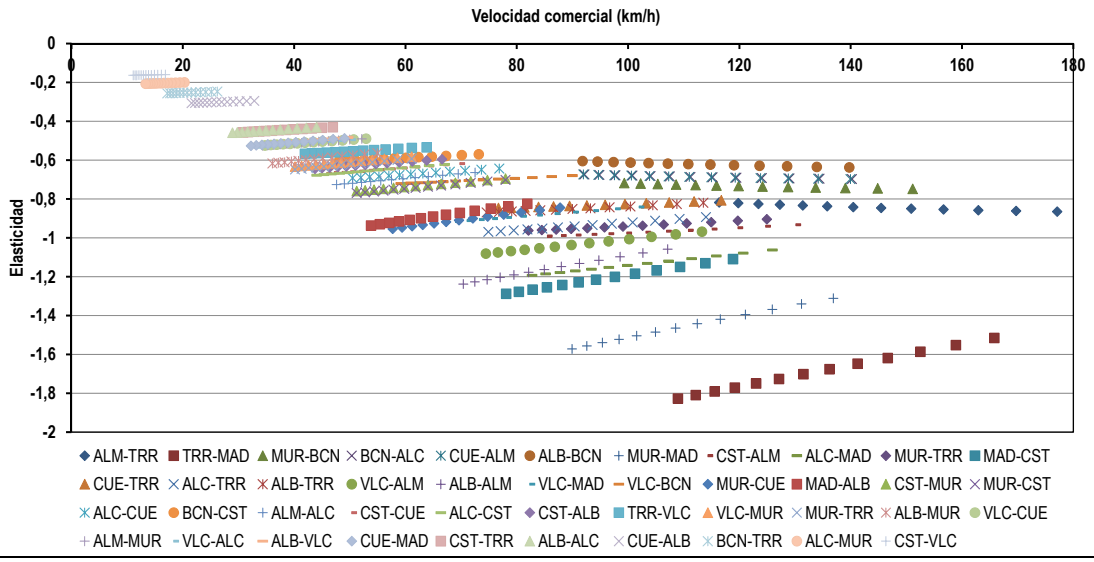


Figura 34. Elasticidad de la demanda al tiempo de viaje.

Fuente: Elaboración propia.

Realizando un análisis más detallado de los datos obtenidos, se observa que la pendiente de estas rectas (es decir, la variación de la cuota de mercado en función de la velocidad comercial) es proporcional a la longitud de la línea.

Principalmente, lo que se observa es que a medida que la distancia entre dos puntos es mayor, el incremento de la cuota de mercado es mayor y, por lo tanto, una mejora de la velocidad es más beneficiosa. Esto es cierto hasta una determinada distancia, a partir de la cual, el avión es mucho más competitivo (principalmente por su velocidad), por ello, el tren empieza a perder cuota de mercado.

Por otro lado, la cuota modal del tren de alta velocidad en distancias cortas es baja, ya que el coche es muy competitivo en estas relaciones. Como se ha mostrado anteriormente, el tiempo de espera es cero y, por lo tanto, el tiempo de viaje corresponde prácticamente al tiempo a bordo, esto hace que los tiempos de viaje de este modo, en distancias cortas, sean muy competitivos y difíciles de reducir, aunque se circule a muy altas velocidades como es el caso del tren de alta velocidad.

Ambos efectos detectados en este estudio (menor cuota de mercado del tren de alta velocidad tanto en distancias cortas como en largas distancias) son claros y ya identificados en otros estudios de demanda. A continuación se incluye una ilustración obtenida del estudio (MCRIT SL, 2013) que representa la cuota de mercado de todos los modos de transporte en función de la distancia recorrida (Figura 35) y en la que puede observarse lo expuesto anteriormente.

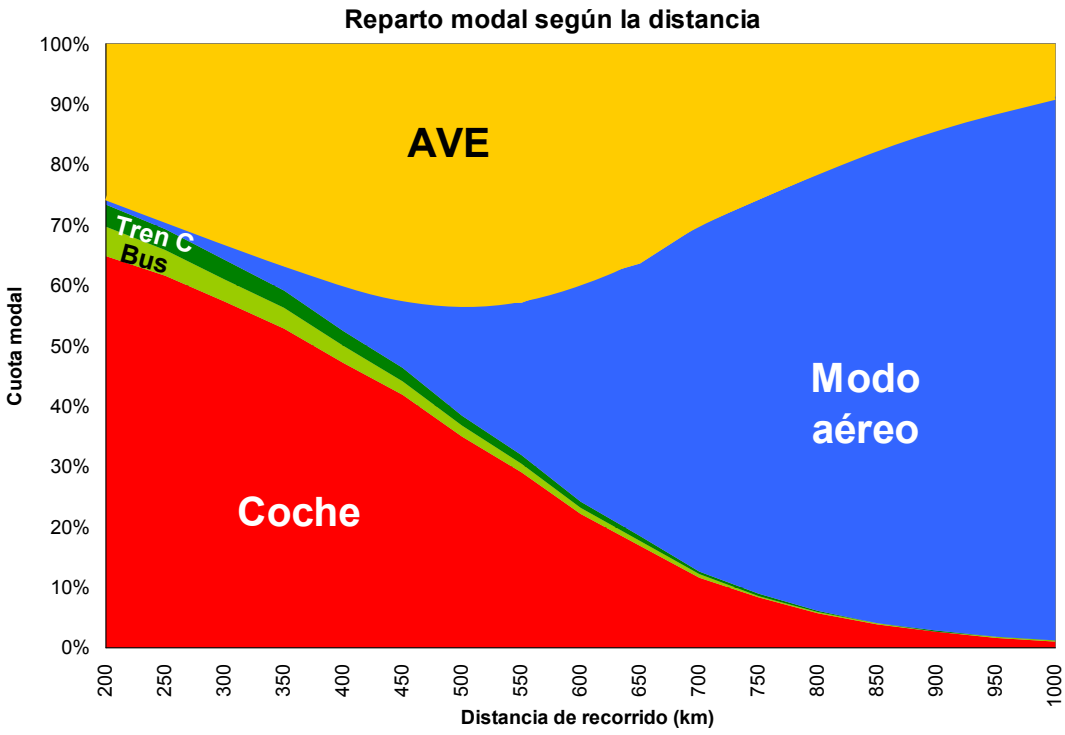


Figura 35. Reparto modal según la distancia

Fuente: (MCRIT SL, 2013)

Analizando todas las relaciones del caso ejemplo, se observa que cuanto mayor es la distancia, un incremento de la velocidad media supone un mayor incremento de la cuota de mercado. Puede afirmarse que no se obtiene la misma cantidad de viajeros si se incrementa el mismo porcentaje la velocidad media en una línea de 50 kilómetros que si se hace en una línea de 500 kilómetros. El tiempo ahorrado en la línea de 50 kilómetros es menor que en una línea de mayor longitud y, por lo tanto, supondría menor "atracción" para los viajeros.

Esto está en la línea con lo expuesto en (López Pita, 1999) que muestra gráficamente una serie de líneas ferroviarias de alta velocidad europeas, en las que las cuotas de mercado del tren de alta velocidad son similares, pero la velocidad media es completamente diferente (véase por ejemplo Paris-Nantes y Paris-Bruselas).

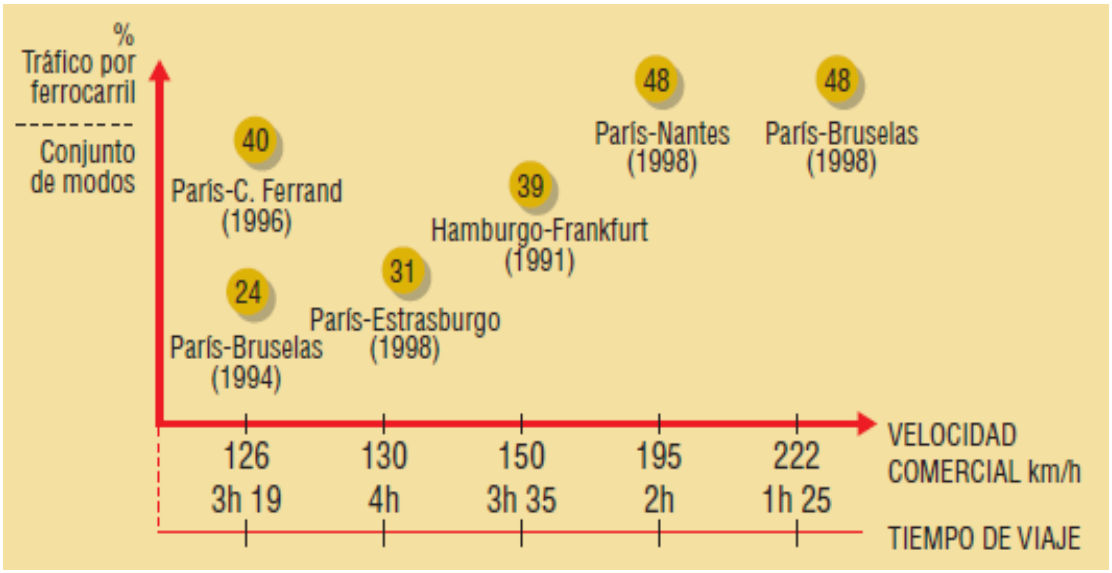


Figura 36. Tiempo objetivo en determinadas rutas europeas.

Fuente: (López Pita, 1999).

A modo de ejemplo para homogenizar y generalizar los resultados obtenidos se agrupan en diferentes intervalos en función del tiempo de viaje obteniendo. Por lo tanto, puede afirmarse que para:

- Tiempos de viaje inferiores a 40 minutos se obtienen unas elasticidades de entre -0,2 y -0,5 con un promedio de -0,35.
- Tiempos de viaje de entre 40 y 80 minutos se obtienen unas elasticidades de entre -0,4 y -1,2 con un promedio de -0,6.
- Y, finalmente, para tiempos de viaje de entre 80 y 180 minutos se encuentran elasticidades de entre -0,6 y -1,7 con un promedio de -0,95.

No existe una única elasticidad que caracteriza la variación de la demanda en función de la velocidad media para todas las líneas de alta velocidad, sino que ésta depende de una serie de factores, ya expuestos a lo largo de este capítulo, cuyo cálculo debe ser específico para cada caso. También puede afirmarse que los resultados aquí obtenidos están en línea con lo obtenido por otros autores, por lo que se demuestra así que la metodología empleada y los modelos propuestos son válidos.

Veamos a continuación los datos obtenidos en otros estudios relacionados con la estimación de elasticidades de demanda:

- Puede citarse como relevante el trabajo de (Börjesson, 2012). En él se calcula la elasticidad de la demanda con respecto a un incremento del 10% en factores como: tiempo de viaje del vehículo privado, precio del combustible, tiempo de viaje del ferrocarril, precio del billete del ferrocarril y los ingresos, obteniendo los siguientes valores (Figura 37) muy similares a los que exponen ciertos autores citados también en el mismo artículo. Por ejemplo, (Burge, Woo Kim, & Rohr C.,

2011) establece que la elasticidad de la demanda a la tarifa es de -0,5 para viajes de trabajo, -0,9 para viajes de cercanías y -0,6 para otros viajes privados.

		Coche	Autobús	Avión	Ferrocarril	Total
Tiempo de viaje en coche	Business	-0,87	0,6	0,55	0,66	-0,11
	Privado	-0,53	0,57	0,6	0,54	-0,19
	Total	-0,58	0,58	0,57	0,57	-0,17
Precio del combustible	Business	-0,14	0,11	0,09	0,1	-0,03
	Privado	-0,15	0,16	0,17	0,15	-0,04
	Total	-0,14	0,16	0,12	0,14	-0,04
Tiempo de viaje en ferrocarril	Business	0,16	0,14	0,16	-1,5	-0,07
	Privado	0,06	0,09	0,2	-1,01	-0,08
	Total	0,08	0,1	0,18	-1,12	-0,08
Precio del billete del ferrocarril	Business	0,07	0,07	0,07	-0,72	-0,04
	Privado	0,04	0,07	0,06	-0,59	-0,05
	Total	0,05	0,07	0,06	-0,61	-0,05
Ingresos	Business	-0,59	-1,57	6,48	1,5	2,15
	Privado	0,25	0,34	0,42	0,35	0,29
	Total	0,11	0,13	3,85	0,6	0,72

Figura 37. Elasticidades de la demanda a la distancia de recorrido derivada de incrementar un 10% cada concepto.

Fuente: (Börjesson, 2012).

Además (Börjesson, 2012) recoge en una tabla resumen (Figura 38) las elasticidades obtenidas, para una serie de líneas de alta velocidad, trabajo llevado a cabo en diferentes estudios. Estas elasticidades han sido calculadas utilizando diferentes metodologías, información incluida también en la tabla que se muestra a continuación.

Estudio	Elasticidad	Comentario
Román el al. (2010)	-0,4 (Madrid-Barcelona)	Cross-section RP/SP data. Corredores de alta velocidad deReino Unido.
	-0,6 (Madrid-Zaragoza)	Corredores españoles de alta velocidad.
Atkins (2002)	-0,9 /-1,3 (bsn); -0,8/-0,9 (priv)	Cross-section RP/SP data. Corredores de alta velocidad del Reino Unido.
Cabanne (2003)	0,3/0,45	Modelos de datos de series de tiempo.
	-0,16 (Air cross-elasticity)	Elasticidad de la demanda a la accesibilidad al ferrocarril. Corredor de alta velocidad de Francia.
Bok et al. (2010)	-0,6 (bsn)	Elasticidad de la demanda a la distancia media.
	-0,5 (viaje al trabajo)	Portugal. Cross-section RP/SP data.
	-0,3 (otros)	
Rohr et al. (2010)	-0,9 bns)	Elasticidad de la demanda a la distancia media. Reino Unido.
	-0,4 (priv)	Cross-section RP/SP data.
Dargay (2010)	-0,49 - -3,04	Series de tiempo agregadas. Reino Unido. Diferentes propósitos longitud de los segmentos de viaje.
Paris-Lyon	-1,6 (fase 1)	Línea de alta velocidad 1981-1983.
(Nash, 2010)	-1,1 (fase 2)	
Madrid-Barcelona	-1,3	Línea de alta velocidad 2008.
Madrid-Sevilla	-1,2	Línea de alta velocidad 1992.

Figura 38. Elasticidad con respecto al tiempo de viaje encontrada

Fuente: (Börjesson, 2012).

- (Yousefi Mojir, 2011), en su tesis "*A computational model for optimal dimensional speed on new high-speed lines*", establece los siguientes valores de elasticidad de la demanda en función del tiempo de viaje:
  - Entre 31 y 120 minutos: -0,9.

  - Entre 121 y 240 minutos: -1,5.
  - Entre 241 y 360 minutos: -0,9.
  - Entre >360 minutos: -0,6.
- Finalmente cabe destacar el artículo (Cascetta & Coppola, 2011) en él se muestran los siguientes valores de elasticidad de la demanda al tiempo de viaje: entre -0,81 y -1,1 en términos de pasajeros y entre -0,71 y -1,0 en pasajeros-kilómetro.

Como aportación adicional de este capítulo al estudio de elasticidades, se pretende relacionar éstas con la distancia de recorrido. Se calcula, por lo tanto, la cuota de mercado adicional por cada kilómetro hora que se incrementa la velocidad en relación a la distancia del recorrido.

Si se incrementa la velocidad media en cada una de las relaciones del caso ejemplo y se calcula la cuota de mercado del tren de alta velocidad, se observa que el aumento de la demanda es prácticamente el mismo en relaciones de longitudes similares. También se observa que a medida que las distancias entre origen-destino aumentan, el incremento de la cuota de mercado aumenta.

En la gráfica que se expone a continuación (Figura 39), se representan la elasticidad media (refiriéndose a la variación de la cuota de mercado en función del tiempo de viaje) y la longitud (en kilómetros) de todas las relaciones del corredor, se reconoce claramente cómo la elasticidad media es mayor al ser mayor la distancia entre el origen y el destino.

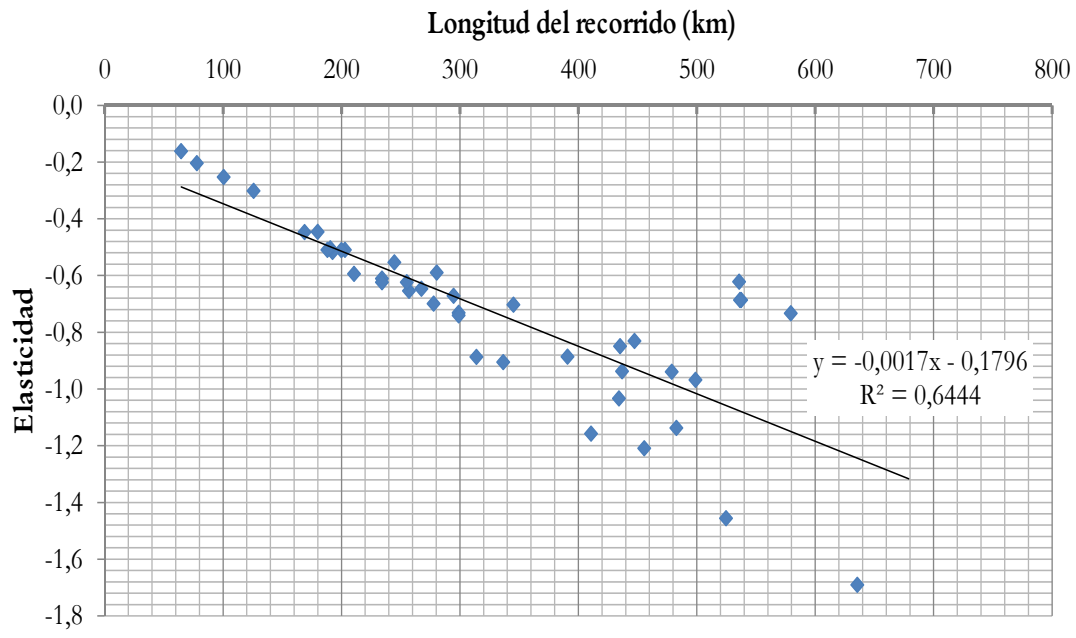


Figura 39. Elasticidad de la demanda al tiempo de viaje en función de la longitud del recorrido

Fuente: Elaboración Propia

Por lo tanto, puede afirmarse que:

$$Elasticidad = f(longitud\ de\ recorrido) \qquad (2.\ 16)$$

Conocida la ecuación ((2. 15)) la expresión quedaría de la siguiente forma

$$\frac{Porcentaje\ de\ cambio\ de\ la\ demanda\ (\%)}{Porcentaje\ de\ cambio\ del\ tiempo\ de\ viaje\ (\%)} = f(longitud\ de\ recorrido) \quad (2.\ 17)$$

Tras observar esta gráfica y determinar la línea de tendencia, la elasticidad se puede estimar de la siguiente forma:

$$Elasticidad = -0{,}0017 \times L - 0{,}1796 \quad (2.\ 18)$$

Donde:

- L: distancia del recorrido (km).

Combinando (2. 17)y (2. 18), se obtiene:

$$\frac{Porcentaje\ de\ cambio\ de\ la\ demanda\ (\%)}{Porcentaje\ de\ cambio\ del\ tiempo\ de\ viaje\ (\%)} = (-0{,}0017 \cdot L - 0{,}1796) \quad (2.\ 19)$$

Esta ecuación permitiría calcular, de antemano y de forma aproximada, el incremento de la cuota de mercado que existirá al aumentar o disminuir una determinada cantidad la velocidad media en una relación dada del corredor de Levante.

Por ejemplo, si se incrementa la velocidad media en 10km/h (se pasa de 180km/h a 190km/h) en la línea Madrid-Albacete (314 km), suponiendo que la cuota de mercado para 180km/h es de 4,33%, la cuota de mercado para una velocidad de 190km/h se puede calcular de la siguiente forma:

- Tiempo de viaje (%)= $\frac{T_{final} - T_{Inicial}}{T_{inicial}} = \frac{\frac{314}{190} - \frac{314}{180}}{\frac{314}{180}}$ =-5,26%
- Elasticidad = (-0.0017*314-0.1796) = -0.713
- $\%_{Cuotafinal}$(190km/h)=$\%_{Cuotainicial}$(180km/h)+$\%_{Cuotainicial}$(180km/h)*(ΔTiempo· Elasticidad) = 4,33% + 4,33%· 3,75% = 4,49%.

A modo de ejemplo, utilizando la metodología propuesta se calcula la demanda para todas y cada una de las relaciones del corredor de Levante en el supuesto que se incrementase la velocidad media en 10km/h (pasando de 220km/h, velocidad inicial considerada en el cálculo de la demanda, a 230km/h). A continuación se muestran los resultados obtenidos (Tabla 25).

Tabla 25. Número de viajeros por modo de transporte para el año 2011.

		Velocidad 220km/h			Velocidad 230km/h				Velocidad 220km/h			Velocidad 230km/h	
Origen	Destino	% Tren AV	Demanda 220km/h	Elasticidad	% Tren AV	Demanda 230 km/h	Origen	Destino	% Tren AV	Demanda 220 km/h	Elasticidad	% Tren AV	Demanda 230 km/h
ALBACETE	ALICANTE	7,15%	48.056	-0,4623	7,29%	49.022	CUENCA	ALBACETE	14,5%	18.838	-0,3905	14,72%	19.158
ALBACETE	ALMERÍA	7,44%	5.665	-0,8676	7,72%	5.878	CUENCA	ALICANTE	21,0%	15.917	-0,6732	21,61%	16.383
ALBACETE	BARCELONA	56,12%	107.124	-1,0770	58,75%	112.141	CUENCA	ALMERÍA	18,7%	2.542	-1,0785	19,60%	2.661
ALBACETE	CASTELLÓN	13,04%	16.596	-0,6071	13,38%	17.034	CUENCA	BARCELONA	59,7%	46.570	-1,0976	62,57%	48.792
ALBACETE	CUENCA	12,42%	16.568	-0,3905	12,64%	16.850	CUENCA	CASTELLÓN	16,6%	7.785	-0,6278	17,03%	7.998
ALBACETE	MADRID	5,18%	95.754	-0,7056	5,34%	98.692	CUENCA	MADRID	5,7%	100.858	-0,4947	5,78%	103.027
ALBACETE	MURCIA	2,87%	32.463	-0,5325	2,94%	33.215	CUENCA	MURCIA	9,6%	9.872	-0,7434	9,90%	10.191
ALBACETE	TARRAGONA	31,51%	12.195	-0,9086	32,76%	12.677	CUENCA	TARRAGONA	34,4%	5.625	-0,9293	35,74%	5.852
ALBACETE	VALENCIA	7,79%	76.758	-0,4989	7,95%	78.423	CUENCA	VALENCIA	12,6%	29.818	-0,5195	12,87%	30.491
ALICANTE	ALBACETE	8,23%	50.865	-0,4623	8,39%	51.888	MADRID	ALBACETE	5,2%	96.094	-0,7056	5,35%	99.042
ALICANTE	ALMERÍA	14,10%	47.211	-0,6451	14,50%	48.535	MADRID	ALICANTE	20,1%	368.346	-0,9883	21,02%	384.174
ALICANTE	BARCELONA	49,34%	300.429	-1,0801	51,66%	314.537	MADRID	ALMERÍA	9,6%	49.327	-1,3936	10,21%	52.316
ALICANTE	CASTELLÓN	12,19%	39.639	-0,6102	12,51%	40.690	MADRID	BARCELONA	1,4%	67.178	-1,4127	1,50%	71.304
ALICANTE	CUENCA	20,68%	15.600	-0,6732	21,29%	16.056	MADRID	CASTELLÓN	12,4%	117.206	-0,9428	12,94%	122.011
ALICANTE	MADRID	20,59%	373.199	-0,9883	21,47%	389.235	MADRID	CUENCA	5,6%	103.063	-0,4947	5,69%	105.280
ALICANTE	MURCIA	5,76%	448.788	-0,3101	5,84%	454.838	MADRID	MURCIA	10,4%	234.047	-1,0585	10,91%	244.819
ALICANTE	TARRAGONA	25,94%	29.750	-0,9117	26,97%	30.930	MADRID	TARRAGONA	14,9%	64.772	-1,2444	15,76%	68.276
ALICANTE	VALENCIA	6,64%	185.146	-0,5019	6,78%	189.186	MADRID	VALENCIA	22,1%	1.155.878	-0,8346	22,94%	1.197.819
ALMERÍA	ALBACETE	7,34%	5.582	-0,8676	7,61%	5.793	MURCIA	ALBACETE	3,2%	36.811	-0,5325	3,32%	37.664
ALMERÍA	ALICANTE	13,39%	46.472	-0,6451	13,76%	47.775	MURCIA	ALICANTE	5,7%	450.000	-0,3101	5,79%	456.067
ALMERÍA	BARCELONA	82,52%	101.715	-1,4853	87,85%	108.284	MURCIA	ALMERÍA	11,0%	85.674	-0,5146	11,25%	87.591
ALMERÍA	CASTELLÓN	30,49%	12.113	-1,0154	31,83%	12.648	MURCIA	BARCELONA	52,5%	259.722	-1,1502	55,17%	272.711
ALMERÍA	CUENCA	18,70%	2.477	-1,0785	19,58%	2.593	MURCIA	CASTELLÓN	14,9%	42.807	-0,6803	15,30%	44.073
ALMERÍA	MADRID	9,92%	50.273	-1,3936	10,52%	53.319	MURCIA	CUENCA	9,4%	9.684	-0,7434	9,71%	9.997
ALMERÍA	MURCIA	10,83%	84.990	-0,5146	11,07%	86.891	MURCIA	MADRID	10,6%	242.828	-1,0585	11,05%	254.003
ALMERÍA	TARRAGONA	53,12%	11.020	-1,3169	56,16%	11.651	MURCIA	TARRAGONA	31,5%	30.590	-0,9819	32,80%	31.896
ALMERÍA	VALENCIA	18,81%	48.865	-0,9071	19,55%	50.792	MURCIA	VALENCIA	8,1%	184.164	-0,5721	8,34%	188.745
BARCELONA	ALBACETE	58,57%	108.530	-1,0770	61,31%	113.612	TARRAGONA	ALBACETE	33,3%	12.342	-0,9086	34,61%	12.830
BARCELONA	ALICANTE	52,29%	308.622	-1,0801	54,74%	323.115	TARRAGONA	ALICANTE	30,8%	33.244	-0,9117	31,99%	34.562
BARCELONA	ALMERÍA	77,95%	117.957	-1,4853	82,99%	125.575	TARRAGONA	ALMERÍA	55,7%	11.069	-1,3169	58,93%	11.703
BARCELONA	CASTELLÓN	25,95%	210.590	-0,6495	26,68%	216.536	TARRAGONA	BARCELONA	9,5%	152.795	-0,3480	9,62%	155.107
BARCELONA	CUENCA	59,57%	45.226	-1,0976	62,41%	47.384	TARRAGONA	CASTELLÓN	14,4%	31.524	-0,4811	14,70%	32.184
BARCELONA	MADRID	1,48%	69.080	-1,4127	1,57%	73.323	TARRAGONA	CUENCA	34,2%	5.419	-0,9293	35,58%	5.638
BARCELONA	MURCIA	54,15%	260.648	-1,1502	56,86%	273.684	TARRAGONA	MADRID	14,8%	66.710	-1,2444	15,61%	70.319
BARCELONA	TARRAGONA	10,00%	169.671	-0,3480	10,15%	172.238	TARRAGONA	MURCIA	36,1%	32.812	-0,9819	37,59%	34.212
BARCELONA	VALENCIA	41,76%	918.668	-0,7578	43,14%	948.935	TARRAGONA	VALENCIA	20,6%	111.894	-0,5894	21,09%	114.762
CASTELLÓN	ALBACETE	15,18%	17.661	-0,6071	15,58%	18.127	VALENCIA	ALBACETE	8,2%	78.348	-0,4989	8,42%	80.047
CASTELLÓN	ALICANTE	12,46%	39.511	-0,6102	12,79%	40.560	VALENCIA	ALICANTE	6,5%	133.937	-0,5019	6,69%	136.859
CASTELLÓN	ALMERÍA	32,15%	12.490	-1,0154	33,57%	13.041	VALENCIA	ALMERÍA	19,4%	64.684	-0,9071	20,21%	67.235
CASTELLÓN	BARCELONA	26,10%	208.281	-0,6495	26,83%	214.162	VALENCIA	BARCELONA	28,4%	630.328	-0,7578	29,34%	651.094
CASTELLÓN	CUENCA	16,10%	7.620	-0,6278	16,54%	7.828	VALENCIA	CASTELLÓN	9,1%	462.771	-0,2879	9,26%	468.563
CASTELLÓN	MADRID	11,35%	111.077	-0,9428	11,82%	115.630	VALENCIA	CUENCA	12,1%	26.432	-0,5195	12,41%	27.029
CASTELLÓN	MURCIA	15,74%	43.964	-0,6803	16,20%	45.264	VALENCIA	MADRID	22,1%	1.149.876	-0,8346	22,89%	1.191.600
CASTELLÓN	TARRAGONA	12,84%	29.820	-0,4811	13,11%	30.444	VALENCIA	MURCIA	9,8%	199.450	-0,5721	10,03%	204.411
CASTELLÓN	VALENCIA	9,38%	480.033	-0,2879	9,50%	486.041	VALENCIA	TARRAGONA	16,0%	92.309	-0,5894	16,42%	94.674

Demanda 220 km/h	Demanda 230 km/h	Incremento en todo el corredor	Incremento en todo el corredor %
12.556.722	12.970.241	413.519	3,3%

Fuente: Elaboración propia.

Aumentando la velocidad media en todas las relaciones en 10km/h (pasando de 220km/h a 230km/h) se observa un incremento, en el total del corredor, de aproximadamente de medio millón de viajeros, pasando de 12,55 millones de viajeros a 12,9 millones. Es decir, una reducción del tiempo de viaje de 4,34% ha supuesto un incremento de viajeros del 3,3% (se obtiene una elasticidad media en el corredor de -0,76).

2.4 EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO DE LA DEMANDA PARA LA MISMA OFERTA

Conocida la demanda total para cada una de las rutas, y conocida la distribución modal, el capítulo de estimación de la demanda se cierra con la determinación de la evolución de ésta a lo largo de la vida del proyecto, tarea que llevará a cabo en esta sección.

Puede afirmarse que el comportamiento de la demanda depende, como se ha expuesto en el apartado anterior, de un conjunto de factores, entre los que se encuentra el coste que supone viajar (coste generalizado), además de una serie de variables económicas y demográficas (PIB, empleo, población…) que explican bien la movilidad. El comportamiento de estas variables a largo plazo es incierto y de difícil cuantificación, por lo que hace complicado pronosticar tráficos a lo largo de la vida, de una nueva infraestructura.

2.4.1 Efecto "Ramp-up"

La experiencia obtenida con la entrada en servicio de líneas de alta velocidad, en cuanto a evolución de demanda, demuestra que la demanda experimenta el efecto inicial llamado "*ramp up*", es decir, el tráfico presenta un importante crecimiento en los primeros años, debido, principalmente, a dos razones: i) a la reducción del coste generalizado en la ruta y, ii) a que el resto de modos mejoran su oferta con el objetivo de competir con este nuevo modo de transporte. El segundo año de explotación se producen también incrementos significativos de demanda (menores que los del primer año, pero elevados), ya que estos nuevos servicios están más asentados en la ruta y la población empieza a conocerlos, se produce un cambio en los hábitos de los viajeros lo que supone un mayor acercamiento al tren de alta velocidad. Es a partir del tercer año, cuando el crecimiento de la demanda se estabiliza y se acomoda más a la evolución de la economía del país o de las regiones.

2.4.2 Evolución de la demanda en relación a variables socio-económicas

El problema complejo que supone estimar la evolución de la demanda a lo largo de la vida de una infraestructura, puede abordarse de dos formas diferentes. La primera de ellas consiste en analizar la evolución de la demanda en líneas de alta velocidad existentes, obtener de ellas el porcentaje medio de crecimiento y aplicarlo al caso estudio. En este caso pueden citarse como estudios relevantes los siguientes:

- (Fröidh, 2012), en él se sugiere un crecimiento anual de la demanda del 1,43% para los primeros 35 años de proyecto, después de los cuales la demanda se vuelve constante.
- El estudio ex-post de la línea Madrid-Sevilla, realizado por (De Rus & Nash, 2009) el cual estiman la evolución de la demanda para 30 años de vida del proyecto en un 3,125% acumulativo anual; suponiendo un crecimiento tendencial del PIB del 2,5% y una elasticidad de la demanda respecto a esta variable de 1,25.

Otra forma de abordar esta problemática es, por un lado, considerando que la oferta es la misma para todos los modos a lo largo de la vida del proyecto (tarifas, frecuencias, tiempos de viaje, …) y, por lo tanto, el coste generalizado no varía y por otro lado, suponiendo que las variables socio-económicas sí que varían. Por ello, se puede afirmar que, en estas condiciones la demanda depende exclusivamente de variables socio-económicas.

La relación entre la movilidad y las variables socio-económicas, especialmente la relación con el Producto Interior Bruto, ha sido estudiada en innumerables ocasiones. Puede citarse el estudio realizado por (Fernández Jáñez, 2012) en el marco del proyecto Optired, en él se comprueba empíricamente que la demanda crece solamente cuando el PIB crece por encima del 1%. En este caso, la expresión que permite estimar la variación de demanda anual se formula de la siguiente manera:

$$Variación\ demanda(\%) = 0{,}19 \times (VarPIB(\%) - 1)^2 + 1{,}906 \times (VarPIB(\%)) + 0{,}1216 \quad (2.\ 20)$$

Judit Fernández, más recientemente en (Fernández Jáñez, 2015) realiza un proceso de actualización, eliminando también aquellos años con grandes variaciones en la oferta. Tras este proceso, obtiene un ajuste más preciso, ajuste que se muestra en las figuras que se incluyen a continuación (Figura 40).

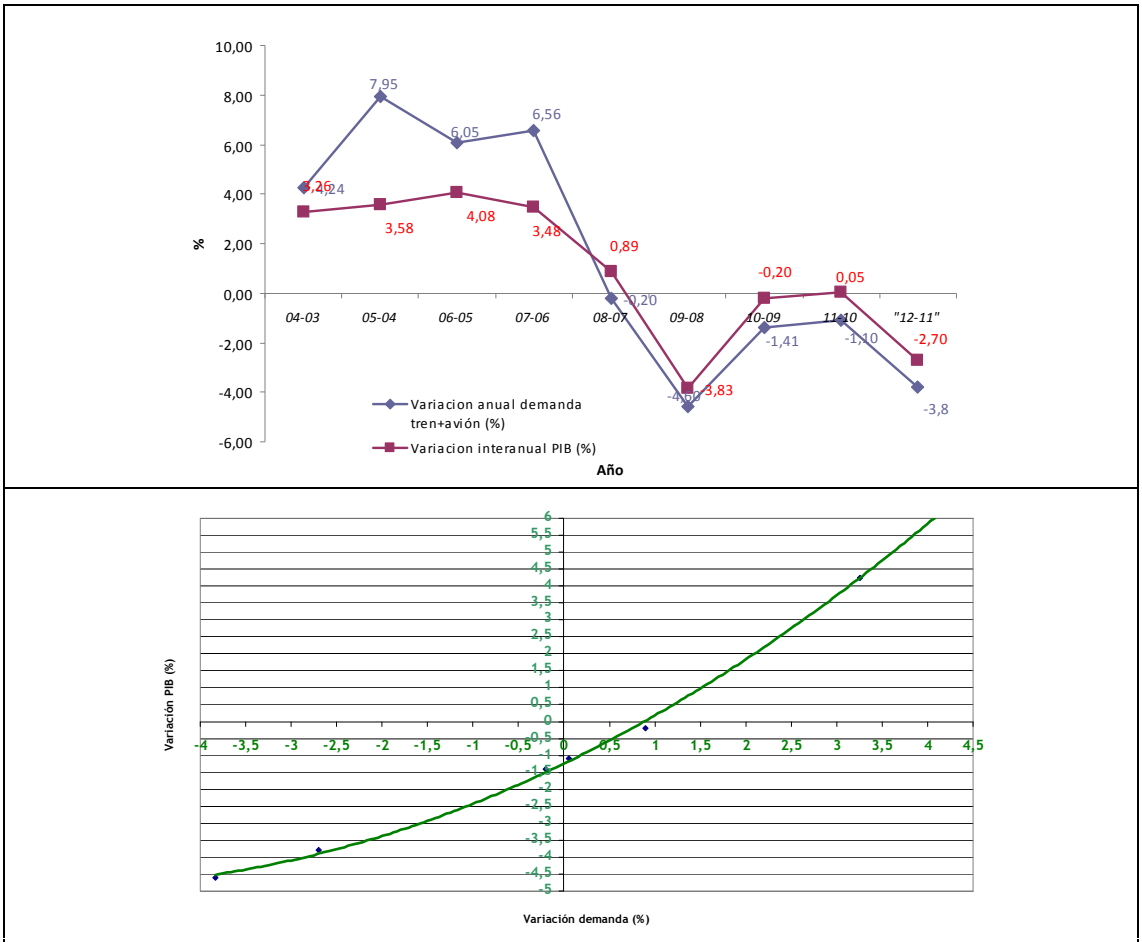


Figura 40. Variación anual de la demanda en función del PIB.

Fuente: (Fernández Jáñez, 2015)

Tras este nuevo ajuste, la ecuación resultante toma la siguiente expresión:

$$Var.demanda(\%) = 0{,}11698 \times (VarPIB(\%) - 0{,}8817)^2 + 1{,}906 \times (VarPIB(\%) - 0{,}8817) \quad (2.\ 21)$$

Tomando como base la ecuación (2. 21), se procede a determinar la evolución de la demanda para los sucesivos 30 años (periodo de tiempo considerado dentro del análisis coste-beneficio) suponiendo que nos encontramos en el año 2011 a la hora de realizar el análisis. Para ello, primero es necesario determinar las previsiones del PIB en España para los años seleccionados dentro del análisis. Las tablas que se muestran a

continuación muestran el valor que previsiblemente tomaría el PIB español según los informes económicos realizados por la OECD[7].

Tabla 26. Previsiones del PIB en España

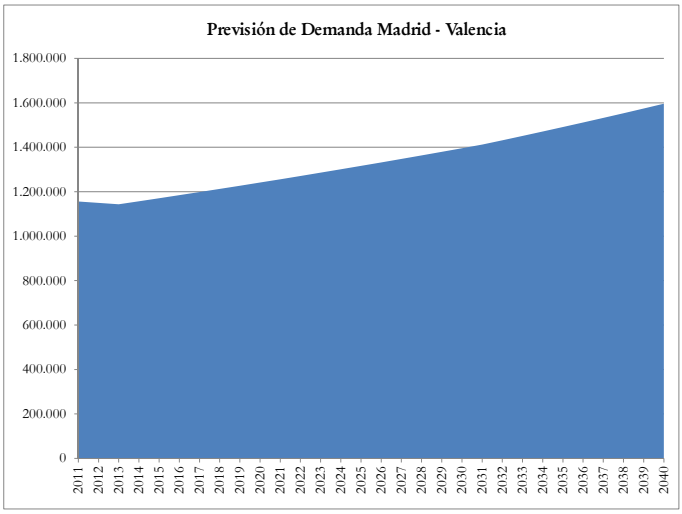
Previsiones OECD	
Año	Variación (%)
2008-2013	0,6%
2014-2030	1,5%
2031-2060	1,6%

Fuente: OECD.

Empleando la ecuación (2. 21) y conocida la previsión del PIB, se procede a determinar la evolución de la demanda para la línea de alta velocidad Madrid-Valencia, línea a la que se aplicará el análisis aquí estudiado. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla-gráfico (Tabla 27).

Tabla 27. Previsión de demanda para la línea de alta velocidad Madrid-Valencia.

INE Actualizado			
Año	Variación PIB (%)	Variación Demada	Demanda Madrid-
2011	-	-	1.155.878
2012	0,6%	-0,54%	1.149.673
2013	0,6%	-0,54%	1.143.501
2014	1,5%	1,18%	1.156.982
2015	1,5%	1,18%	1.170.622
2016	1,5%	1,18%	1.184.423
2017	1,5%	1,18%	1.198.386
2018	1,5%	1,18%	1.212.515
2019	1,5%	1,18%	1.226.809
2020	1,5%	1,18%	1.241.272
2021	1,5%	1,18%	1.255.906
2022	1,5%	1,18%	1.270.712
2023	1,5%	1,18%	1.285.693
2024	1,5%	1,18%	1.300.850
2025	1,5%	1,18%	1.316.187
2026	1,5%	1,18%	1.331.703
2027	1,5%	1,18%	1.347.403
2028	1,5%	1,18%	1.363.288
2029	1,5%	1,18%	1.379.360
2030	1,5%	1,18%	1.395.622
2031	1,5%	1,18%	1.412.075
2032	1,6%	1,37%	1.431.416
2033	1,6%	1,37%	1.451.022
2034	1,6%	1,37%	1.470.897
2035	1,6%	1,37%	1.491.043
2036	1,6%	1,37%	1.511.466
2037	1,6%	1,37%	1.532.168
2038	1,6%	1,37%	1.553.154
2039	1,6%	1,37%	1.574.427
2040	1,6%	1,37%	1.595.992



Fuente: Elaboración propia.

Puede observarse cómo los primeros años de servicio se produce una pequeña caída del tráfico debido, principalmente, a la crisis (la economía del país sufre una prolongada recesión), pero es a partir del 2014 cuando el tráfico se empieza a incrementar ya que las previsiones del PIB para esos años y para los sucesivos son superiores a 0,8%.

[7] OECD (2014): GROWTH PROSPECTS AND FISCAL REQUIREMENTS OVER THE LONG TERM

http://www.oecd.org/eco/outlook/Long-term-growth-prospects-and-fiscal-requirements.pdf

Una vez determinado el volumen de tráfico en el corredor de Levante (a igualdad de oferta de todos los modos) la sensibilidad de éste a la variación de la velocidad y su evolución a lo largo de la vida útil de la infraestructura, se procede a determinar los ingresos que el operador verá reflejado en su cuenta de resultados.

2.5 INGRESOS Y SU RELACIÓN CON LA VELOCIDAD

En esta sección se diferenciarán los ingresos generados por el operador ferroviario y los ingresos que obtendrá el administrador de la infraestructura, principalmente, por ser la base del análisis financiero que se realizará de ambos agentes en capítulos sucesivos.

En el primer apartado de esta sección se definirá y cuantificará los ingresos que un operador ferroviario obtendrá por prestar servicio de dos formas diferentes: (i) considerando un ingreso fijo por viajero-kilómetro con independencia de la velocidad y (ii) considerando que el ingreso por viajero-kilómetro se obtiene tras el análisis de las diferentes alternativas que se presentan. Se analizará y explicarán también, las diferencias en ingresos que se obtienen aplicando ambos modelos en la línea Madrid-Valencia.

En el segundo apartado se definirán los ingresos del gestor de la infraestructura y la metodología aplicada para su estimación. No se entrará en el análisis de las diferentes estructuras del canon empleadas por los diferentes países (que son muy diversas). El objetivo no es aplicar esta metodología en un solo escenario, sino más bien nos centraremos en emplear, a partir de metodologías contrastadas, aquellos modelos que permitan la estimación más homogénea posible, permitiendo así extrapolarse a otros casos que puedan plantearse en el futuro.

2.5.1 Ingresos del operador ferroviario

Los ingresos que se obtienen de la operación de transporte corresponden a las contraprestaciones económicas por la prestación del servicio, es decir, los ingresos de un operador de transporte ferroviario provienen mayoritariamente del tráfico y del precio pagado por el servicio de transporte.

Por lo tanto, cuando se habla de los ingresos de un operador ferroviario rápidamente se relaciona a dos conceptos básico: (i) número de billetes vendidos y (ii) a la cuantía de los mismos (precio del billete). Si el análisis se centra en cada una de las cuestiones de manera independiente sin analizar la relación que existe entre ambas, puede afirmarse que a mayor número de viajeros transportados (mayor demanda), mayor número de billetes vendidos y, por lo tanto, es claro que los ingresos del operador se incrementan. También es claro que, si se incrementa el precio del billete y se mantiene el número de viajeros, los ingresos son mayores.

Pero, puede afirmarse que el precio del billete influye claramente en la decisión de viajar y, por lo tanto, en el número de viajeros. A mayor precio, menos viajeros están dispuestos a viajar, ya que su coste generalizado se incrementa. Por ello, puede afirmarse que existe una relación inversamente proporcional entre la tarifa y el número de viajeros.

Otra cuestión relevante es la relación de la velocidad con el ingreso del operador. Como se ha mostrado en el capítulo anterior, un incremento de la velocidad media, supone una reducción del tiempo de viaje, lo que implica una reducción de coste generalizado asumido por los viajeros (a igualdad en el resto de variables). Se ha demostrado que esta reducción del coste generalizado, generalmente supone un incremento del número de viajeros (esto no se cumple siempre ni para todas líneas ni para todos los casos de igual manera véase Figura 35).

La pregunta que surge ahora es la siguiente: ¿qué relación existe entre la velocidad y el precio del billete? Los precios cambian o no en función de la velocidad, es el operador quién asume esta política, pues es él el que fija el precio del billete. Pero puede afirmarse, y la experiencia así lo demuestra, que reducciones de tiempo en el viaje conllevan a incrementos en el precio del billete. El operador "aprovecha" que el viajero está dispuesto a pagar más por el servicio si este es más rápido.

Un incremento en la tarifa, en mercados sensibles al precio (demanda elástica al precio), supone una reducción en el número de viajeros dispuestos a utilizar este modo, por lo que, aquello que en un principio se entendía como un incremento en los ingresos (incremento de la velocidad, reducción del tiempo de viaje, mayor número de viajeros) pues al final se puede convertir en una reducción en los ingresos, siempre y cuando el incremento del billete suponga reducciones en la demanda mayores que las ganancias asociadas al incremento de velocidad y al incremento de la cuantía del billete. En definitiva, el número de viajeros crecerá si el incremento del precio es menor que el valor del tiempo ahorrado, y disminuirá en caso contrario.

Por lo tanto, ante una reducción en el coste generalizado (ej. reducción del tiempo de viaje) el operador tiene dos alternativas: (i) mantener su precio y, por lo tanto, el mayor número de viajeros implicaría un incremento en los ingresos o (ii) variar la tarifa en busca de incrementar sus ingresos al máximo. En las siguientes secciones se estudiarán ambos supuestos de forma que se contemplará el cálculo de los ingresos en las diferentes formas que puede abordarse.

2.5.1.1 Ingresos del operador si no hay influencia de la velocidad en el precio del billete

En este supuesto se contemplará la hipótesis de que el precio del billete es fijo sea cual sea la velocidad, es decir, el operador no incrementará la tarifa por el hecho de reducir el tiempo de viaje. En este supuesto calcular el ingreso es relativamente sencillo, pues, básicamente se trata de calcular el número de viajeros que atenderá el operador (en función de la velocidad) y multiplicarlo por el ingreso que obtiene el operador por viajero.

Un incremento de la velocidad supondrá un incremento de los viajeros y, por lo tanto, para un ingreso fijo por viajero, se incrementarán los ingresos del operador.

Pero primero se debe responder a la siguiente pregunta ¿cuál es el ingreso por viajero? Los ingresos que el operador de transporte obtiene con la venta de los billetes no corresponden íntegramente con el importe de éstos, es decir, no corresponde al total pagado por el viajero. No debe pues confundirse el precio pagado por los viajeros con el ingreso obtenido por el operador de transporte, debido principalmente a que: los viajeros pagan el IVA de los billetes, determinados servicios son subvencionados por la administración complementando el precio del billete pagado por el viajero y a que del ingreso bruto deben descontarse las devoluciones por suspensión del servicio programado, retrasos…

Otra de las causas que hacen que el ingreso medio por viajero no coincida con el precio del billete es la existencia de descuentos sobre el precio nominal (ida y vuelta, carnet joven, tarjeta dorada, tarifa web…) y la existencia de precios diferentes para un mismo recorrido debido a las diferentes clases (clase turista, preferente, club).

También es importante tener en cuenta que el indicador "ingresos por viajero" (€/viajero) ofrece poca información, exceptuando los casos en el que las rutas tienen aproximadamente la misma distancia. Comparar entre diversos modos de transporte o entre diferentes servicios dentro de un mismo modo de transporte sólo puede hacerse en un mismo rango de distancias, debido mayoritariamente al efecto de las llamadas "tarifas regresivas" que reflejan una reducción del precio por kilómetro a medida que se incrementa el número de kilómetros.

El indicador que mejor y más información ofrece, en relación a la variable económica ingresos, será un indicador que relaciona estas tres variables: ingresos, viajeros y distancia. A este indicador se le conoce como "percepción media". La "percepción media", medida en céntimos de euro viajero kilómetro (c€/viajero-kilómetro), se obtiene como división de la cantidad total de ingresos comerciales en un periodo de tiempo y los viajeros kilómetro transportados.

Según (García Álvarez & et al., 2012) valores típicos en España pueden ser:

- En servicios regulares interurbanos de autobús entre 2 y 5c€/vkm.
- En servicios interurbanos ferroviarios de 4 a 8c€/vkm.
- En servicios de alta velocidad ferroviaria entre 10 y 20c€/vkm.

Utilizando datos reales de viajeros kilómetro y de ingresos, incluidos en el informe (Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 2012), es posible determinar la percepción media para los diferentes servicios prestados por Renfe. Esto permite a su vez, estimar la evolución de este indicador a lo largo de los últimos años.

En la tabla que se muestra a continuación (Tabla 28), se ha calculado la percepción media para aquellos servicios que tienen una velocidad media superior a 150km/h por considerarse valores útiles y de referencia en la planificación de una infraestructura de alta velocidad. Estos valores sirven para tener un orden de magnitud de lo que se ingresa por viajero en el caso español.

Tabla 28. Evolución de los ingresos, viajeros kilómetros y percepción media de los trenes españoles con velocidades medias mayores que 150km/h.

	Ingresos comerciales Miles de euros								Viajeros km Millones								Percepción media c€/v.km							
PRODUCTO AVE-AV	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
AVE Valladolid	-	240	12.827	4.286	3.182	2.786	2.123	1.946	-	1,7	92,3	30,5	21,3	18,3	14,4	16,8	-	14,1	13,9	14,1	14,9	15,2	14,7	11,6
AVE Madrid-Barcelona-Figueres	36.516	68.908	322.888	328.372	343.441	343.760	339.065	351.416	327,1	600,2	2.327,7	2.561,0	2.473,8	2.384,8	2.402,6	2.866,6	11,2	11,5	13,9	12,8	13,9	14,4	14,1	12,3
AVE Huesca	7.200	7.791	8.384	7.764	7.806	7.842	6.929	6.537	67,2	68,3	69,5	72,2	62,8	60,2	56,3	63,9	10,7	11,4	12,1	10,8	12,4	13,0	12,3	10,2
AVE Sevilla	188.238	190.390	188.035	171.923	162.044	160.019	143.442	136.961	1.489,8	1.477,4	1.473,2	1.325,0	1.222,4	1.185,0	1.097,5	1.193,3	12,6	12,9	12,8	13,0	13,3	13,5	13,1	11,5
AVE Málaga	-	1.588	110.362	109.104	107.834	109.285	100.834	99.976	-	13,6	930,6	906,8	861,6	852,5	810,4	909,1	-	11,7	11,9	12,0	12,5	12,8	12,4	11,0
AVE Valencia	-	-	-	-	3.067	102.250	90.540	86.119	-	-	-	-	22,4	710,3	665,6	708,3	-	-	-	-	13,7	14,4	13,6	12,2
AVE Albacete	-	-	-	-	-	1.009	1.948	873	-	-	-	-	-	7,3	15,1	8,6	-	-	-	-	-	13,9	12,9	10,2
AVE Toledo-Albacete	-	-	-	-	-	2.162	-	-	-	-	-	-	-	15,0	-	-	-	-	-	-	-	14,5	-	-
AVE Alicante	-	-	-	-	-	-	-	28.641	-	-	-	-	-	-	-	287,6	-	-	-	-	-	-	-	10,0
AVE Zargoza-Sevilla	-	-	-	-	-	-	-	516	-	-	-	-	-	-	-	6,5	-	-	-	-	-	-	-	7,9
AVE Valencia-Sevilla	-	-	-	-	-	-	3.993	8.343	-	-	-	-	-	-	36,2	91,4	-	-	-	-	-	-	11,0	9,1
AVE Transversal	-	-	-	34.953	49.448	58.030	59.408	65.107	-	-	-	379,0	520,2	613,0	703,1	941,8	-	-	-	9,2	9,5	9,5	8,4	6,9
Tráfico internacional AVE	-	-	-	-	-	-	-	1.072	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AV Madrid-Zaragoza-Barcelona	-	-	-	-	-	-	-	362	-	-	-	-	-	-	-	5,4	-	-	-	-	-	-	-	6,7
AV Valencia-Málaga	-	-	-	-	-	-	-	1.668	-	-	-	-	-	-	-	21,9	-	-	-	-	-	-	-	7,6
AV Madrid-Sevilla/Málaga	-	-	-	-	-	-	-	208	-	-	-	-	-	-	-	2,0	-	-	-	-	-	-	-	10,5
Serv. V. media > 175 km/h	**231.954**	**268.917**	**642.496**	**656.403**	**676.821**	**787.142**	**748.282**	**789.747**	**1.884,1**	**2.161,2**	**4.893,3**	**5.274,5**	**5.184,5**	**5.846,3**	**5.801,3**	**7.123,1**	**12,3**	**12,4**	**13,1**	**12,4**	**13,1**	**13,5**	**12,9**	**11,1**

Fuente: Elaboración propia con datos Observatorio del ferrocarril 2013.

Estos valores pueden servir de referencia para determinar el ingreso económico del operador, conocida la percepción media para un determinado servicio, el ingreso por tráfico es el producto de esta percepción media por los viajeros kilómetro.

$$\textit{Ingresos por tráfico (c€)} = \textit{Percepción media (c€/vkm)} \times \textit{Viajeros Kilómetro(vkm)} \qquad (2.\ 22)$$

Por tanto, tras analizar los valores mostrados, es posible calcular los ingresos por tráfico en el entorno español una vez que se ha conocido la demanda. Determinando la demanda y su evolución con el incremento de la velocidad media, seríamos capaces de determinar el número de viajeros que el ferrocarril de alta velocidad es capaz de captar.

Si estos viajeros kilómetro se multiplican por un valor de percepción media, se obtienen los ingresos del operador.

Tomando como percepción media 13,5c€/vkm, valor medio correspondiente a servicios con velocidades medias superiores a 175km/h en el año 2011, se calcula el ingreso que obtendría un operador de transporte ferroviario de alta velocidad en el corredor de Levante conocida la demanda para 220km/h y para 230km/h (dato estimado en el capítulo anterior).

A continuación se muestra la tabla (Tabla 29) que recoge el ingreso medio (M€) que obtendría el operador en cada una de las rutas del corredor de Levante.

Tabla 29. Ingresos en el corredor de Levante para 220km/h y para 230km/h.

			Velocidad 220 km/h		Velocidad 230 km/h	
Origen	Destino	Distancia km	Demanda Viajeros	Ingresos €	Demanda Viajeros	Ingresos €
ALBACETE	ALICANTE	168,80	48.056	1.095.102	49.022	1.117.116
ALBACETE	ALMERÍA	410,70	5.665	314.071	5.878	325.918
ALBACETE	BARCELONA	535,75	107.124	7.747.889	112.141	8.110.705
ALBACETE	CASTELLÓN	255,24	16.596	571.848	17.034	586.944
ALBACETE	CUENCA	125,90	16.568	281.602	16.850	286.383
ALBACETE	MADRID	314,00	95.754	4.059.019	98.692	4.183.539
ALBACETE	MURCIA	210,70	32.463	923.406	33.215	944.786
ALBACETE	TARRAGONA	435,20	12.195	716.491	12.677	744.795
ALBACETE	VALENCIA	190,60	76.758	1.975.064	78.423	2.017.903
ALICANTE	ALBACETE	168,80	50.865	1.159.113	51.888	1.182.414
ALICANTE	ALMERÍA	277,90	47.211	1.771.174	48.535	1.820.852
ALICANTE	BARCELONA	537,55	300.429	21.801.926	314.537	22.825.721
ALICANTE	CASTELLÓN	257,04	39.639	1.375.473	40.690	1.411.963
ALICANTE	CUENCA	294,70	15.600	620.633	16.056	638.800
ALICANTE	MADRID	482,80	373.199	24.324.336	389.235	25.369.586
ALICANTE	MURCIA	77,90	448.788	4.719.675	454.838	4.783.304
ALICANTE	TARRAGONA	437,04	29.750	1.755.277	30.930	1.824.853
ALICANTE	VALENCIA	192,40	185.146	4.808.992	189.186	4.913.929
ALMERÍA	ALBACETE	410,70	5.582	309.503	5.793	321.177
ALMERÍA	ALICANTE	277,90	46.472	1.743.462	47.775	1.792.363
ALMERÍA	BARCELONA	779,45	101.715	10.703.057	108.284	11.394.228
ALMERÍA	CASTELLÓN	498,94	12.113	815.901	12.648	851.920
ALMERÍA	CUENCA	536,60	2.477	179.430	2.593	187.844
ALMERÍA	MADRID	724,70	50.273	4.918.442	53.319	5.216.447
ALMERÍA	MURCIA	200,00	84.990	2.294.726	86.891	2.346.069
ALMERÍA	TARRAGONA	678,94	11.020	1.010.026	11.651	1.067.856
ALMERÍA	VALENCIA	434,30	48.865	2.864.994	50.792	2.977.986
BARCELONA	ALBACETE	535,75	108.530	7.849.561	113.612	8.217.139
BARCELONA	ALICANTE	537,55	308.622	22.396.485	323.115	23.448.200
BARCELONA	ALMERÍA	779,45	117.957	12.412.141	125.575	13.213.680
BARCELONA	CASTELLÓN	280,51	210.590	7.974.790	216.536	8.199.983
BARCELONA	CUENCA	548,05	45.226	3.346.108	47.384	3.505.796
BARCELONA	MADRID	736,15	69.080	6.865.159	73.323	7.286.841
BARCELONA	MURCIA	579,45	260.648	20.389.419	273.684	21.409.105
BARCELONA	TARRAGONA	100,51	169.671	2.302.236	172.238	2.337.065
BARCELONA	VALENCIA	345,15	918.668	42.805.583	948.935	44.215.856
CASTELLÓN	ALBACETE	255,24	17.661	608.551	18.127	624.616
CASTELLÓN	ALICANTE	257,04	39.511	1.371.061	40.560	1.407.433
CASTELLÓN	ALMERÍA	498,94	12.490	841.258	13.041	878.397
CASTELLÓN	BARCELONA	280,51	208.281	7.887.345	214.162	8.110.069
CASTELLÓN	CUENCA	267,54	7.620	275.213	7.828	282.725
CASTELLÓN	MADRID	455,64	111.077	6.832.472	115.630	7.112.557
CASTELLÓN	MURCIA	298,94	43.964	1.774.241	45.264	1.826.724
CASTELLÓN	TARRAGONA	180,00	29.820	724.637	30.444	739.795
CASTELLÓN	VALENCIA	64,64	480.033	4.188.960	486.041	4.241.389
CUENCA	ALBACETE	125,90	18.838	320.187	19.158	325.623
CUENCA	ALICANTE	294,70	15.917	633.264	16.383	651.801
CUENCA	ALMERÍA	536,60	2.542	184.125	2.661	192.758
CUENCA	BARCELONA	548,05	46.570	3.445.551	48.792	3.609.985
CUENCA	CASTELLÓN	267,54	7.785	281.188	7.998	288.863
CUENCA	MADRID	188,10	100.858	2.561.132	103.027	2.616.216
CUENCA	MURCIA	336,60	9.872	448.585	10.191	463.085
CUENCA	TARRAGONA	447,54	5.625	339.828	5.852	353.558
CUENCA	VALENCIA	202,90	29.818	816.746	30.491	835.193
MADRID	ALBACETE	314,00	96.094	4.073.417	99.042	4.198.378
MADRID	ALICANTE	482,80	368.346	24.008.048	384.174	25.039.706
MADRID	ALMERÍA	724,70	49.327	4.825.894	52.316	5.118.292
MADRID	BARCELONA	736,15	67.178	6.676.135	71.304	7.086.206
MADRID	CASTELLÓN	455,64	117.206	7.209.535	122.011	7.505.077
MADRID	CUENCA	188,10	103.063	2.617.127	105.280	2.673.416
MADRID	MURCIA	524,70	234.047	16.578.601	244.819	17.341.599
MADRID	TARRAGONA	635,64	64.772	5.558.154	68.276	5.858.867
MADRID	VALENCIA	391,00	1.155.878	61.012.996	1.197.819	63.226.875
MURCIA	ALBACETE	210,70	36.811	1.047.078	37.664	1.071.322
MURCIA	ALICANTE	77,90	450.000	4.732.426	456.067	4.796.227
MURCIA	ALMERÍA	200,00	85.674	2.313.205	87.591	2.364.962
MURCIA	BARCELONA	579,45	259.722	20.316.976	272.711	21.333.040
MURCIA	CASTELLÓN	298,94	42.807	1.727.558	44.073	1.778.659
MURCIA	CUENCA	336,60	9.684	440.063	9.997	454.288
MURCIA	MADRID	524,70	242.828	17.200.587	254.003	17.992.210
MURCIA	TARRAGONA	478,94	30.590	1.977.863	31.896	2.062.298
MURCIA	VALENCIA	234,30	184.164	5.825.208	188.745	5.970.096
TARRAGONA	ALBACETE	435,20	12.342	725.128	12.830	753.774
TARRAGONA	ALICANTE	437,04	33.244	1.961.406	34.562	2.039.153
TARRAGONA	ALMERÍA	678,94	11.069	1.014.577	11.703	1.072.669
TARRAGONA	BARCELONA	100,51	152.795	2.073.253	155.107	2.104.618
TARRAGONA	CASTELLÓN	180,00	31.524	766.040	32.184	782.063
TARRAGONA	CUENCA	447,54	5.419	327.414	5.638	340.643
TARRAGONA	MADRID	635,64	66.710	5.724.475	70.319	6.034.187
TARRAGONA	MURCIA	478,94	32.812	2.121.494	34.212	2.212.062
TARRAGONA	VALENCIA	244,64	111.894	3.695.469	114.762	3.790.168
VALENCIA	ALBACETE	190,60	78.348	2.015.962	80.047	2.059.688
VALENCIA	ALICANTE	192,40	133.937	3.478.871	136.859	3.554.783
VALENCIA	ALMERÍA	434,30	64.684	3.792.471	67.235	3.942.043
VALENCIA	BARCELONA	345,15	630.328	29.370.273	651.094	30.337.906
VALENCIA	CASTELLÓN	64,64	462.771	4.038.328	468.563	4.088.871
VALENCIA	CUENCA	202,90	26.432	724.018	27.029	740.370
VALENCIA	MADRID	391,00	1.149.876	60.696.217	1.191.600	62.898.601
VALENCIA	MURCIA	234,30	199.450	6.308.705	204.411	6.465.619
VALENCIA	TARRAGONA	244,64	92.309	3.048.620	94.674	3.126.743

Ingresos a 220 km/h (€)	Ingresos a 230 km/h (€)	Incremento en todo el corredor (€)	Incremento (%)
584.760.053	607.855.328	23.095.275	3,9%

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la tabla anterior, se produce un incremento de aproximadamente 4% en los ingresos del operador por pasar de una velocidad media de 220km/h a 230km/h. Esta cifra (607M€) corresponde a los ingresos reales que obtendría el operador por ofrecer servicios de alta velocidad en todas las relaciones del corredor de Levante, teniendo en cuenta que el ingreso por viajero kilómetro es de 13,5 c€, sea cual sea su velocidad comercial.

2.5.1.2 Ingresos si hay influencia de la velocidad en el precio del billete

En este segundo supuesto se considera que el operador modifica el precio del billete en función de la velocidad comercial. Dependiendo de cuánto sea ésta modificación y de la elasticidad de la demanda al precio, nos podemos encontrar que el ingreso final que obtiene el operador es mayor o menor al que tenía sin variar el precio. Pues, si el incremento es muy elevado o la demanda es muy elástica al precio, la pérdida de viajeros producida a causa de este nuevo precio, no compensaría la subida de la tarifa por viajero. En contraposición, si la subida no es muy elevada o la demanda es poco elástica puede que el operador incremente sus ingresos.

Como se observa, si el operador decide variar su tarifa en función de la velocidad debe ser muy cuidadoso, porque puede producirse el efecto contrario al que se estaba buscando con la subida de velocidad. Los parámetros precio del billete, velocidad y demanda no deben pues analizarse de manera independiente, sino más bien de manera conjunta. Puede darse el caso que una bajada de la tarifa suponga un incremento de los ingresos para el operador debido al incremento en la demanda, pero también puede suceder que un incremento de la tarifa suponga una reducción de los beneficios del operador.

Por lo tanto, la fijación del precio del billete, en esta primera fase (antes de calcular los costes de explotación), debería abordarse como la búsqueda de aquella tarifa que maximice el ingreso, teniendo en cuenta la demanda de viajeros y la ruta en la que se está haciendo el análisis, ya que la elasticidad de la demanda a la velocidad y al precio es diferente dependiendo del caso estudiado.

Veamos pues lo que sucede en la línea Madrid-Valencia, para varios precios y para diferentes velocidades. Empleando la metodología expuesta en el capítulo 2.2.2, (ecuaciones (2. 7), (2. 13) y (2. 14)), se fijan diferentes velocidad medias (rango entre 220km/h y 350km/h) y diferentes precios por viajero.kilómetro (rango que va desde 8c€/vkm hasta 29c€/vkm). A partir de estos inputs se determina el coste generalizado asociado al tren de alta velocidad, suponiendo que la oferta del resto de modos no varía (mismo coste generalizado que el calculado en el capítulo de demanda, Tabla 16). Estimado el coste generalizado (2. 7), se calcula el reparto modal (2. 13) para cada uno de los casos y, como consecuencia, se obtendrá el número de viajeros que deberá atender el tren de alta velocidad, determinando la demanda inducida (2. 14), que aparecerá para cada velocidad, se obtiene finalmente los viajeros totales para cada caso.

La tabla que se muestra a continuación (Tabla 30) recoge los resultados obtenidos tras proceder al cálculo de la demanda para cada escenario (precio y velocidad).

Tabla 30. Demanda del modo tren de alta velocidad en la línea Madrid-Valencia (un sentido) en función del precio del billete y de la velocidad comercial.

	Velocidad comercial *(km/h)*													
Precio *(c€/vkm)*	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
8	3.432.439	3.501.262	3.559.906	3.610.294	3.654.040	3.692.472	3.726.670	3.757.506	3.785.679	3.811.744	3.836.145	3.859.234	3.881.289	3.902.530
8,5	3.319.147	3.389.134	3.449.057	3.500.784	3.545.883	3.585.653	3.621.155	3.653.245	3.682.613	3.709.811	3.735.281	3.759.373	3.782.366	3.804.483
9	3.202.588	3.273.534	3.334.564	3.387.480	3.433.807	3.474.809	3.511.521	3.544.786	3.575.280	3.603.551	3.630.035	3.655.082	3.678.971	3.701.926
9,5	3.083.196	3.154.874	3.216.814	3.270.751	3.318.159	3.360.265	3.398.077	3.432.418	3.463.953	3.493.220	3.520.650	3.546.591	3.571.320	3.595.063
10	2.961.457	3.033.619	3.096.252	3.151.021	3.199.344	3.242.407	3.281.190	3.316.492	3.348.965	3.379.136	3.407.429	3.434.189	3.459.691	3.484.158
10,5	2.837.897	2.910.279	2.973.371	3.028.764	3.077.817	3.121.674	3.161.281	3.197.413	3.230.707	3.261.675	3.290.735	3.318.226	3.344.418	3.369.536
11	2.713.076	2.785.401	2.848.706	2.904.499	2.954.084	2.998.555	3.038.825	3.075.643	3.109.624	3.141.270	3.170.987	3.199.107	3.225.899	3.251.581
11,5	2.587.578	2.659.564	2.722.822	2.778.784	2.828.689	2.873.584	2.914.342	2.951.688	2.986.213	3.018.403	3.048.656	3.077.294	3.104.581	3.130.733
12	2.461.999	2.533.360	2.596.309	2.652.201	2.702.207	2.747.325	2.788.389	2.826.094	2.861.009	2.893.602	2.924.259	2.953.294	2.980.963	3.007.478
12,5	2.336.939	2.407.391	2.469.771	2.525.350	2.575.234	2.620.369	2.661.550	2.699.438	2.734.581	2.767.428	2.798.351	2.827.653	2.855.583	2.882.349
13	2.212.984	2.282.255	2.343.809	2.398.835	2.448.374	2.493.320	2.534.425	2.572.318	2.607.522	2.640.469	2.671.513	2.700.948	2.729.015	2.755.912
13,5	2.090.702	2.158.534	2.219.015	2.273.255	2.322.231	2.366.782	2.407.619	2.445.339	2.480.438	2.513.326	2.544.345	2.573.775	2.601.849	2.628.759
14	1.970.631	2.036.781	2.095.957	2.149.191	2.197.393	2.241.351	2.281.733	2.319.104	2.353.932	2.386.607	2.417.455	2.446.743	2.474.694	2.501.492
14,5	1.853.266	1.917.517	1.975.174	2.027.195	2.074.425	2.117.601	2.157.351	2.194.202	2.228.598	2.260.909	2.291.442	2.320.452	2.348.152	2.374.719
15	1.739.058	1.801.215	1.857.163	1.907.781	1.953.858	1.996.077	2.035.025	2.071.197	2.105.009	2.136.811	2.166.892	2.195.494	2.222.819	2.249.035
15,5	1.628.402	1.688.301	1.742.371	1.791.420	1.836.179	1.877.281	1.915.273	1.950.618	1.983.705	2.014.861	2.044.360	2.072.431	2.099.264	2.125.019
16	1.521.638	1.579.143	1.631.192	1.678.529	1.721.826	1.761.670	1.798.568	1.832.951	1.865.184	1.895.571	1.924.370	1.951.794	1.978.026	2.003.214
16,5	1.419.046	1.474.052	1.523.965	1.569.469	1.611.181	1.649.645	1.685.329	1.718.633	1.749.896	1.779.402	1.807.393	1.834.069	1.859.600	1.884.127
17	1.320.848	1.373.275	1.420.964	1.464.541	1.504.570	1.541.552	1.575.919	1.608.043	1.638.237	1.666.767	1.693.857	1.719.693	1.744.435	1.768.216
17,5	1.227.204	1.277.005	1.322.409	1.363.987	1.402.255	1.437.674	1.470.643	1.501.504	1.530.546	1.558.018	1.584.126	1.609.045	1.632.924	1.655.886
18	1.138.221	1.185.374	1.228.456	1.267.988	1.304.441	1.338.237	1.369.744	1.399.276	1.427.101	1.453.449	1.478.511	1.502.449	1.525.402	1.547.483
18,5	1.053.954	1.098.461	1.139.209	1.176.668	1.211.272	1.243.405	1.273.405	1.301.561	1.328.120	1.353.293	1.377.258	1.400.165	1.422.142	1.443.295
19	974.406	1.016.293	1.054.715	1.090.098	1.122.839	1.153.288	1.181.754	1.208.503	1.233.762	1.257.725	1.280.557	1.302.396	1.323.360	1.343.550
19,5	899.541	938.853	974.976	1.008.298	1.039.179	1.067.939	1.094.861	1.120.187	1.144.129	1.166.862	1.188.537	1.209.285	1.229.212	1.248.412
20	829.284	866.082	899.951	931.243	960.284	987.366	1.012.748	1.036.652	1.059.270	1.080.764	1.101.274	1.120.918	1.139.796	1.157.994

Fuente: Elaboración propia.

Obsérvese que la demanda varía considerablemente con el precio del billete (demanda elástica al precio): a precios bajos 8c€/km el tren de alta velocidad atendería prácticamente la totalidad de tráfico entre Madrid y Valencia, por lo que una bajada de precios por debajo de esta cifra no sería una buena política del operador ya que no estaría captando tráfico de otros modos (no existe mucho más mercado). Precios altos (por encima de 23c€/vkm), tampoco sería una buena estrategia, pues provocan una pérdida de pasajeros especialmente acusada (cuotas de mercado entre el 3% y el 8%) en relación a precios bajos.

Como hemos visto anteriormente a medida que se reduce el tiempo de viaje (mayor velocidad comercial), mayor demanda y, por lo tanto, mayores ingresos para cada precio. Se observa también que para conseguir una determinada demanda existen múltiples combinaciones de precios y velocidades comerciales; ej. para una demanda de aproximadamente 1,1 millones de viajeros el operador tiene la posibilidad de fijar el billete a 18 c€/vkm y circular a 220km/h o fijar una tarifa de 19c€/vkm y circular entre 260 km/h y 270km/h.

Pero ¿cuál es la estrategia en la que el operador tendría más ingresos? Considerando que la diferencia entre el precio del billete y el ingreso por viajero del operador (percepción media) es de un 25%, al igual que se consideró en la sección anterior (para un precio de billete de 18c€/vkm se considera una percepción media de 13,5 c€/vkm) el ingreso del operador para cada uno de los escenarios propuestos se calcula multiplicando la percepción media por la demanda total.

A continuación se incluyen en una tabla (Tabla 31) los resultados obtenidos.

Tabla 31. Ingresos (M€) del operador en función de la velocidad comercial y del precio del billete.

Precio Medio (c€/vkm)	Percepción media (c€/vkm)	Ingresos (M€)													
		220 km/h	230 km/h	240 km/h	250 km/h	260 km/h	270 km/h	280 km/h	290 km/h	300 km/h	310 km/h	320 km/h	330 km/h	340 km/h	350 km/h
8	6,0	80,53	82,14	83,52	84,70	85,72	86,63	87,43	88,15	88,81	89,42	90,00	90,54	91,06	91,55
8,5	6,4	82,73	84,48	85,97	87,26	88,39	89,38	90,26	91,06	91,79	92,47	93,11	93,71	94,28	94,83
9	6,8	84,52	86,40	88,01	89,40	90,63	91,71	92,68	93,56	94,36	95,11	95,81	96,47	97,10	97,70
9,5	7,1	85,89	87,89	89,62	91,12	92,44	93,61	94,67	95,62	96,50	97,32	98,08	98,80	99,49	100,15
10	7,5	86,84	88,96	90,80	92,40	93,82	95,08	96,22	97,26	98,21	99,09	99,92	100,71	101,46	102,17
10,5	7,9	87,38	89,61	91,55	93,26	94,77	96,12	97,34	98,45	99,48	100,43	101,33	102,17	102,98	103,75
11	8,3	**87,52**	**89,85**	**91,89**	93,69	95,29	96,73	98,02	99,21	100,31	101,33	102,29	103,20	104,06	104,89
11,5	8,6	87,26	89,69	91,82	**93,71**	**95,39**	**96,91**	**98,28**	**99,54**	**100,71**	101,79	102,81	103,78	104,70	105,58
12	9,0	86,64	89,15	91,36	93,33	95,09	96,68	98,12	99,45	100,68	**101,83**	**102,90**	**103,93**	**104,90**	**105,83**
12,5	9,4	85,66	88,25	90,53	92,57	94,40	96,05	97,56	98,95	100,24	101,44	102,58	103,65	104,67	105,66
13	9,8	84,36	87,01	89,35	91,45	93,34	95,05	96,62	98,06	99,41	100,66	101,84	102,97	104,04	105,06
13,5	10,1	82,77	85,45	87,85	90,00	91,93	93,70	95,31	96,81	98,20	99,50	100,73	101,89	103,00	104,07
14	10,5	80,90	83,62	86,05	88,24	90,21	92,02	93,68	95,21	96,64	97,98	99,25	100,45	101,60	102,70
14,5	10,9	78,80	81,54	83,99	86,20	88,21	90,04	91,73	93,30	94,76	96,14	97,43	98,67	99,85	100,98
15	11,3	76,50	79,23	81,69	83,92	85,95	87,80	89,52	91,11	92,59	93,99	95,32	96,57	97,78	98,93
15,5	11,6	74,02	76,74	79,20	81,43	83,46	85,33	87,06	88,66	90,17	91,58	92,92	94,20	95,42	96,59
16	12,0	71,40	74,09	76,54	78,76	80,79	82,66	84,39	86,00	87,51	88,94	90,29	91,58	92,81	93,99
16,5	12,4	68,66	71,32	73,74	75,94	77,96	79,82	81,55	83,16	84,67	86,10	87,45	88,74	89,98	91,17
17	12,8	65,85	68,46	70,84	73,01	75,01	76,85	78,56	80,16	81,67	83,09	84,44	85,73	86,96	88,15
17,5	13,1	62,98	65,53	67,86	70,00	71,96	73,78	75,47	77,06	78,55	79,96	81,30	82,57	83,80	84,98
18	13,5	60,08	62,57	64,84	66,93	68,85	70,64	72,30	73,86	75,33	76,72	78,04	79,31	80,52	81,68
18,5	13,9	57,18	59,59	61,80	63,84	65,71	67,46	69,08	70,61	72,05	73,42	74,72	75,96	77,15	78,30
19	14,3	54,29	56,63	58,77	60,74	62,56	64,26	65,84	67,33	68,74	70,08	71,35	72,57	73,73	74,86
19,5	14,6	51,44	53,69	55,75	57,66	59,42	61,07	62,61	64,06	65,43	66,73	67,97	69,15	70,29	71,39
20	15,0	48,64	50,80	52,78	54,62	56,32	57,91	59,40	60,80	62,13	63,39	64,59	65,74	66,85	67,92

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior destaca (números en negrita y con fondo), para cada velocidad comercial el precio que permitiría obtener ingresos mayores, es decir, el precio por viajero kilómetro que permitiría maximizar el ingreso del operador, por ejemplo, para velocidades entre 220km/h y 240km/h un precio de 11c€/vkm maximizaría el ingreso del operador, para velocidades entre 250km/h y 310km/h el precio del billete debería de fijarse en 11,5 c€/vkm, mientras que para velocidades entre 310km/h y 350km/h el precio que optimiza el ingreso sería 12c€/vkm. El resto de combinaciones generaría menos ingresos para el operador.

Obsérvese también el mayor ingreso se produce para velocidades comerciales de 350km/h y tarifa de 12c€/vkm, circulando a menos velocidad o incrementando el precio del billete no ingresaría más dinero. Es importante entender que en esta fase aún no se ha tenido en cuenta el coste de explotación, por lo tanto, obtener el máximo ingreso no significa que el operador obtenga el máximo beneficio.

Si se comparan los resultados obtenidos con lo obtenido en la sección anterior, en el que el precio del billete no se modifica con la velocidad, se observa que existen múltiples combinaciones de precio y velocidad que mejoran o que permiten incrementar el ingreso para el operador. Si nos centramos en la línea Madrid-Valencia, pues en la Tabla 31, se ha destacado (celdas oscuras) las estrategias velocidad-precio que permitirían mejorar el ingreso del operador en relación a los ingresos obtenidos (63,2M€) suponiendo una percepción media de 13,5c€/vkm y una velocidad comercial de 230km/h (véase Tabla 29).

Realizando un análisis más detallado de la influencia del precio en los resultados, puede afirmarse que tanto para tarifas por debajo de 11c€/vkm como por encima de 12c€/vkm, el ingreso del operador es menor, sea cual sea la velocidad comercial (considerando en

el análisis un rango de velocidades entre 220km/h y 350km/h). En el gráfico que se muestra a continuación (Figura 41) puede observarse como es entre esas tarifas (11c€/vkm-12c€/vkm) donde todos los casos analizados alcanzan su máximo (ingreso máximo). Obsérvese también que es a partir de 11c€/vkm para velocidades bajas, 11,5 c€/vkm para velocidades medias y 12 c€/vkm para velocidades altas, donde se observa que la caída de los ingresos es más acentuada.

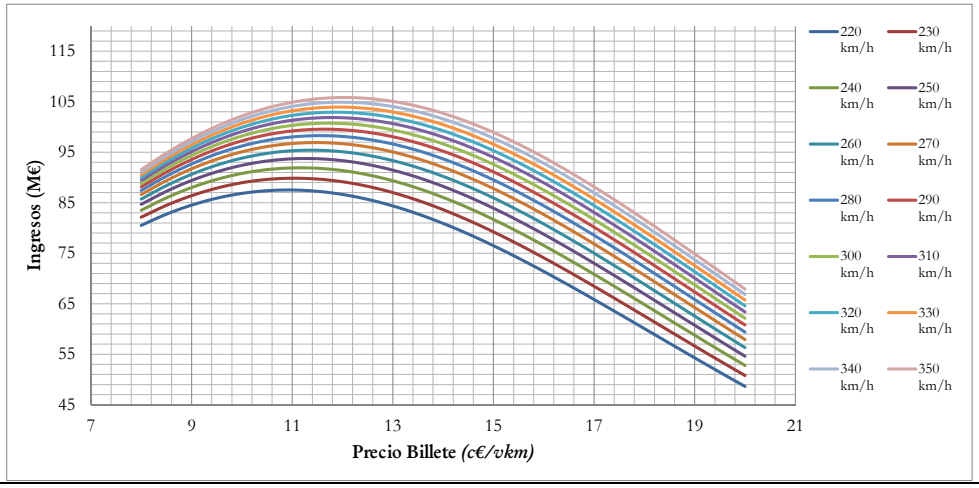


Figura 41. Ingresos (M€) para diferentes tarifas.

Fuente: Elaboración propia.

Centrándose ahora en la influencia de la velocidad en los resultados, tras el análisis se obtiene qué incrementos en la velocidad y, por lo tanto, reducciones del tiempo de viaje, implican incrementos en el ingreso del operador (véase Figura 42). A igualdad de precios, un aumento de la velocidad supone un incremento de la demanda y, por lo tanto, al igual que sucedía en la sección anterior (véase Tabla 29), este incremento de la demanda implica un aumento en los ingresos en todos los casos.

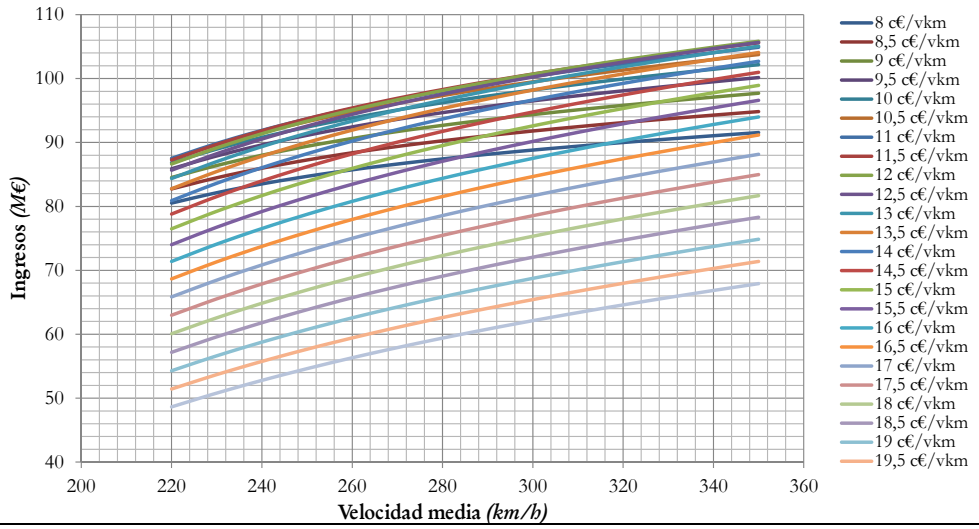


Figura 42. Ingresos (M€) para diferentes velocidades.

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de ambas figuras (Figura 41 y Figura 42) se destaca que incrementos en la velocidad o reducciones en la tarifa no suponen incrementos en los ingresos iguales en todos los casos, lo que se traduce en que existen elasticidades muy diferentes sea

cual sea el caso. La gráfica que se muestra a continuación (Figura 43) muestra la elasticidad del ingreso operador en relación a variaciones del precio (reducciones de la tarifa) para cada una de las velocidades consideradas.

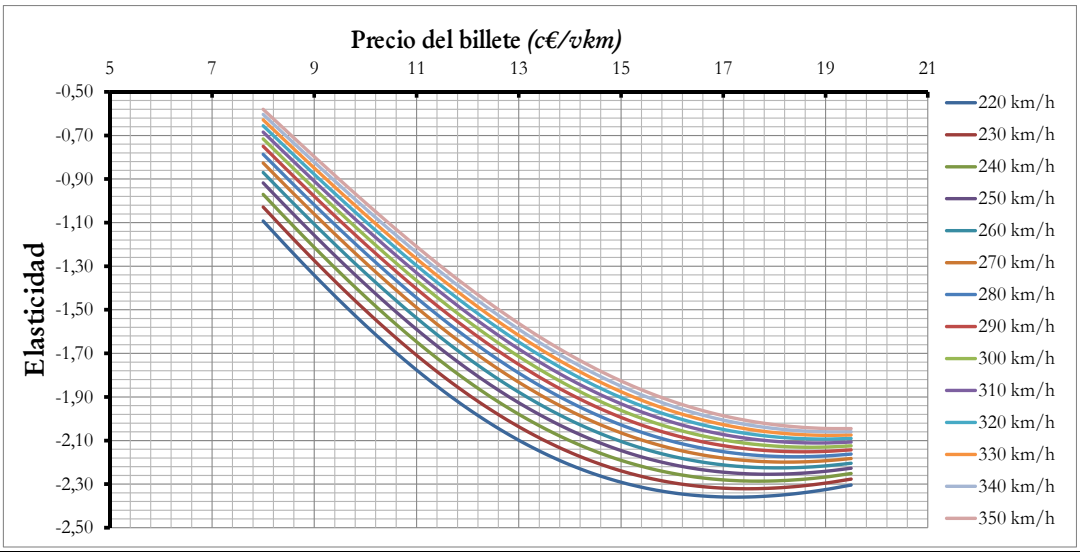


Figura 43. Elasticidad del ingreso del operador en relación a la tarifa

Fuente: Elaboración propia.

Analizando detalladamente la gráfica anterior (Figura 43), se obtienen las siguientes conclusiones:

- La elasticidad del ingreso al precio varía enormemente según sea la tarifa y la velocidad comercial. Se obtienen elasticidades que van desde el -0,58 al -2,36, confirmando que la utilización de elasticidades medias para calcular los ingresos del operador supondría grandes errores de cálculo e ineficiencias en las metodologías.
- Reducciones del precio en tarifas altas (ej. 20c€/vkm) obtendrían mayores ingresos (elasticidades que rondan los -2) que reducciones de precio en tarifas bajas (elasticidades menores que -1). Esto es debido a que, principalmente, reducciones del precio en tarifas altas, permiten captar muchos viajeros de otros modos de transporte, mientras que reducciones de la tarifa con precios bajos la ganancia de viajeros no es muy acentuada, ya que el tren de alta velocidad es muy competitivo con tarifas bajas. Obsérvese que cuando la tarifa es baja la demanda que atenderá el tren de alta velocidad es muy alta y, por lo tanto, cuando el tren de alta velocidad presenta elevadas cuotas de mercado, la reducción del precio no capta viajeros suficientes (porque no hay mercado suficiente) como para compensar la pérdida de ingreso por viajeros que supone bajar la tarifa.
- Cuanto mayor es la velocidad comercial, menor es la elasticidad del ingreso al precio, pues cuanta mayor velocidad comercial (menor tiempo de viaje) mayor demanda tendrá que atender el tren de alta velocidad. Si se centra el análisis en velocidades muy altas, sobretodo en este caso ejemplo Madrid-Valencia, puede afirmarse que el tren presenta cuotas de mercado elevadas (véase Tabla 30) a altas velocidades, una reducción en la tarifa en este escenario de alta demanda no supone grandes captaciones de tráfico ya que, al igual que en el caso anterior, no hay mucho más tráfico que captar de otros modos.

Con los resultados aquí mostrados se confirma que para conseguir el máximo ingreso para el operador, un análisis de la sensibilidad del viajero al precio y a la velocidad (tiempo de viaje) debe llevarse a cabo en cada proyecto, línea o alternativa, pero también cabe destacar que para poder seleccionar una combinaciones (precio-

velocidad) como la óptima estrategia para el operador no hay que olvidar que es necesario estimar el coste que supone operar a esta velocidad y precio, por lo que antes de seleccionar la estrategia óptima, se debe calcular los costes de explotación y costes de adquisición del material rodante, tarea que se realizará en los capítulos 2.6 y 3.1.

2.5.2 Ingresos del gestor de la infraestructura

Los ingresos que obtiene el gestor de la infraestructura provienen mayoritariamente de la tasa pagada por el operador del servicio de transporte al gestor de la infraestructura por el uso de sus instalaciones (vías, estaciones, instalaciones de electrificación…). Esta tasa pagada por el operador es el denominado "canon".

Su estructura y cuantía condicionará el comportamiento de los agentes gestores y operadores, por ello, ha sido y es hoy en día ámbito de múltiples estudios y discusiones sin llegar a una solución óptima que permita su aplicación eficiente. De ahí que en este capítulo se analicen y expongan, a modo de resumen, las diferentes estructuras aplicables para, posteriormente, basarse en aquellas experiencias que: (i) permita su aplicación de forma óptima en una línea determinada, es decir, que permita cuantificar de forma genérica el canon sea cual sea la línea y el país y, (ii) mejores resultados obtengan en términos de cobertura de costes y óptimos globales.

Antes de entrar en detalle en cuantía, estructura y metodología para su determinación, es necesario explicar las razones por las que se decide dedicar una parte de esta tesis al cálculo del canon. Si nos centrásemos exclusivamente en el análisis coste-beneficio del conjunto, que en definitiva es el instrumento empleado en este estudio para determinar la velocidad óptima en un determinado recorrido, no sería necesaria la estimación del canon. En efecto el canon es simplemente una transferencia económica interna dentro del sistema, es decir, una entidad (operador de transporte) perteneciente al sistema ferroviario, paga a otra entidad (gestor de la infraestructura) que también está dentro del sistema, con el objetivo de cubrir una serie de servicios que ésta realiza.

Pero, si ahora nos centramos en el análisis financiero de cada una de las entidades (operador de transporte y gestor de infraestructura), es claro que el canon influye en el flujo de caja y en la cuenta de resultados de cada uno de ellos. Otra cuestión importante que hace necesaria su estimación o por lo menos su estudio en un campo como el que se trata en esta tesis, es que, de una manera o de otra, el canon es parte implicada en la formación del precio final que pagan los viajeros y, por lo tanto, es parte implicada en la demanda, supuesto que el sistema regulatorio europeo, el operador no puede ser subvencionado, y por ello debe obtener beneficios.

El canon constituye una herramienta básica para la competitividad del ferrocarril en relación a otros modos de transporte, pues, un elevado canon pagado por el operador obliga a éste repercutir o trasladar este coste a los viajeros, lo que supone una pérdida de competitividad. El análisis de la relación canon-precio de billete-demanda de viajeros, está fuera del alcance de esta tesis, ya que, posiblemente, pueda desviar el tema que aquí se pretenda estudiar, pero es claramente una futura línea de investigación en línea con lo ya trabajado por (Sánchez Borrás, 2009).

2.5.2.1 Teoría económica aplicable

A mediados de los ochenta el negocio ferroviario empieza a replantearse en busca de una mayor eficiencia. La Unión Europea elige el camino de reforma (al igual que hizo para otros sectores de red) rompiendo con el monopolio de los sistemas integrados verticalmente y comenzando con una reforma que tiene como objetivo la separación y regulación de las actividades dentro del sector "desintegración vertical" (Fernández Arévalo, 2013). Se empieza a considerar que no todas las actividades ligadas al sector ferroviario tienen características propias de un monopolio (fuertes costes hundidos ligados a la inversión) y procede a regular la separación de actividades realizadas dentro del sector.

En definitiva, este nuevo escenario regulatorio y organizativo del transporte ferroviario impulsado por la Unión Europea se fundamenta en la segregación de las actividades de

operación de servicios de transporte y las actividades de gestión de la infraestructura. Es importante entender este nuevo esquema, que rompe con el esquema tradicional, para comprender la función que tiene el canon dentro del sector ferroviario.

El canon aparece como punto de contacto entre ambas actividades y toma un papel clave en la cuenta de resultados de ambas entidades, pues constituye un coste para el operador y un ingreso para el gestor de la infraestructura.

2.5.2.1.1 Contenido normativo: canon por el uso de la infraestructura en el UE

Desde 1991 un número de reformas (paquetes ferroviarios) han sido elaboradas por la Unión Europea y adoptadas por los Estados miembros con el objetivo, entre muchos otros, el de definir y regular, desde un marco legislativo, el canon por el uso de la infraestructura. Entre estas reformas se pueden distinguir las siguientes directivas:

- La Directiva 91/440/EEC8 establece por primera vez la obligación de introducir el canon por el uso de la infraestructura a nivel nacional (para todos los Estados miembros de la Unión Europea). Estipula que el canon debería ser calculado de tal manera que evite la discriminación entre los operadores y, además, establece que aunque no es obligatorio, en la manera de los posible, su estimación debe basarse en parámetros tales como kilómetros, velocidad, peso por eje, … y que cada Estado miembro es el responsable de seleccionar los parámetros que permitan su cálculo.
- La Directiva 95/19/EC9, al igual que la Directiva 91/440/EEC destaca la importancia de adoptar reglas comunes para la estimación del canon, así como garantizar el acceso de manera no discriminatoria y transparente.
- La Directiva 2001/14/EC10 recoge los principales principios básicos del canon establecidos en las anteriores directivas y, entre otras cosas, además establece que el gestor de la infraestructura debe publicar en la declaración sobre la red reglas comunes para su determinación. Permite también al gestor de la infraestructura exigir distintos niveles de recuperación de costes generales mediante el canon a través de recargos o mark-ups.
- Finalmente la Directiva 2012/34/EU11 que modifica las directivas anteriores, establece que “el canon de acceso mínimo y de acceso a infraestructuras que conectan con instalaciones de servicio será equivalente al coste directamente imputable a la explotación del servicio ferroviario”. Otro punto a destacar de esta directiva es cómo aborda el tema de los mark-up “los Estados miembros podrán, siempre que el mercado pueda aceptarlo, cobrar recargos basados en principios eficientes, transparentes y no discriminatorios, sin dejar de garantizar una competitividad óptima de los segmentos de mercado ferroviario” (artículo 32). Resaltando que “la cuantía de los cánones no debe excluir la utilización de las infraestructuras por parte de segmentos del mercado que puedan pagar al menos el coste directamente imputable a la explotación del servicio ferroviario, más un índice de rentabilidad que pueda asumir el mercado”.

A modo de resumen dentro de la regulación realizada por la Unión Europea en lo que se refiere al canon se destacan una lista de objetivos muy ambiciosa y compleja que puede resumirse en tres aspectos:

---

[8] Council Directive 91/440/EEC of 29 July 1991 on the development of the Community´s.

[9] Council Directive 95/19/EC of 19 June on the allocation of railway infrastructure capacity and the charging of infrastructure fees

[10] Directive 2001/14/EC of the European Parliament and of the Council of 26 February 2001 on the allocation of railway infrastructure capacity and the levying of charges for the use of railway infrastructure and safety certification

[11] Directive 2012/34/EU of the European Parliament and of the Council of 21 November 2012 establishing a single European railway area

1. Potenciar el uso eficaz de la infraestructura garantizando el acceso de manera no discriminatoria y transparente.
2. Potenciar la gestión eficaz de la oferta por parte del administrador de la infraestructura de manera que permita optimizar la utilización de la infraestructura.
3. Potenciar la productividad de los operadores. El canon debe enviar señales económicas que sean claras y coherentes lo que permita la toma de decisiones racional.

2.5.2.1.2 Cuantía

Para que un operador de servicios pueda desarrollar su actividad, el gestor de la infraestructura debe ofrecer un servicio que garantice un uso eficiente de la infraestructura. Proveer este servicio conlleva una serie de costes que deben de ser cubiertos total o parcialmente (cuantía del canon).

De acuerdo con (García Álvarez & Fernández Arévalo, 2011) los costes incurridos en el sector ferroviario se pueden resumir en:

- Costes de operación, costes relacionados con el movimiento, incluyendo también los costes de capital del operador.
- Coses de operación de la infraestructura (mantenimiento, gestión del tráfico, etc.).
- Costes de capital de la infraestructura.
- Otros costes (congestión, ambientales, accidentes…).

Decidir sobre el nivel de recuperación de los costes de la infraestructura a través del canon es una tarea compleja y ámbito de numerosas discusiones. De hecho, existen diferentes estructuras de canon que permiten recuperar o cubrir parte de los diferentes costes y que se expondrán en la siguiente sección.

2.5.2.1.3 Estructura

Teniendo en cuenta los objetivos del canon y su cuantía, en este apartado se definirán de forma resumida las diferentes estructuras del canon y sus criterios de modulación. En efecto, tanto la cuantía como la estructura son dos conceptos que actúan como herramienta soporte de las decisiones del operador.

Es importante entender que, habitualmente el canon no corresponde a una tarifa fija y única, sino que suele basarse en un conjunto de tarifas que tratan de obtener los objetivos marcados por el gestor de la infraestructura y, por lo tanto, su determinación es compleja y diferente según el país que se analice.

A modo de resumen, se puede hablar de cánones fijos, variables o mixtos, también se pueden clasificar en cánones al coste marginal (orientados a cubrir los costes marginales de la infraestructura), cánones ligados a cubrir total o parcialmente los costes incurridos por el gestor de la infraestructura o los cánones ligados a la capacidad de pago

En los siguientes apartados se analiza las diferentes estructuras de cánones que se aplican o pueden aplicarse, estudiando las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.

Cánones fijos

Se habla de un canon fijo cuando es independiente de cuánto se use la infraestructura, el pago que realiza el operador es exclusivo al hecho de poder utilizar la infraestructura. Este tipo de canon incentiva el uso de la infraestructura, desde la perspectiva de que una vez que se ha pagado cuanto mayor uso se haga de la misma mayor reducción del coste por unidad producida.

En sentido opuesto se encuentra que puede constituir una barrera de entrada a nuevos operadores, más aún, si estos operadores son pequeños, ya que la capacidad de

incrementar su producción es inferior y, por lo tanto, tienen menos capacidad de hacer uso de la infraestructura.

Otra desventaja que presenta este tipo de canon es en el caso de líneas saturadas, el objetivo en estos casos consistiría en aumentar la capacidad de la línea incrementando la capacidad de los trenes y no incrementar el número de servicios (frecuencias) que es lo que realmente estimula el canon fijo.

Cánones variables

Este tipo de cánones están íntimamente relacionados con el "desgaste" que sufre la infraestructura a causa del uso que los operadores realizan de ella. Suelen estar destinados, por una parte, a recupera la totalidad o parte de los costes corrientes incurridos por el gestor de la infraestructura y, por otro lado, a potenciar el uso de la infraestructura, por lo que su determinación obedece a fórmulas complejas.

Puede distinguirse entre el canon variable destinado a recuperar el coste marginal y el canon variable destinado a recuperar una parte o la totalidad de los costes fijos de la infraestructura.

Cánones variables para recuperar costes marginales

Este canon está destinado a recuperar los costes marginales ligados a la circulación de los trenes y al uso que hacen de la infraestructura, es decir tiene como objetivo cubrir el coste adicional que supone la circulación de un nuevo tren o servicio. Incluye elementos como: desgaste de carril, catenaria, deformación de la geometría de la vía, así como el coste adicional que supone la planificación de esa circulación adicional.

Si no existe ninguna distorsión en el mercado, el canon óptimo es el que iguala precio y coste marginal a corto plazo (*first best charging)* (Sánchez Borrás, 2009). Desde un punto de vista teórico el canon igual al coste marginal, implica que no existe operador dispuesto a pagar menos que el coste de oportunidad que supone que no sea atendido, lo que asegura la asignación eficiente de la capacidad entre las empresas ferroviarias en competencia y maximiza el beneficio social.

Sin embargo una de sus limitaciones, unida a la dificultad asociada a la cuantificación del coste marginal, es que según algunos estudios (García Álvarez & Fernández Arévalo, 2011) el coste marginal se suele situar en torno al 10-20% de los costes totales de la red, por lo que, solo se cubriría un parte pequeña del coste total.

Esto supone que la parte que no cubre el canon tenga que ser financiada a través de impuestos o mediante subvenciones que en definitiva generan problemas de eficiencia al resto de la economía del país.

Cánones variables para recuperar costes fijos

Aunque desde un punto de vista teórico el canon óptimo es el que cubre el coste marginal, en la práctica no es la solución más adecuada, ya que no se cubrirían gran parte de los costes totales que asume el gestor de la infraestructura, costes que en definitiva son los costes fijos de explotación (ej. mantenimiento de la geometría de vía y otros elementos de vía, control y auscultación del estado de vía, vigilancia de la línea, control y gestión de la línea, primas y seguros, amortización de maquinaria, costes financieros…).

Cuando estos costes fijos no pueden ser cubiertos por el Estado, es necesario incorporar una tarifa por encima del coste marginal que cubra como mínimo parte de ellos. Cuando esto se consigue con el menor impacto para el bienestar de la sociedad se habla de un óptimo de segunda preferencia (*second best).*

Se entiendo, por tanto, que dependiendo el nivel de "recuperación" de los costes fijos que se pretenda el canon puede ser diferente y, por ello, se encuentran diferentes estructuras dependiendo la línea y el servicio.

Una de las grandes desventajas que presentan es que no introducen incentivos para la reducción de los costes. Si existe un aumento de los costes fijos asumidos por el gestor de la infraestructura, éste los refleja directamente en el canon en la misma proporción.

Cánones basados en la capacidad de pago

Conocidas las desventajas de la tarificación basada en el coste marginal y en el coste fijo, una de las alternativas que ofrece la teoría económica es la posibilidad de aplicar un canon que se base en el Principio de Valoración de Ramsey.

La estructura de esta tarifa consiste en asignar un canon en función del coste marginal al que se le añade recargos o mark-up que se estiman en función de la elasticidad de la demanda. Es decir, este canon se basa en cobrar precios más altos a aquellos operadores con demanda más inelástica (mercados menos sensibles al precio), por lo que el gestor de la infraestructura puede obtener mayores ingresos con el mínimo impacto sobre la demanda.

La fijación del canon a partir del principio de Ramsey permite determinar el canon de forma eficiente pero presenta el gran inconveniente que su implementación requiere de un gran conocimiento del mercado (elasticidad de la demanda) (Sánchez Borrás, 2009).

2.5.2.2 Valor del canon por el uso de la infraestructura ferroviaria en líneas de alta velocidad (experiencia europea)

Tanto la Directiva vigente 2012/34/UE como la que la precedió la Directiva 2001/14/CE puntualizan que serán los Estados miembros los que especifiquen las reglas para la estimación del canon, tarea que en la mayor parte de los países es acometida por el gestor de la infraestructura y publicada en la declaración sobre la red.

La falta de una regulación común o de una estructura general que permita calcular el canon en los diferentes países de la Unión Europea, ha dado lugar a una gran dispersión en los principios, esquemas, métodos y variables de cálculo utilizados para su determinación.

Esta variabilidad de metodologías, estructuras y coberturas, dificulta el uso de una formulación genérica que sea la base de nuestro estudio. Tampoco es una opción emplear una determinada estructura implementada en un determinado país, ya que siempre que el análisis se realice en lugares diferentes al utilizado como base, los resultados mostrarán grandes dispersiones con la realidad.

Por ello, la forma de abordar este tema consiste en el desarrollo de modelos econométricos; es decir, se trata de estudiar una serie de casos reales y a partir de los datos obtenidos, analizar y determinar la relación que presenta la variable, en este caso el canon, en función de otros parámetros (velocidad media, coste de la infraestructura...), estudiando también tendencias y evoluciones.

Entre los estudios analizados, puede citarse (Teixeira & López Pita, 2012) y (Sánchez Borrás, 2009). El análisis que realizan sobre el canon en las diferentes relaciones o líneas europeas que estudian y las conclusiones a las que llegan, será utilizado en esta tesis, por considerarse estudios consistentes y validados por el sector.

2.5.2.2.1 Valor del canon por el uso de la infraestructura y su relación con la velocidad

Los servicios de alta velocidad se caracterizan por tiempos de viaje bajos en relación a servicios convencionales, gracias a las características de estas líneas de altas prestaciones (velocidades máximas elevadas, longitud entre dos núcleos más reducidas, …). La reducción de velocidad aporta un valor a los pasajeros, como se ha demostrado en el capítulo 2.2.1, lo que, mayoritariamente, es aprovechado por los operadores para incrementar el precio del billete. Los gestores de la infraestructura toman esta posición de los operadores y suelen también incrementar el importe del canon aplicando recargos (mark-up).

En línea con lo expuesto, puede destacarse la tesis de (Sánchez Borrás, 2009). Este estudio analiza el sistema de precios (canon) implementado en 100 relaciones diferentes dentro de red ferroviaria europea, determina el canon para cada una de ellas y, analiza las características de sistema de precios implementado por los países que operan líneas de alta velocidad. Entre las conclusiones a las que llega, se destaca el análisis que realiza entre la cuantía del canon y la velocidad comercial. Establece una relación entre la velocidad media y el canon obtenido del análisis de la red ferroviaria europea (100 relaciones origen destino) que toma la siguiente forma (Figura 44):

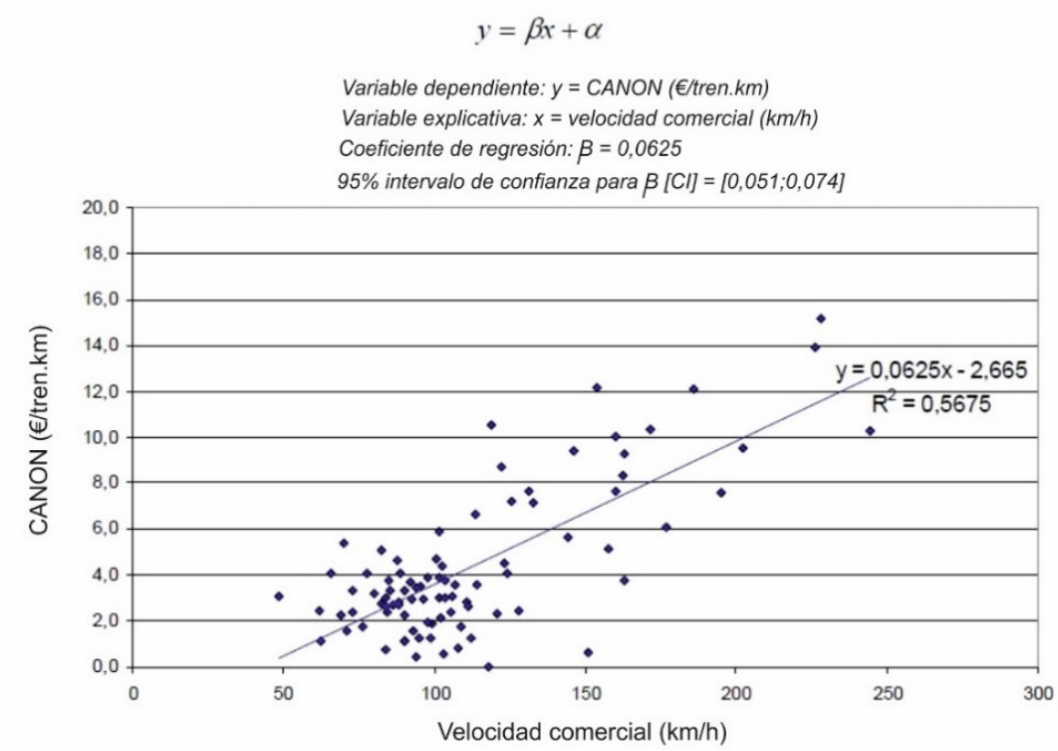


Figura 44. Relación entre el canon y la velocidad comercial

Fuente: (Sánchez Borrás, 2009).

El análisis econométrico realizado, muestra que existe una estrecha relación entre la cuantía del canon y la variable velocidad comercial, esta correlación puede estimarse a partir de la siguiente expresión:

$$C_a = 0{,}0625 \times V_{com} - 2{,}665 \qquad (2.\ 23)$$

Donde:

- Ca: Canon por el uso de la infraestructura (€/tren-km).
- V_{com}: Velocidad comercial (km/h).

Este modelo se ajusta muy bien a los objetivos de esta sección por dos motivos: (i) permite obtener un valor genérico para el canon que ha sido obtenido tras el análisis de un gran número de líneas en servicio de diferentes países y, por lo tanto, se asemeja a la cuantía del canon que los gestores actualmente están cobrando a los operadores en la red ferroviaria europea, y (ii) nos ofrece la posibilidad de relacionar el canon por el uso de la infraestructura con la velocidad media, relación que es básica para determinar la velocidad óptima en un recorrido.

Atendiendo al modelo establecido por (Sánchez Borrás, 2009), se estima el canon por tren-kilometro para diferentes velocidades medias, lo que permite obtener un valor genérico y aplicable en el estudio aquí desarrollado (Tabla 32).

Tabla 32. Valor del canon en función de la velocidad comercial.

Velocidad media *(km/h)*	Canon (€/tren-km)	Velocidad media *(km/h)*	Canon (€/tren-km)
180	8,59	350	19,2
190	9,21	360	19,8
200	9,84	360	19,8
210	10,46	370	20,5
220	11,09	380	21,1
230	11,71	390	21,7
240	12,34	400	22,3
250	12,96	410	23,0
260	13,59	420	23,6
270	14,21	430	24,2
280	14,84	440	24,8
290	15,46	450	25,5
300	16,09	460	26,1
310	16,71	470	26,7
320	17,34	480	27,3
330	17,96	490	28,0
340	18,59	500	28,6

Fuente: Elaboración propia.

Conocido el valor del canon por tren y kilómetro y su variación con la velocidad media, es necesario conocer el número de trenes que atienden el servicio, para poder conocer tanto los ingresos totales del gestor de la infraestructura como parte del coste de operación del operador de transporte. Por ello, la siguiente sección tiene como objetivo explicar y definir el modelo que permite dimensionar el parque para una determinada infraestructura.

2.6 PLAN DE EXPLOTACIÓN

El plan de explotación de una línea ferroviaria tiene como objetivo definir la oferta de trenes necesaria para satisfacer la demanda de viajeros. Conocida la demanda total, el operador determina el número de vehículos (dimensionamiento del parque), con el objetivo de ofrecer servicio al mayor número de viajeros con el menor coste de inversión posible.

Es importante destacar que sólo tras determinar el volumen total de la demanda que se transportará, su distribución a lo largo del año (estacionalidad) y las características del material rodante que se empleará para atender esta demanda, se puede dimensionar el parque móvil y calcular así los costes que asumirá la empresa operadora.

Si finalmente el dimensionamiento del parque depende del tráfico existente, como así afirma la teoría, puede afirmarse entonces que la velocidad (en este caso la velocidad comercial) juega un papel fundamental en todo este proceso, pues mayor velocidad comercial, mayor número de viajeros y como consecuencia, el operador necesita un mayor número de recursos (trenes, personal…).

Pero antes de entrar en detalle del dimensionamiento del parque, es imprescindible conocer las características de los trenes, pues se trata de una cuestión imprescindible a la hora de estimar el número de trenes necesarios. Trenes con mayor capacidad

(plazas) y más rápidos incrementarían los ingresos del operador y, en ocasiones, pueden reducir también los costes de inversión (a mayor capacidad por tren, menor número de trenes necesarios).

Por lo tanto, en todo plan de explotación debe resolverse dos cuestiones básicas: tipo de tren que atenderá el servicio y en número de trenes (vehículos) necesarios. Con el objetivo de abordar ambas cuestiones, este capítulo se dividirá en dos grandes bloques:

1. Una sección primera que define y expone las características básicas de los trenes de alta velocidad. En este apartado, también se desarrollará un modelo que permita diseñar los trenes que mejor se adecuen a la oferta necesaria sin necesidad de emplear los trenes concretos que actualmente se emplean en las líneas de alta velocidad.
2. Una segunda sección que expone la metodología empleada para el dimensionamiento del parque, estimando también la estacionalidad de la demanda, lo que ayudará a calcular el número de trenes de forma eficiente.

2.6.1 Material rodante

Antes de elaborar una metodología que permite determinar las principales características de los trenes de alta velocidad y que le permita elegir el tren que mejor se adapta a sus necesidades, se analizan y definen los principales rasgos que presentan los trenes de alta velocidad que están actualmente en el mercado.

Puede afirmarse que hoy en día existe en el mercado una gran gama de trenes de alta velocidad con características comunes y singulares, diferentes a las características relativas a trenes que prestan otro tipo de servicios (media distancia, cercanías, mercancías, etc.). No se trata de realizar un análisis en profundidad de todas ellas, pues no es el objetivo de esta tesis, pero sí el conocimiento de las mismas, lo que permitirá el desarrollo de una metodología válida para futuros desarrollos.

2.6.1.1 Características de los trenes de alta velocidad

Cabe destacar que las principales características del material rodante están reguladas por: las "fichas UIC[12]", las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad (ETI o TSI en inglés), la normativa Europea ferroviaria (Normas EN) y la normativa nacional de cada país, y por lo tanto, todo fabricante debe cumplir unos requisitos específicos.

A modo de resumen se muestran y especifican las principales características que definen a los trenes de alta velocidad:

- **Velocidad máxima** → Puede afirmarse que es la característica principal, de hecho la especificación técnica de interoperabilidad de material (ETI), clasifica a los trenes justamente por su velocidad máxima:
    1. Material rodante que está diseñado para circular a velocidad máxima igual o mayor de 250km/h, son los llamados trenes clase 1.
    2. Material rodante apto para velocidades máximas entre 190km/h y 250km/h, los llamados trenes de clase 2.
- **Arquitectura** → Los trenes de alta velocidad (clase 1) tienen que ser trenes con ramas indivisibles en servicio (autopropulsados), los trenes remolcados no son

[12] Fundada en 1922, la UIC (Union Internationale des Chemins de fer) es la organización mundial del sector ferroviario (http://www.uic.org/). Actualmente está formada por 202 miembros de los 5 continentes

admisibles en líneas de alta velocidad, principalmente debido al peso por eje de las locomotoras. Tienen que circular en ambos sentidos de la marcha (bidireccionales), y necesariamente tienen que tener una longitud fija (como marca la ETI) que está entre los 100 y los 400 metros.
Desde el punto de vista de la arquitectura, existen tres principios básicos que permiten clasificar a los trenes:

1. Según tracción: tracción concentrada donde la tracción está concentrada en menos del 40% de los ejes; o tracción distribuida donde la tracción está distribuida a lo largo del tren.
2. Según tipo de rodales: trenes no articulados; trenes articulados; o trenes articulados con rodales Talgo.
3. Según dimensiones de la caja: trenes de caja normal; trenes de caja ancha; trenes de un piso; o trenes de dos pisos.

Un parámetro muy importante que caracteriza a este tipo de trenes es el diseño aerodinámico. La resistencia aerodinámica al avance crece con el cuadrado de la velocidad, por lo que un diseño aerodinámico es imprescindible para reducir la potencia instalada y reducir así el consumo de energía. Estudios en que se establecen las relaciones funcionales entre la arquitectura de los trenes y su consumo de energía, como el de (García Álvarez, 2011b) llegan a afirmar que; *"los trenes de caja ancha y de dos pisos son más eficientes".*

- **Potencia** → El hecho de circular a tan altas velocidades supone que tengan una potencia específica muy elevada (15 a 20kW por tonelada). Esta alta potencia se asocia también a razones de fiabilidad, ya que elevadas potencias permiten mantener el servicio cuando alguno de los equipos (motores) queda fuera de servicio.
- **Tracción** → La tracción es eléctrica debido a estas altas potencias, suelen estar alimentados a "alta tensión" mayoritariamente es a 25kV en corriente alterna, aunque en países como Alemania la alimentación se realiza a 15kV 16,66Hz.
- **Ancho** → El ancho de vía de estos trenes es de 1.435mm, aunque existen trenes de alta velocidad, como el tren de la serie 120 o el tren de la serie 130, con doble ancho: ancho estándar y ancho ibérico (1.668mm).
- **Peso por eje** → El límite de carga por eje es bastante más bajo en este tipo de trenes que en el caso de los trenes convencionales, la carga por eje en los trenes de alta velocidad se limita a valores entre 17 y 18 toneladas, mientras que en el caso de los trenes convencionales el límite está en torno a las 22,5 toneladas, esto es debido principalmente al coste de mantenimiento, los trenes de alta velocidad deben ser más ligeros para reducir los esfuerzos sobre la vía.
- **Señalización** → En lo relativo a la señalización, en alta velocidad es necesario un sistema que realice una supervisión continua que garantice no rebasar la velocidad máxima autorizada, de hecho este tipo de trenes disponen de un tipo de señalización que les informa sobre distintas velocidades (la real, la máxima permitida y la de consigna) además este tipo se sistemas informa sobre la distancia al siguiente cambio de velocidad.

Tras este breve análisis, a continuación se muestra una tabla con las características principales de los trenes de alta velocidad que mayoritariamente circulan por la red ferroviaria española.

Tabla 33. Principales características de algunos trenes de alta velocidad o velocidad alta mayoritariamente utilizados en España.

		Denominación del tren							
		s100	s101	s102	s112	s103	TGV Duplex	s120	s130
Características principales									
Composición		M+8R+M	M+8R+M	M+12R+M	M+12R+M	(M-R-M-R)+ (R-M-R-M)	M+8R+M	M-N-N-M	M-11R-M
Velocidad máxima	*km/h*	300	300	330	330	350	320	250	250
Potencia total del tren	*kW*	8.800	5.400	8.000	8.000	8.800	8.800	4.000	4.800
Masa en vacío	*t*	392,26	392,26	322	322	425	424	252	312
Ancho de vía	*mm*	1.435	1.435	1.435	1.435	1.435	1.435	1.435/1.668	1.435/1.668
Tensión de funcionamiento	*kV*	1x25kV CA	3kV CC	1x25kV CA	1x25kV CA	2x25kV CA	1x25kV CA	1x25kV CA	2x25kV CA
Número de pantógrafos en captación	*número*	1	1	1	1	1	1	1	1
Plazas reales	*plazas*	329	321	319	365	404	510	238	298
Coeficiente A (resistencia mecánica)	*daN*	254	254	288	288	288	270	225	284
Coeficiente B (resistencia entrada de aire)	*daN/(km/h)*	3,36	3,36	3,469	3,469	3,469	3,2	0,71	2,401
Coeficiente C (resistencia aerodinámica)	*daN/(km/h)* ^{2}	0,05040	0,05040	0,05090	0,05090	0,05090	0,05350	0,04504	0,05530
Dimensiones									
Anchura exterior (media)	*m*	2,96	2,96	2,96	2,96	2,96	2,96	2,96	2,96
Altura exterior (máxima)	*m*	4	4	4	4	3,89	4,3	4,23	4,03
Altura exterior (media)	*m*	3,5	3,5	3,37	3,37	3,89	2,6	4,23	3,365
Longitud (total)	*m*	200,244	200,244	200,244	200,244	200	200	107,36	180
Anchura del habitáculo de viajeros	*m*	2,814	2,814	2,72	2,751	2,814	2,814	2,5	2,72
Altura del habitáculo de viajeros	*m*	2,3	2,3	2,27	2,27	2,3	3,9	2,3	2,65
Longitud habitáculo de viajeros	*m*	146,7	146,7	129	129	186,6	140	99,36	128
Tracción y freno									
Tipo de motor		Síncrono AC	Síncrono AC	Asíncrono AC	Asíncrono AC	Asíncrono AC	Asíncrono AC	Asíncrono AC	Asíncrono AC
Potencia de cada motor eléctrico de tracci	*kW*	1100	1100	1000	1000	550	1100	512	632
Fuerza máxima del freno eléctrico	*kN*	145,2	145,2	300	300	300	270	148	160
Velocidad mínima del freno eléctrico	*km/h*	40	40	40	40	40	40	40	40
Rodadura									
Número de ejes	*número*	26	26	21	21	32	26	16	20
Costes									
Coste de adquisición	*M€*	25,11 (2006)	24,37 (2006)	24,74 (2006)	22,47 (2006)	29,94 (2006)	18,83 (2002)	13,00 (2006)	16,72 (2006)

Fuente: Elaboración propia a partir de las fichas técnicas de Renfe.

2.6.1.2 Modelo para la determinación de las características de los trenes de alta velocidad

En el apartado anterior se ha definido y mostrado las características de los trenes de alta velocidad que actualmente circulan por la red ferroviaria. Estos trenes reales, más bien sus características, son datos de entrada para planificar la operación y dimensionar el parque móvil ferroviario y, por lo tanto, son variables fijas que se incluyen en las evaluaciones socio-económicas que se llevan a cabo actualmente en proyectos de líneas de alta velocidad.

El análisis es por tanto reducido, pues se limita el estudio a aquellos casos (material rodante) que están hoy en día en servicio, y esto influye en la calidad de los resultados, pues no se analiza otros escenarios posibles que podrían mejora la oferta. Por ejemplo, actualmente no existe la posibilidad de evaluar la rentabilidad de una línea que se ha dimensionado a velocidades máximas mayores de 400km/h, ya que no existe ningún tren que pueda alcanzar esta velocidad y, por lo tanto, no se contempla este escenario como factible, pero esto no quiere decir que 400km/h no pueda ser una velocidad óptima en términos de rentabilidad socio-económica.

Si en el estudio que se está realizando se emplearan los trenes que actualmente están en servicio, se estaría limitando considerablemente el análisis, ya que no sólo no se podrían contemplar velocidades superiores a 350km/h, sino que tampoco sería posible cuantificar la influencia del número de plazas, (¿qué rentabilidad financiera obtiene el operador al utilizar trenes de 1.000 plazas?) este tipo de cuestiones no son resueltas hoy en día con los modelos existentes.

Por lo tanto, se ha diseñado un modelo que tiene en cuenta las diferentes relaciones funcionales entre las características principales de los trenes de alta velocidad y que permite construir y/o dimensionar, a partir de unas consideraciones principales, el tren que se considere oportuno para atender la oferta que genera la línea que se está

diseñando. A continuación, se especifica el modelo y se incluyen los resultados obtenidos de aplicar un caso.

2.6.1.2.1 Parámetros de entrada al modelo

Se han considerado siete parámetros básicos para la construcción del modelo que permitirá dimensionar un tren de alta velocidad:

1. Velocidad máxima.
2. Plazas.
3. Tipo de articulación: No articulado, articulado de bogies y articulado de rodales.
4. Distribución de la tracción: Tracción concentrada o distribuida.
5. Arquitectura: Tipo de caja (normal o ancha) y número de pisos (1 piso o 2 pisos).
6. Densidad de las plazas: Alta densidad (una única clase), normal (dos clases) y lujosa (tres clases, cafetería y/restaurante).

Una vez fijados estos parámetros es posible el dimensionamiento del tren empleando la metodología se expone a continuación.

2.6.1.2.2 Dimensiones del tren

Esta sección tiene por objetivo determinar las dimensiones que tendrá el tren (longitud anchura y altura). En primer lugar, se pretende determinar la longitud equivalente de pasillo que corresponde a la longitud que necesitaría el tren que se está diseñando para atender las plazas seleccionadas, teniendo en cuenta también la densidad de plazas que se ha seleccionado.

Por lo tanto, la longitud de pasillo puede estimarse con la siguiente expresión (2. 24):

$$L_{pas_equiv} = \frac{Plazas}{Coef_{m_pas}} \qquad (2.\ 24)$$

Donde:

- L_{pas_equiv}: Longitud del pasillo (m).
- $Coef_{m_pas}$: Coeficiente que relaciona las plazas por metro de pasillo, como se ha expuesto, este coeficiente depende de la densidad de plazas y toma los valores que se muestran en la tabla que aparece a continuación (Tabla 34).
- Plazas: corresponde al número de plazas escogidas por el usuario del modelo.

Tabla 34. Densidad de plazas por metro de pasillo y coeficiente de confort

	Alta densidad (1 única clase)	Normal (2 clases)	Lujosa (3 clases cafetería y restaurante)
Densidad (plazas/m_pasillo)	4,2	3,8	2,7
Coeficiente de confort	0,8	1	1,5

Fuente: Elaboración propia.

Es importante destacar que, si existe la posibilidad de introducir más plazas por fila, es decir, en vez de introducir cuatro plazas por fila, introducir cinco plazas, se necesitaría menor longitud de tren, pero para ello se necesitarían trenes con una caja más ancha y, por lo tanto, puede afirmarse que el ancho de la caja influye de forma considerable en la longitud del tren. Para recoger el efecto del ancho del tren en la longitud equivalente de pasillo se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$L_{pas_anch} = L_{pas_equiv} \times Coef_{pas_anch} \qquad (2.\ 25)$$

Donde:

- L_{pas_anch}: es la longitud de pasillo debido a la anchura del tren (m).
- $Coef_{pas_anch}$: Coeficiente que relaciona las plazas con los metros de pasillo dependiendo del ancho del coche.

Al igual que en el caso anterior el coeficiente incluido en la ecuación anterior, es un parámetro fijo que depende, en este caso, del ancho del tren y toma los valores que aparecen en la tabla que se muestra a continuación (Tabla 35).

Tabla 35. Coeficiente de plazas en función de la anchura de la caja

	Caja Normal	Caja Ancha
Longitud pasillo / longitud aprovecha.del tren	1	0,8
Coeficiente de plazas	1	1,2

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, es necesario introducir en la metodología el efecto que provoca el número de pisos en la longitud del tren. Es claro que, si el tren dispone de dos pisos, para un mismo número de plazas, la longitud de este se reduce. La ecuación que se muestra a continuación (ecuación (2. 26)) permite relacionar la longitud del tren con el número de pisos.

$$L_{pas_alt} = L_{pas_anch} \times Coef_{pas_alt} \qquad (2.\ 26)$$

Donde:

- L_{pas_alt}: es la longitud de pasillo debido a la altura del tren (m).
- $Coef_{pas_anch}$: Coeficiente que relaciona las plazas con los metros de pasillo dependiendo de la altura del coche.

La tabla que se muestra a continuación (Tabla 36) incluye aquellos valores relacionados con el número de pisos.

Tabla 36. Características básicas del tren en función del número de pisos

	1 Piso	2 Pisos
Anchura *(mm)*	2.950	3.400
Coeficiente de plazas *($Coef_{pas_alt}$)*	1	2
Altura Coches intermedios *(mm)*	4.300	4.500
Altura Coches Extremos *(mm)*	4.300	4.300

Fuente: Elaboración propia.

A partir de las ecuaciones anteriores es posible calcular los metros de pasillo necesarios para atender al número de plazas que el usuario ha definido como input, es decir, conocidas las plazas es posible determinar la longitud que el tren debería tener. A partir de esa longitud, a la que llamaremos longitud aprovechable del tren, se calcula del número de coches totales (intermedios y extremos).

2.6.1.2.3 Cálculo de las longitudes de los coches intermedios y extremos y total del tren

Lo que se busca ahora es el reparto de esta longitud aprovechable de pasillo en longitud de los coches intermedios y longitud de coches extremos, para así determinar el número de coches totales necesarios.

La longitud aprovechable de los coches extremos es igual a la longitud exterior menos seis metros. Seis metros corresponde a la longitud que, de media, los trenes de alta velocidad reservan para la colocación de equipos, celdas de media o alta tensión, cabina de conducción…

$$L_{int_Apr} = L_{coche_ext} - 6 \quad (2.\ 27)$$

Donde:

- L_{int_Apr}: es la longitud interior aprovechable de los coches extremos (m).
- L_{coche_ext}: es la longitud exterior de los coches de alta velocidad (m).

La longitud interior aprovechable de los coches intermedios depende del tipo de articulación que el usuario elija. En los trenes articulados hay un bogie por cada dos coches y, por lo tanto, la longitud aprovechable para introducir plazas en el interior de los coches es mayor que en el caso de los trenes no articulados (tienen dos bogies por coche).

A continuación se muestra la longitud exterior media de los coches intermedios y de los extremos para trenes de alta velocidad, así como la longitud interior aprovechable para la disposición de plazas (Tabla 37).

Tabla 37. Longitud tanto de los coches extremos como de los coches intermedios según tipo de articulación

	Articulado_bogies	No_Articulado	Articulado_rodales_libres
Longitud coches extremos *(m)*	21	26	20
Longitud coches intermedios *(m)*	18	24	13
Long. aprovechable c. extremos *(m)*	15	20	14
Long. aprovechable c. coche intermedio *(m)*	16	21	12

Fuente: Elaboración propia.

Dependiendo del tipo de tracción que disponga el tren (concentrada o distribuida) la longitud útil de los coches extremos es diferente, es decir, los trenes con tracción concentrada suelen agrupar todos los equipos en los coches extremos o motrices, por lo que no suele haber espacio para introducir plazas. En cambio, en el caso de tracción distribuida los viajeros se reparten a lo largo de los coches tanto en los coches intermedios como en los extremos, puede afirmarse que la tracción distribuida se asocia más a viajeros distribuidos que al propio reparto de la motorización a lo largo del tren.

Por lo tanto, la longitud final útil de los coches intermedios, para el caso de tracción distribuida, es la longitud del pasillo menos la parte aprovechable de los coches extremos, mientras que, si es tracción concentrada, la longitud final útil de los coches intermedios corresponde exactamente a la longitud del pasillo.

$$L_{f_cochint} = L_{pas_alt} - \left(Tracc \times L_{int_Apr} \times 2\right) \quad (2.\ 28)$$

Donde:

- $L_{f_cochint}$: es la longitud final útil de los coches intermedios (m);

- Tracc: tipo de tracción que tiene el tren (concentrada o distribuida), si es tracción concentrada toma valor 0, mientras que si es tracción distribuida toma valor 1.

Conocida la longitud interior útil de los coches intermedios, el cálculo del número de coches intermedios se puede estimar con la siguiente expresión (2. 29).

$$N_{coch_int} = \frac{L_{f_cochint}}{L_{apr_cochint}} \quad (2.\ 29)$$

Donde:

- N_{coch_int}: número de coches intermedios;
- $L_{apr_cochint}$: longitud aprovechable de los coches intermedios (m).

Cabe destacar que el resultado hay que redondearlo por exceso, ya que los coches son unidades completas y, por lo tanto, no se puede introducir la mitad de un coche. Finalmente puede calcularse la longitud final útil del tren, así como su longitud final con las siguientes expresiones:

$$L_{util_tren} = N_{coch_int} \times L_{apr_cochint} + \left(2 \times L_{int_Apr} \times Tracc\right) \quad (2.\ 30)$$

$$L_{T_tren} = N_{coch_int} \times L_{coch_int} + 2 \times L_{coch_ext} \quad (2.\ 31)$$

Donde:

- L_{util_tren}: Longitud útil total del tren que corresponde a la longitud que se puede aprovechar para introducir plazas (m);
- L_{T_tren}: Longitud total del tren (m).
-

2.6.1.2.4 Cálculo de las plazas finales del tren

Las plazas que finalmente tendrá el tren se pueden calcular con la siguiente expresión:

$$Plaz_{T_tren} = L_{util_tren} \times Coef_{pas_alt} \times Coef_{pas_anch} \times Coef_{m_pas} \quad (2.\ 32)$$

Donde:

- $Plaz_{T_tren}$: son las plazas totales que dispondrá el tren.

En este caso, al igual que el número de coches intermedios, el resultado debe ser redondeado por exceso. Conocida las dimensiones que tendrá el tren, se procede a calcular sus características técnicas.

2.6.1.2.5 Cálculo de la masa, número de rodales y bogies del tren

Para el cálculo de la masa del tren se hace imprescindible conocer el tipo de articulación del tren, ya que:

- Si es un tren articulado, el número de bogies corresponde al número de coches más uno adicional. También debe añadirse dos bogies que corresponden a uno por motriz.
- Si es tren no articulado, el número de bogies es igual al número de coches (coches intermedios y coches extremos) por dos, ya que cada coche dispone de dos bogies.
- En el caso de un tren articulado con rodales libres, el número de bogies corresponde a los que llevan las motrices, es decir dos por motriz (cuatro

bogies). El número de rodales es igual al número de coches intermedios más un rodal adicional.

En cuanto a la masa del tren, conocido el número de bogies, rodales, y longitud del tren y asignando un determinado peso a cada uno de estos elementos (Tabla 38) puede calcularse de manera aproximada el peso que tendrá el tren.

Tabla 38. Masa en toneladas de los diferentes elementos de la rodadura

	Masa
Masa ejes *(toneladas)*	4
Masa tara del bogie *(toneladas)*	4
Masa rodales *(toneladas)*	4
Masa caja *(toneladas/metro de long tren)*	1,8
Masas rotativas de los ejes *(toneladas)*	1,2
Masas rotativas de los rodales *(toneladas)*	0,6

Fuente: Elaboración propia.

Conocido el número de bogies, ejes y/o rodales y el peso de los mismos (Tabla 38), así como la longitud total del tren y el peso por metro lineal de tren, la masa total del tren en vacío se puede estimar con la siguiente expresión:

$$M_{T_vacio} = N_{bogies} \times M_{bogie} + N_{ejes} \times M_{eje} + N_{rodales} \times M_{rodales} + L_{T_tren} \times M_{caja} \quad (2.\ 33)$$

Donde:

- $M_{T_vacío}$: masa del tren en vacío (t);
- Nbogies, Neje, $N_{rodales}$: número de bogies ejes y rodales respectivamente;
- Mbogies, Meje, $M_{rodales}$: masa por unidad de bogie, eje y rodal (t);
- M_{caja}: masa de la caja por metro de tren (t/m).

Una vez conocido la masa en vacío del tren, la masa cargado, suponiendo que cada pasajero y su equipaje pesan 80 kg, se calcula como:

$$M_{T_carg} = M_{T_vacio} + \left(0{,}08 \times Plaz_{T_tren}\right) \quad (2.\ 34)$$

En este momento se ha determinado las dimensiones del tren y parte de sus características técnicas, con esta información es posible el cálculo del coste de inversión y la potencia, aplicando la formulación (ecuación (3. 2) y (3. 3)) que se muestra en el capítulo 3.2.1. Además aplicando las ecuaciones (3. 5), (3. 6) y (3. 7) puede también determinarse los coeficientes de resistencia al avance.

A partir de la metodología que se acaba de exponer es posible diseñar un tren seleccionando una serie de parámetros que lo caracterizan (velocidad máxima, anchura y altura de la caja, tipo de articulación y tipo de tracción). Además, no solo se puede determinar sus dimensiones, plazas y características técnicas, sino que está metodología nos ofrece también la posibilidad de calcular el precio de adquisición que tendrá en el mercado, cuestión que es básica en el ACB que se pretende desarrollar en este estudio.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras el empleo de la metodología anteriormente expuesta. Los resultados permiten analizar la influencia de la velocidad máxima en el coste de adquisición, tema principal de esta investigación, por ello se ha tomado unos parámetros de entrada fijos y se ha variado la velocidad máxima para observar que influencia tiene en el resto de características. Como inputs de entrada fijos han utilizado los siguientes:

1. Velocidad máxima (200km/h, 250km/h, 300km/h, 330km/h, 350km/h, 400km/h, 450km/h y 500km/h).
2. Plazas = 365.
3. Tipo de articulación: Tren articulado con rodales libres.
4. Tipo de tracción: Tracción concentrada.
5. Tipo de ancho de caja: Caja normal.
6. Número de pisos del tren: 1 piso.
7. Densidad de las plazas: lujosa (tres clases, cafetería y/restaurante).

A continuación se muestra una tabla resumen (Tabla 39) los resultados obtenidos tras aplicar el modelo expuesto.

Tabla 39. Principales características de los trenes de alta velocidad obtenidas a partir del modelo

	Velocidad máxima (km/h)							
Resumen Características	**200**	**250**	**300**	**330**	**350**	**400**	**450**	**500**
Características principales del tren								
Número de coches intermedios	12	12	12	12	12	12	12	12
Número de coches extremos	2	2	2	2	2	2	2	2
Numero de ejes	8	8	8	8	8	8	8	8
Numero de rodales	13	13	13	13	13	13	13	13
Número de bogies	4	4	4	4	4	4	4	4
Masa del tren vacío (toneladas)	323,6	323,6	323,6	323,6	323,6	323,6	323,6	323,6
Masa del tren cargado (toneladas)	354,7	354,7	354,7	354,7	354,7	354,7	354,7	354,7
Masas rotativas (toneladas)	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4
Masa adherente (toneladas)	136	136	136	136	136	136	136	136
Plazas Reales	**389**	**389**	**389**	**389**	**389**	**389**	**389**	**389**
Dimensiones								
Anchura exterior (media) (mm)	2950	2950	2950	2950	2950	2950	2950	2950
Altura exterior coches extremos (mm)	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300
Altura exterior coches intermedios (mm)	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300
Longitud total (m)	**196**	**196**	**196**	**196**	**196**	**196**	**196**	**196**
Tracción								
Potencia *(kW)*	**2.679**	**4.405**	**6.848**	**8.728**	**10.179**	**14.586**	**20.286**	**27.523**
Resistencia al avance								
Coeficiente A (daN)	235,68	235,68	235,68	235,68	235,68	235,68	235,68	235,68
Coeficiente B (daN/(km/h))	2,25	2,49	2,83	3,09	3,30	3,91	4,71	5,72
Coefiente C (daN/(km/h)^2)	0,0599	0,0599	0,0599	0,0599	0,0599	0,0599	0,0599	0,0599
Coeficiente de Adherencia	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Costes								
Costes de adquisición (M€)	**16,19**	**17,94**	**20,41**	**22,31**	**23,78**	**28,25**	**34,02**	**41,34**

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que las características obtenidas del modelo se asemejan a las reales (Tabla 33), no solo en lo referente a las características técnicas sino que también en cuanto al coste de adquisición.

Conocidas y modeladas las características de los trenes de alta velocidad se continúa con el dimensionamiento del parque móvil que el operador de transporte debe hacer para atender a la demanda existente o prevista.

2.6.2 Dimensionamiento del parque móvil

En capítulos anteriores se ha determinado el volumen de demanda, analizando su relación con la velocidad comercial (o tiempo de viaje). Además, en el apartado anterior, se exponen y definen las principales características del material de alta velocidad, elaborando una metodología que permite el diseño de los mismos. Por lo que, llegados a este punto se dispone prácticamente de todos los recursos para el cálculo del número de trenes necesarios para atender la demanda prevista.

Pero antes de exponer la metodología que se empleará en la determinación del número de trenes necesarios para atender el servicio, es necesario conocer la distribución de la demanda a lo largo del año, pues dependiendo del tipo de ruta y de las peculiaridades de la zona destino, la movilidad puede que se concentre en uno meses determinados al año (demanda con alta estacionalidad) o puede que se distribuya de manera bastante constante a lo largo de todo el año (demanda con baja estacionalidad).

2.6.2.1 Estacionalidad de la demanda

El dimensionamiento del parque debe realizarse para atender a la demanda de manera adecuada incluso en momentos de altas desviaciones con respecto a las previsiones medias diarias, lo que supone un gran reto para el ferrocarril, no sólo por el alto precio del material rodante sino también debido a la dificultad para modificar determinadas características de diseño en pleno servicio (plazas, número de viajeros por metro cuadrado, retirar o introducir coches…)

Por ello, es indispensable dimensionar el parque teniendo en cuenta que la demanda no es la misma todos los días del año. El perfil de la demanda (demanda más estacionalidad), la frecuencia y las características del material permitirán establecer la programación teórica de los servicios, que será normalmente diferente a lo largo de las diferentes horas del día, de los distintos días de la semana, e incluso tendrá aumentos y reducciones en las diversas épocas del año para acomodarse a las puntas y a los valles que registra tal demanda.

Teniendo en cuenta esto, existen tres formas de abordar la cuestión del dimensionamiento del parque de material:

- Puede dimensionarse para periodos de baja demanda, en cuyo caso se dejaría de atender a gran número de viajeros.
- Se dimensiona para los periodos punta, en este supuesto parte del material estaría infrautilizado a lo largo del año.
- Realizar un dimensionamiento intermedio. Esta solución es la normal, pero al igual que la primera alternativa, el operador no atendría a parte de la demanda, por lo que necesita estudiar en profundidad el nivel de servicios que ofrecerá para que sea el más eficiente en términos de rentabilidad del operador.

Por lo tanto, puede afirmarse que la estacionalidad condicionará el número de trenes que el operador necesita comprar, alquilar, etc. sea cual sea la opción que tome (atender la demanda en periodo punta, valle, …) y, por ello, el estudio de la distribución de la movilidad a lo largo año es imprescindible dentro un cualquier plan de explotación.

A modo de ejemplo, se ha realizado el análisis de la estacionalidad en el corredor de Levante, suponiendo que la distribución de la demanda en las diferentes horas de un día es igual (lo que no siempre es cierto) y con el objetivo de mostrar en un caso real el modelo que aquí se aplica.

2.6.2.2 Obtención de los coeficientes de estacionalidad

En primer lugar, es necesario definir el concepto “coeficiente de estacionalidad”. Se llamarán coeficientes de estacionalidad a aquellos parámetros que permiten repartir o, más bien, desagregar la demanda total anual de una determinada ruta, en la demanda de viajeros para las diferentes épocas consideradas en el análisis. En el caso de servicios de media y larga distancia esta clasificación suele realizarse en las diferentes estaciones del año (ej., invierno y verano) ya que la demanda, dependiendo de la ruta, puede ser muy diferentes en meses de verano que en meses de invierno, mientras que en servicios de cercanías esta clasificación suele realizarse dentro de un mismo día, ya que la distribución de la demanda es muy diferente dentro del día; horas con mucha movilidad (horas punta), horas con poca movilidad (horas valle) y horas con una demanda media (horas normal).

El objetivo principal de esta sección consiste en determinar los coeficientes de estacionalidad en el corredor de Levante, caso ejemplo que ha sido utilizado a lo largo

de esta tesis, para posteriormente aplicarlos en la siguiente sección que consiste en la determinación del parque de material.

2.6.2.2.1 Metodología aplicada para la estimación de los coeficientes de estacionalidad

Conocido el tráfico mensual para todas las rutas del corredor (véase Anejo 6), se divide el año en dos estaciones: verano e invierno, considerando en verano 92 días que corresponden a los meses de Junio, Julio y Agosto, mientras que en el caso de invierno se le asignan el resto de meses del año, lo que se traduce en 273 días.

Posteriormente, dentro de esta clasificación estacional (verano e invierno), se considera que habrá épocas de mayor demanda (punta verano y punta invierno) y épocas de con demanda más estable (normal verano y normal invierno).

El coeficiente de estacionalidad atiende a la siguiente expresión:

$$Coef.estacionalidad = \frac{Demanda\ mensual\ estación\ del\ año\ (invierno, verano)}{Demanda\ media\ mensual\ (año)} \quad (2.\ 35)$$

Al existir tanta diferencia entre los días que componen cada estación, es necesario obtener las demandas medias mensuales ponderadas según los días que pertenecen a cada estación. Por ejemplo, en la ruta Madrid-Valencia, la demanda media mensual ponderada del invierno será de 78.044 pasajeros mientras que 74.813 corresponde a la de verano, mientras que la demanda media mensual para todo el año es de 77.257.

Por último, para obtener los coeficientes de estacionalidad, se divide la demanda media ponderada por estación del año, entre la demanda media mensual del año. A continuación se muestra los coeficientes de estacionalidad obtenidos para cada una de las relaciones del corredor (Tabla 40).

Tabla 40: Coeficientes de estacionalidad del corredor de Levante 2011.

2011				
Origen	Destino	Relación de demanda	Invierno	Verano
Madrid	Cuenca	Madrid-Cuenca	1,0523	0,8435
Madrid	Valencia	Madrid-Valencia	1,0102	0,9684
Madrid	Castellón	Madrid-Castellón	0,9891	1,0366
Madrid	Albacete	Madrid-Albacete	1,0438	0,8681
Madrid	Alicante	Madrid-Alicante	0,8904	1,3341
Madrid	Murcia	Madrid-Murcia	1,0153	0,9563
Cuenca	Valencia	Cuenca-Valencia	1,0230	0,9370
Cuenca	Castellón	Cuenca-Castellón	1,0085	0,9937
Cuenca	Albacete	Cuenca-Albacete	1,0998	0,6943
Cuenca	Alicante	Cuenca-Alicante	0,8885	1,3411
Valencia	Castellón	Valencia-Castellón	1,0313	0,9101
Albacete	Alicante	Albacete-Alicante	0,9345	1,1988
Albacete	Murcia	Albacete-Murcia	1,0099	0,9773
Cuenca	Madrid	Cuenca-Madrid	1,0564	0,8323
Valencia	Madrid	Valencia-Madrid	1,0136	0,9579
Castellón	Madrid	Castellón-Madrid	0,9816	1,0599
Albacete	Madrid	Albacete-Madrid	1,0450	0,8642
Alicante	Madrid	Alicante-Madrid	0,9077	1,2832
Murcia	Madrid	Murcia-Madrid	1,0218	0,9366
Valencia	Cuenca	Valencia-Cuenca	1,0011	1,0024
Castellón	Cuenca	Castellón-Cuenca	0,9881	1,0438
Albacete	Cuenca	Albacete-Cuenca	1,1000	0,6919
Alicante	Cuenca	Alicante-Cuenca	0,8701	1,3934
Castellón	Valencia	Castellón-Valencia	1,0075	0,9798
Alicante	Albacete	Alicante-Albacete	0,9495	1,1546
Murcia	Albacete	Murcia-Albacete	1,0213	0,9409

Fuente: Elaboración propia.

Para comprobar que estos coeficientes son adecuados para estimar la demanda anual, se realizan una serie de cálculos. El primero consiste en obtener la demanda diaria por sentido en cada una de las dos estaciones en las que ha sido dividido el año:

$$D.diaria\ por\ sentido = \frac{D.total\ anual * Coef\ de\ estacionalidad}{365} \quad (2.\ 36)$$

Esta demanda diaria se multiplica por los días que pertenecen a cada una de las estaciones consideradas (véase Tabla 41) y de esta forma se obtiene la demanda total (estimada) en cada estación del año que, comparándola con el dato obtenido de la base de datos proporcionada por Adif (Anejo 6), se obtiene que existe una diferencia de 330 viajeros que supone una diferencia del 0,036% de diferencia con respeto a la demanda total.

Tabla 41: Comprobación del modelo de estacionalidad propuesto.

Comprobación		
	Invierno	Verano
Demanda diaria por sentido	2.566	2.460
Días de cada estación	273	92
Total cada estación	700.468	226.283
Total anual	926.751	
Diferencia con la demanda obtenida de Adif	-331	
Diferencia en % con la demanda obtenida de Adif	-0,036%	

Fuente: elaboración propia.

El siguiente paso sería distinguir entre periodo punta y período normal, en invierno y en verano, para ello primero se obtiene el coeficiente de estacionalidad medio de todas las relaciones, que en este caso es de 1,0031.

Se considera que en invierno serán punta, todos aquellos coeficientes que se encuentren por encima del coeficiente medio y serán normales, aquellos que se encuentren por debajo de este valor. En el caso del verano, se calcula la media de todos aquellos valores que se encuentran por encima del coeficiente de estacionalidad medio (1,0031), obteniéndose un valor de 1,0962. Todos los coeficientes de estacionalidad que, en el caso del verano, se encuentren por encima de este valor se considerarán punta verano (PV) y todos los que se encuentren por debajo, normal verano (NV).

Atendiendo a esta última clasificación, se obtendrían los coeficientes de estacionalidad medios de cada periodo del año (punta verano, normal verano, punta invierno y normal invierno), que son los que se utilizarán para obtener las demandas de cada ruta en cada época del año.

Tabla 42: Coeficientes de estacionalidad medios para el corredor de Levante.

Coeficientes de estacionalidad medios			
Punta Invierno (PI)	Normal Invierno (NI)	Punta Verano (PV)	Normal Verano (NV)
1,0350	0,9400	1,2842	0,9247

Fuente: Elaboración propia.

Obsérvese que, conocida la demanda mensual en un año y en un determinado corredor, es posible determinar de forma sencilla su estacionalidad, es decir su distribución a lo largo del año, lo que permitirá al operador gestionar sus recursos de manera más eficiente. Dependiendo la estrategia que el operador tome (dimensionar el parque para atender las puntas o las normales) el número de trenes necesario será diferente.

2.6.2.3 Número de trenes necesarios

El dimensionamiento del parque, es decir, el cálculo del número de trenes necesarios para atender a las previsiones de demanda debe tener en cuenta las situaciones en las que puede encontrarse los vehículos ferroviarios. No solo debe tener en cuenta los trenes que están o que prestarán servicio sino también aquellos que están en taller, ya sea para mantenimiento o revisiones periódicas, o aquellos que suplen inmediatamente la falta de servicio debido a cualquier tipo de incidencia.

Por lo tanto, el dimensionamiento del parque debe contemplar los siguientes sumandos ecuación (2. 37):

Trenes necesarios = Trenes necesarios para el servicio básico, rotaciones y reposicionamiento + Trenes necesarios para reservas + Trenes necesarios para mantenimiento	(2. 37)

Definamos de cada una de estos tipos de situaciones en las que se pueden encontrar los trenes.

2.6.2.3.1 Número de trenes para servicio básico

El primer sumando es el que corresponde a los trenes necesarios para el servicio (paquete en el que se incluyen también las necesidades de rotaciones y reposicionamiento). Sea cual sea la estrategia que tiene el operador para alcanzar el óptimo aprovechamiento del material, el primer paso consiste en estimar el mínimo número de trenes necesarios para prestar servicio. La fórmula que permite estimar el número de trenes necesarios es la siguiente ecuación (2. 38):

$N^{o}_{Trenes} = \frac{2 \times \left(T_{Viaje} + T_{rot}\right)}{Intervalo_{servicios}}$	(2. 38)

Donde:

- N^{o}_{trenes}: número de trenes necesarios para prestar servicio;
- T_{viaje}: tiempo de viaje entre origen y destino (min);
- T_{rot}: tiempo de rotación (min) y
- $Intervalo_{servicios}$: corresponde al tiempo transcurrido entre dos servicios consecutivos (min).

Tres parámetros son básicos en el cálculo: intervalo entre trenes homogéneos, el tiempo de viaje y tiempo de rotación. Si se profundiza en este último parámetro, puede afirmarse que corresponde al tiempo necesario para que el material rodante que ha terminado un viaje pueda comenzar el siguiente. Para ello, los trenes deben estar preparados con un cierto tiempo de antelación antes de la salida y después de la llegada, deben de estar limpios (limpieza interior, descarga de wáteres, …), debe de reponerse el catering, revisarse la seguridad del tren, etc. Todas estas tareas implican un tiempo que debe sumarse al tiempo de viaje, pues está fase es necesaria para el ofrecer un servicio de calidad. La determinación del tiempo de rotación es un parámetro que debe ser tenido muy en cuenta por el operador, ya que condiciona claramente el número de trenes necesarios para el servicio y, por lo tanto, un análisis detallado de cuál es el tiempo de rotación posible que optimiza los recursos del operador (maximiza el uso) debe realizarse siempre antes de la puesta en marcha del servicio.

2.6.2.3.2 Trenes necesarios para mantenimiento

El tiempo que los trenes están en taller, ya sea para revisiones periódicas, inspecciones técnicas o para reparar alguna incidencia técnica, consume recursos del operador. Es imprescindible tener en cuenta esta situación, ya que un dimensionamiento del parque

sin tener en cuenta que los trenes necesitan ser reparados o que es necesario revisarlos periódicamente, obligaría al operador a dejar de atender la demanda en determinados periodos del año, lo que se traduciría en un servicio ineficiente.

En la práctica, el número de trenes destinados para suplir el tiempo que otros están en tareas de mantenimiento depende de las condiciones que se pacten con el mantenedor y puede estimarse como un coeficiente aplicado sobre el número de trenes destinados para el servicio. Según (García Álvarez & et al., 2012), orientativamente este coeficiente nunca debería superar el 15%, y en las horas punta debería de ser del orden del 5%.

2.6.2.3.3 Necesidades de material para reservas

La reserva corresponde a la situación en la que se encuentran aquellos vehículos disponibles para sustituir a aquellos que están en servicio en el caso de que se produzca una incidencia. Es un tema a estudiar con mucho cuidado por el operador, debido al alto coste del material rodante. Actualmente tiende a reducirse el número de trenes destinados a reservas lo máximo posible, por supuesto, siempre manteniendo el más alto nivel de calidad.

Ante la diversidad de estrategias tomadas por los operadores se hace prácticamente imposible poner una cifra o porcentaje adecuado para los vehículos en reserva. Puede ir desde no tener ningún vehículo hasta uno cada cabecera de línea. En esta tesis no se considerará este parámetro.

2.6.3 Caso ejemplo línea Madrid-Valencia

Con el objetivo de exponer y validar la metodología utilizada en esta tesis, se emplea el corredor de Levante, especialmente la línea de alta velocidad Madrid-Valencia. De esta línea es conocida la movilidad en diferentes escenarios de precio y velocidad comercial (véase Tabla 30), lo que permitirá evaluar el modelo de explotación en diferentes casos para una misma línea.

Antes de proceder con la estimación del número de trenes, se fija el tipo de tren que se utilizará para atender la demanda. Este es el primer paso que debe realizarse, pues, como ya se ha expuesto anteriormente, el tren condiciona la explotación y, por lo tanto, los resultados que se obtengan pueden ser completamente diferentes dependiendo del material elegido.

En este caso ejemplo, se empleará el tren AVE serie 112 de Talgo, ya que es el tren utilizado hoy en día para realizar este servicio. Las principales características de esta serie han sido expuestas en la Tabla 33. Como característica reseñable y que influye decisivamente en el dimensionamiento del parque, se destacan las 365 plazas de las que dispone.

1. Demanda diaria según estacionalidad

En primer lugar, es necesario repartir la demanda total por sentido y año en demanda diaria por sentido. En este proceso, la demanda total también debe desagregarse en las diferentes estaciones del año (verano e invierno), por ser esta la desagregación temporal llevada a cabo para el corredor de Levante. Este reparto debe hacerse en función de los coeficientes de estacionalidad determinados para el corredor de Levante, que toman los valores recogidos en la Tabla 42.

En definitiva, el objetivo consiste en determinar una demanda diaria diferente en días punta verano, normal verano, punta invierno y normal invierno. El reparto de la demanda total anual en demanda diaria con la siguiente expresión (2. 39):

$$Demanda_{diaria(i,j)} = \frac{Demanda_{Total} \times Coef_{(i,j)}}{365} \qquad (2.\ 39)$$

Donde:

- $Demanda_{diaria(i,j)}$: representa la demanda diaria según estacionalidad.
- i: corresponde a la estación del año considerada (verano, invierno).
- j: corresponde al tipo de periodo (punta, y normal).
- $Coef_{(i,j)}$: coeficiente de estacionalidad determinados para el corredor (Tabla 42).

Los resultados obtenidos para diferentes velocidades y, por lo tanto, diferentes tráficos totales se muestran en la tabla siguiente (Tabla 43).

Tabla 43. Demanda diaria a partir de los coeficientes de estacionalidad

Velocidad Comercial *(km/h)*	Demanda Total	Punta Verano	Normal Verano	Punta Invierno	Normal Invierno
220	1.138.221	4.005	2.884	3.228	2.931
230	1.185.374	4.171	3.003	3.361	3.053
240	1.228.456	4.322	3.112	3.483	3.164
250	1.267.988	4.461	3.212	3.596	3.266
260	1.304.441	4.589	3.305	3.699	3.359

Fuente: Elaboración propia.

2. Servicios según estacionalidad

Conocida la demanda diaria que es necesario atender, se procede con el cálculo de los servicios que necesitaría ofertar el operador para atender esas demandas diarias. Para ello se emplea la siguiente ecuación (2. 40):

$$Servicios_{(i,j)} = \frac{Demanda_{Diaria(i,j)}}{Plazas * Ocup_{Objetivo}} \quad (2.\ 40)$$

Donde:

- $Servicios_{(i,j)}$: servicios ofertados por el operador para atender la demanda.
- $Ocup_{objetivo(i,j)}$: representa la ocupación objetivo que fija el operador.
- Plazas: corresponde a las plazas del tren.

Debe de tenerse en cuenta que es casi imposible conseguir una ocupación diaria del 100%, por lo que es necesario utilizar un aprovechamiento adaptado a cada caso, diferente si se trata de periodo punta o normal y diferente también en épocas de verano o en invierno. La práctica aconseja utilizar valores de ocupación (viajeros/plazas) entre 0,9 y 0,95. También es frecuente que en el diseño de las operaciones se empleen, para dimensionar el material, cifras de aprovechamiento inferiores a las anteriores (por ejemplo, del 70-80%).
A continuación se muestran los aprovechamientos aplicados en este caso ejemplo (Tabla 44), teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente.

Tabla 44. Ocupaciones objetivo en los diferentes periodos del año.

Capacidad Material Móvil	Ocupación objetivo Punta verano	Ocupación objetivo Normal verano	Ocupación objetivo Punta invierno	Ocupación objetivo Normal invierno	Ocupación objetivo Media anual
365	90%	80%	80%	70%	75%

Fuente: Elaboración propia.

Tras aplicar la ecuación (2. 40) al caso propuesto se obtienen los siguientes resultados (Tabla 45).

Tabla 45. Servicios diarios y anuales ofrecidos por el operador para atender la demanda.

	Un sentido				
Velocidad Comercial *(km/h)*	Servicios x día PUNTA VERANO	Servicios x día NORMAL VERANO	Servicios x día PUNTA INVIERNO	Servicios x día NORMAL INVIERNO	Servicios año
220	13	10	12	12	**4.274**
230	13	11	12	12	**4.340**
240	14	11	13	13	**4.639**
250	14	11	13	13	**4.639**
260	14	12	14	14	**4.978**

Fuente: Elaboración propia.

3. Las plazas ofertadas

Conocidas los servicios ofrecidos (tanto en simple composición como en doble) el cálculo de las plazas ofertadas es directo, a partir de la siguiente ecuación (2. 41).

$$Plazas_{Ofertadas(i,j)} = Servicios_{(i,j)} \times Plazas_{tren} \qquad (2.\ 41)$$

Las plazas ofertadas totales, así como las plazas-kilómetro totales en cada uno de los escenarios del caso ejemplo propuesto se muestran en la Tabla 46.

Tabla 46. Plazas ofertadas por el operador para cada demanda.

Velocidad Comercial *(km/h)*	Plazas diarias ofertados Punta Verano	Plazas diarias ofertados Normal Verano	Plazas diarias ofertados Punta Invierno	Plazas diarias ofertados Normal Invierno	Capacidad media diaria ofertada	Plazas km año
220	4.745	3.650	4.380	4.380	4.274	**1.219.927.820**
230	4.745	4.015	4.380	4.380	4.340	**1.238.766.200**
240	5.110	4.015	4.745	4.745	4.639	**1.324.109.770**
250	5.110	4.015	4.745	4.745	4.639	**1.324.109.770**
260	5.110	4.380	5.110	5.110	4.978	**1.420.870.540**

Fuente: Elaboración propia.

4. Intervalo horario

El intervalo horario permite calcular el intervalo entre trenes, es decir, el tiempo entre dos servicios consecutivos. Conocidas los servicios diarios, que se calcular a partir de la demanda diaria que es necesario atender, el intervalo horario indica cada cuánto tiempo debe salir un tren para conseguir esas frecuencias diarias (servicios diarios).

$$Intervalo_{servicios\ (i,j)} = \frac{Inthor}{Servicios_{(i,j)}} \qquad (2.\ 42)$$

Donde:

- $Intervalo_{servicios(i,j)}$: es el tiempo teórico entre dos servicios consecutivos,
- Inthor: parámetro que indica las horas del día en las que el operador de transporte oferta servicios, en este caso se considerará 16 horas.

Conocido el tiempo entre dos servicios consecutivos, el número de trenes necesario para el servicio se obtiene aplicando la ecuación (2. 38).

En la tabla que se dispone a continuación (Tabla 47) se muestra el número de ramas necesarias para cada una de las estaciones tanto en punta como en normal, así como, el número de ramas necesarias totales para atender el servicio. Además, se incluye la estimación el parque total necesario que corresponde a la suma de las ramas para atender el servicio más las ramas necesarias para mantenimiento (se ha considerado un 15% de las ramas necesarias para atender el servicio).

Tabla 47. Número de trenes necesarios para atender la demanda en la línea Madrid-Valencia y para diferentes velocidades comerciales.

Velocidad Comercial *(km/h)*	Ramas PUNTA VERANO	Ramas NORMAL VERANO	Ramas PUNTA INVIERNO	Ramas NORMAL INVIERNO	Total Ramas Necesarias	Ramas Totales + Mantenimiento
220	6	4	6	6	**6**	**7**
230	5	5	5	5	**5**	**6**
240	5	5	5	5	**5**	**6**
250	5	5	5	5	**5**	**6**
260	5	5	5	5	**5**	**6**

Fuente: Elaboración propia.

Aplicando esta metodología para cada uno de los escenarios propuestos en la Tabla 30 se obtiene el número de trenes necesario en cada uno de los casos. Los resultados se muestran en la Tabla 48.

Tabla 48. Número de trenes necesarios para atender la demanda en la línea Madrid-Valencia y en función de la velocidad y el precio.

Precio Medio (c€/vkm)	Dimensionamiento del parque móvil (Número de trenes)													
	220 km/h	230 km/h	240 km/h	250 km/h	260 km/h	270 km/h	280 km/h	290 km/h	300 km/h	310 km/h	320 km/h	330 km/h	340 km/h	350 km/h
8	14	14	14	14	14	13	13	13	13	13	13	13	12	12
8,5	14	14	13	14	13	13	13	13	13	13	13	13	12	12
9	14	13	13	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12
9,5	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12	12	12	11
10	13	13	13	12	13	12	12	12	12	12	12	11	12	11
10,5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11
11	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11	11	11	11
11,5	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
12	11	11	11	11	11	11	11	11	10	10	10	10	10	10
12,5	11	10	10	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
13	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
13,5	10	10	10	10	10	10	9	9	9	9	9	9	9	9
14	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
14,5	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
15	7	9	7	9	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
15,5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
16	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
16,5	7	6	7	6	7	6	7	6	6	7	6	6	6	6
17	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
17,5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
18	6	5	6	6	5	6	6	5	6	6	5	6	6	6
18,5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
19	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
19,5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
20	4	5	4	4	5	5	4	5	5	5	4	5	5	5

Fuente: Elaboración propia.

Tras analizar los resultados se puede concluir que:

- A medida que aumenta la velocidad, en la mayoría de casos, se reduce el número de trenes necesarios para atender el servicio, aunque la demanda se incrementa, pues mayor velocidad mayor movilidad en el corredor, pero el hecho de circular más rápido permite al operador hacer mayor uso del material rodante, pues con un mismo tren puede hacer más servicios.
- A medida que el precio de billete se incrementa menor número de trenes necesarios. Esto es debido a que la demanda se reduce considerablemente con el incremento del precio y, por lo tanto, el operador necesitaría menos trenes.

Es claro que a menor número de trenes menor inversión tendrá que hacer el operador, por lo que si nos centramos solo y exclusivamente en los costes de inversión en material, las estrategias que debería ofertar el operador son aquellas en la que los precios de billete sean altos e incluso velocidades comerciales no muy elevadas (en la Tabla 48 se representan estas estrategias en colores más oscuros).

Si volvemos a los ingresos del operador (Tabla 31), recuérdese que los mayores ingresos el operador los obtendría a precios entre 11c€/vkm y 12c€/vkm, lo que para el caso de los costes de inversión no parece la mejor estrategia (mayor número de trenes necesarios para cada velocidad comercial).

Esto demuestra que la estrategia precio y velocidad que el operador debe fijar no debe centrarse exclusivamente en sus ingresos, ni exclusivamente en sus costes de inversión, ya que, como se ha mostrado, son antagonistas. Debería fijarse cómo aquella que maximice los beneficios, entendiendo los beneficios como el resultado de restar los ingresos menos los costes totales.

En la fase del estudio que nos encontramos, no es posible estimar el beneficio que tendrá el operador, debido a que no se conoce aún su coste total, pues falta determinar el coste incurrido en el movimiento de los trenes y aquellos que permiten su correcto funcionamiento, son los denominados costes de operación y de explotación.

Por lo tanto, antes de elegir una estrategia como la óptima para el operador, es necesario estimar los costes de operación, tarea que se realizará en las primeras dos secciones del siguiente capítulo.

3. EFECTO DE LA VELOCIDAD EN LOS COSTES

3.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es determinar y exponer los costes totales originados en la construcción y operación de una infraestructura ferroviaria. Aunque no sólo consiste en exponer y cuantificar los diferentes costes que se generan al construir, poner en servicio una infraestructura ferroviaria y transportar viajeros, sino que también se trata de determinar y/o cuantificar las relaciones funcionales entre estos diferentes costes y la velocidad y, establecer así, una función que permita caracterizar el efecto de la velocidad sobre los costes (*función de costes).*

Por tanto, puede afirmase que determinar la *función de costes* atendiendo a su relación con la velocidad es el principal objetivo de este análisis y al que se le dedicará gran parte de este capítulo.

Cabe señalar que cuando se habla de velocidad dentro de la materia costes se refiere, mayoritariamente, al término velocidad máxima. Pude afirmarse que la velocidad máxima es el principal inductor de los costes, aunque en algún otro caso la velocidad comercial también tiene un efecto importante, principalmente, dentro de los costes operacionales que dependen del tiempo de viaje, como ya se mostrará más adelante.

Determinar la relación entre velocidad y coste no es una tarea sencilla. Además, existe poca literatura y pocos estudios en los que basarse, lo que incrementa la complejidad del tema. Sin embargo, esto no significa que no exista relación alguna: es claro que a mayor velocidad máxima los trenes serán más caros y, por lo tanto, mayor inversión por tren tendrá que hacer el operador. Incluso también se puede afirmar que a mayor velocidad mayores costes de explotación atribuibles al operador, esta afirmación no siempre se cumple, pues determinados costes, como por ejemplo el de personal, dependen del tiempo de viaje y, por lo tanto, se reducen con el incremento de la velocidad.

También puede afirmarse que, a mayor velocidad máxima, mayores costes de inversión en infraestructura. Una mayor velocidad máxima se traduce en radios de curva más amplios y, por lo tanto, líneas ferroviarias más rectas que, en tramos montañosos, se traduce en una mayor longitud de línea construida bajo túnel y/o sobre viaductos. La imposibilidad de bordear relieves accidentados supone un incremento en los costes, debido al alto coste que implica construir túneles y viaductos.

Pero antes de profundizar en la estructura de costes y su relación con la velocidad, es conveniente definir el parámetro costes, pues no existe una definición única y común.

¿Qué es un coste? según (García Álvarez, 2012) "*coste sería el valor de cada uno de los sacrificios que se deben hacer para conseguir un resultado. Este sacrificio no tiene por qué tener un contenido económico directo, sino que puede ser intangible, como por ejemplo el ruido".*

Esta tesis se centra en los costes atribuibles al transporte ferroviario, que a grandes rasgos se pueden clasificar en:

- Costes de capital, corresponde a los costes que se producen como consecuencia de realizar una inversión inicial, por ejemplo, la adquisición de unos equipos, material, trenes, la construcción de una infraestructura, etc.
- Costes corrientes, son aquellos que se generan por el hecho de realizar recurrentemente una determinada actividad, en este caso por prestar servicio de transporte. Dentro del sector transporte es posible desagregar estos costes corrientes en:
    - Costes operativos, corresponde a los costes soportados por la entidad operadora que presta servicios de transporte.

- Costes de explotación, que corresponde a una parte de los costes operativos; aquellos generados por la propia actividad de transporte (costes de energía, personal a bordo, mantenimiento, etc.)

Atendiendo a la clasificación anterior, los costes totales del sistema de transporte se pueden clasificar en dos grandes grupos según el ámbito en que se producen:

- Costes de operación del servicio: corresponde a los costes de capital (asociados a vehículos: adquisición, financieros, renting, etc.) y a los costes corriente de funcionamiento (energía, personal y mantenimiento, …).
- Costes de infraestructura: incluyen tanto costes de capital (construcción, ampliación y remuneración del capital), como costes corrientes (costes de mantenimiento y explotación de la infraestructura).

Siguiendo esta última clasificación se procede este capítulo con la definición y la cuantificación por separado de cada uno de ellos, analizando en detalle el efecto que provoca en ellos la velocidad.

3.2 COSTES DE OPERACIÓN Y DE EXPLOTACIÓN Y SU RELACIÓN CON LA VELOCIDAD

Como se ha mencionado en la introducción de este capítulo, en esta sección se analizará la relación coste de operación-velocidad en el sistema de alta velocidad, mostrando cualitativa y cuantitativamente la influencia de la velocidad máxima en los costes de operación.

Se estaría cometiendo un error si se afirmase rotundamente que un aumento de la velocidad lleva siempre consigo un aumento en coste de operación asumido por el operador, ya que, como veremos más adelante, aquellos costes que dependen de la producción no siempre se incrementan. Cabe destacar que un incremento de la velocidad supone una reducción de tiempo de viaje, lo cual puede suponer; por un lado, una reducción del tiempo de uso de los recursos disponibles, por ejemplo el material rodante y, por otro lado, para un mismo tiempo de uso, el material puede recorrer mayor número de kilómetros e incrementar así su producción (plazas kilómetro).

El efecto de la velocidad en los costes se acentúa en el caso del personal de abordo. Si se incrementa la velocidad se produce un incremento de los kilómetros realizados durante las horas de servicio, es decir se incrementa su productividad anual, por lo tanto, el coste por kilómetro que tiene que soportar el operador se ve reducido. Además, es importante mencionar otra relación causa-efecto del incremento de la velocidad. Al incrementarse la velocidad se requiere un menor número de vehículos para ofrecer el mismo servicio (véase Tabla 48) y, por lo tanto, el riesgo del operador se reduce.

No existen demasiados estudios que relacionen los costes de operación con la velocidad dentro del sector ferroviario, se puede citar como relevante el realizado por (Kottenhoff, 2003). En él se afirma que la mejora de la velocidad, además de ser algo que el viajero valora en gran medida, también implica una reducción de los costes de operación.

Otras publicaciones importantes en este ámbito que estudian el caso español son; por un lado (Minayo de la Cruz, F. & García Álvarez, 2009), y más recientemente la ponencia presentada para el 7º Congreso mundial de alta velocidad celebrado en Pekín (García Álvarez, 2010b) en estos estudios se establece una función de costes y se analiza la sensibilidad de esta función a la variación de la velocidad del tren.

Cabe destacar también la tesis realizada por (García Álvarez, 2012) en la que se realiza un análisis detallado de la relación de los costes de explotación y la velocidad de los trenes. Este estudio define, cuantifica y sienta las bases metodológicas para el cálculo de la función de costes y el efecto de la velocidad en ella, metodología que es utilizada por el autor de esta tesis posteriormente en el artículo (Roanes-Lozano, González Franco, Hernando, García Álvarez, & Mesa, 2013).

Entender cuál es la estructura de costes de una empresa ferroviaria y de qué parámetros depende, resulta de utilidad para la planificación de la oferta de servicios de transporte, para la fijación de precios y también en los estudios de planificación y viabilidad de una determinada infraestructura ferroviaria.

Pero, en primer lugar, es importante explicar las diferencias que existen entre los costes de explotación y los de operación, pues son dos términos que se tratarán más adelante.

Los costes de explotación son los que se generan por el movimiento de los trenes. Se identifican los siguientes costes de explotación:

- Costes derivados de la tenencia o posesión del material rodante (amortización, alquileres, seguros de los vehículos); y costes de capital (ajeno y propio) asociados a dicha tenencia.
- Costes de mantenimiento, reparación y limpieza (exterior e interior). En esta misma partida se debe incluir los costes derivados del uso de talleres e instalaciones de inspección, limpieza y avituallamiento.
- Costes del personal operativo en los trenes (maquinistas, interventores).
- Costes de la energía de tracción y potencia y costes pagados por la comercialización, transporte y distribución de la energía.
- Costes por el uso de la infraestructura.

Los costes operativos son los que se generan al mover los vehículos (costes de explotación) y dar un servicio seguro, rápido y de calidad a los viajeros. Es decir, además de los costes de explotación (definidos en la clasificación anterior) los costes operativos también contemplan las siguientes partidas:

- Costes de los servicios a los clientes en tierra y en los trenes (restauración, salas de espera preferente, prensa, aparcamiento, etc.)
- Costes de venta y distribución.
- Costes comerciales y publicidad.
- Los costes generales de empresa operadora, tales como su personal directivo, oficinas, etc.

A diferencia de las unidades utilizadas para la estimación de los ingresos que, como se ha visto en el capítulo anterior, se relacionan con las unidades de demanda o de tráfico (viajero kilómetro o toneladas kilómetro), los costes deben de expresarse por unidad de oferta (plazas o plazas kilómetro) dado que el coste lo produce el desplazamiento del vehículo, con independencia de su ocupación. Sin embargo, dentro de los costes de explotación existen algunas partidas que se producen o que son función de los ingresos, por ejemplo, los costes restauración a bordo, venta de billetes, seguro de viajeros.

En aquellos casos en los que se dispone del coste por viajero kilómetro, para obtener el coste por plaza kilómetro es preciso multiplicar el coste por viajero kilómetro por el "aprovechamiento" como muestra la expresión que se incluye a continuación:

$$Coste/plaza.km = Coste/viajero.km \times Aprovechamineto\ (viajeros.km/plazas.km) \quad (3.\ 1)$$

En definitiva, conocida la diferencia entre costes de operación y costes de explotación y las unidades con las que se deben expresar los costes se procede a definir y cuantificar los costes operativos y su relación con la velocidad siguiendo la clasificación realizada (costes de explotación y costes de operación).

3.2.1 Costes de posesión del material rodante y su relación con la velocidad

En este apartado se definirán y cuantificarán los costes asociados a la adquisición del material rodante y los relativos a su posesión. Inversión que, habitualmente, la asume el operador ferroviario.

Como delimitación del alcance del estudio, se considerará que los trenes una vez comprados pasan a ser posesión del operador ferroviario, dejando fuera de este análisis las diferentes formas que hoy en día un operador podría utilizar para prestar su servicio sin tener en posesión material rodante (leasing, renting, arrendamiento financiero, arrendamiento operativo con o sin personal…)

3.2.1.1 Costes de adquisición

El coste de adquisición es aquel que asume el operador por el hecho de tener en posesión el tren. El precio estimado para la adquisición de un tren para el año 2011 se puede calcular mediante la siguiente expresión (García Álvarez, 2010c).

$$Tp = 150.000 \times C + 26.500 \times M + 1.000 \times P + 25.000 \times NM + 6.000 \times s \times cc \quad (3.\ 2)$$

Donde:

- Tp: precio de adquisición del tren (€).
- C: número de cabinas que dispone el tren.
- M: masa en vacío del tren (t).
- P: potencia del tren (kW).
- NM: número de motores.
- s: plazas del tren.
- cc: coeficiente de confort (por ejemplo: 0,8 clase turista, 1 preferente y 1,5 clase club).

A primera vista no parece que exista una relación entre el precio del tren y la velocidad, pero esto no es de todo cierto, la potencia es un parámetro que está vinculado con la velocidad máxima. De hecho, se puede afirmar que a partir de una determinada velocidad máxima la potencia es función de la fuerza total del vehículo y de su velocidad máxima (véase Figura 45).

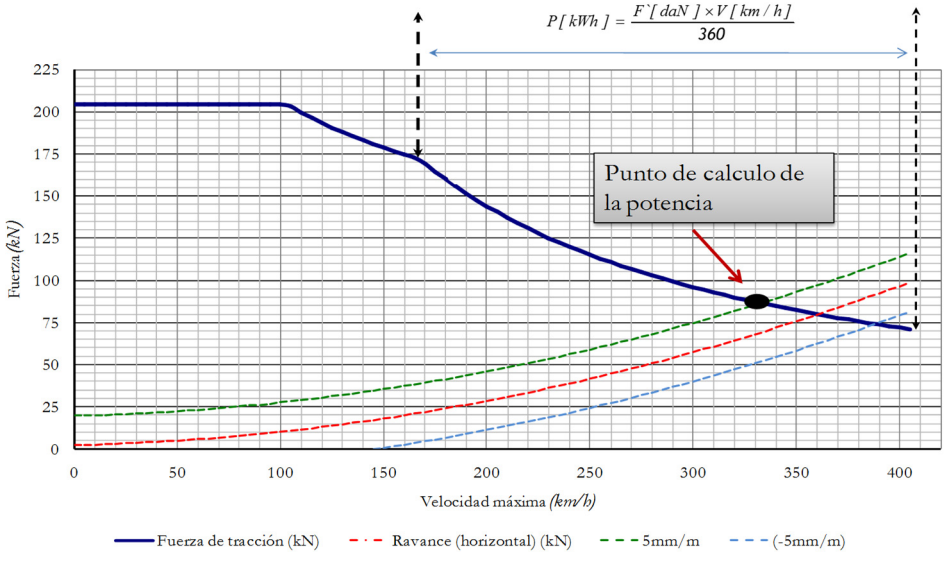


Figura 45. Curva característica del tren de la serie 102 de Talgo

Fuente: Elaboración propia.

La potencia se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$P = \frac{F \times V_{max}}{360} \quad (3.\ 3)$$

Donde:

- P: potencia del tren (kW).
- V_{max}: velocidad máxima del vehículo (km/h).
- F: fuerza a la que está sometido el vehículo (daN).

Como se observa en la expresión anterior (ecuación (3. 3)), para calcular la potencia, es necesario conocer la fuerza a la que está sometido el vehículo. La fuerza en el punto de cálculo (se indica en la figura anterior (Figura 45)) es igual a la resistencia al avance (R_{av}) en una pendiente de 5 milésimas[13], esto hace que se simplifique el problema, ya que la resistencia al avance en una pendiente de 5 milésimas se puede calcular a partir de la siguiente fórmula (3. 4):

$$R_{av} = A + B \times V_{max} + C \times V^2{}_{max} + \frac{5 \times M_T}{10} \quad (3.\ 4)$$

Los coeficientes de resistencia al avance a la que está sometido un tren de alta velocidad se pueden calcular con las siguientes expresiones (García Álvarez, 2011b):

$$A = 147 + M_T \times 0{,}25 \quad (3.\ 5)$$

$$B = 0{,}0082 \times s \quad (3.\ 6)$$

$$C = 1{,}15 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 10^{-4} \times L_T \quad (3.\ 7)$$

Donde:

- A: componente de la resistencia al avance debida a las resistencias mecánicas (daN).
- B: componente de la resistencia al avance debida a la resistencia a la entrada de aire (daN/(km/h).
- C: componente de la resistencia al avance debida a la resistencia aerodinámica (daN/(km/h)^2).
- M_T: masa del tren cargado (t).
- L_T: Longitud del tren (m).
- V_{max}: Velocidad máxima del tren (km/h).
- s: plazas del tren.

Una vez determinada la resistencia al avance, la potencia se calcula con la siguiente ecuación (3. 8):

$$P = \frac{(147 + M_T \times 0.25 + (0{,}0082 \times s) \times V_{max} + (1{,}15 \times 10^{-2} + 2 \times 10^{-4} \times L_T)) \times V_{max}{}^2 + 5 \times M_T) \times V_{max}}{360} \quad (3.\ 8)$$

[13] La ETI de Material Rodante en su apartado 4.2.8.1 establece que un tren debe disponer de una aceleración residual de cómo mínimo 0,05 m/s^2, o lo que es lo mismo debe poder mantener su velocidad máxima en una rampa de 5 milésimas (de ahí que la fuerza máxima se calcule en una rampa de 5 milésimas)

Como se observa de la expresión anterior, la potencia está relacionada con la masa del tren cargado, las plazas, la longitud y la velocidad máxima del vehículo. Esto demuestra que el coste de adquisición es función de la velocidad máxima y, por lo tanto, todo coste que esté relacionado con el precio de adquisición tendrá una relación directa con la velocidad del tren.

A continuación se muestra el efecto de la velocidad máxima en el precio de adquisición para una serie de trenes que se diferencian simplemente en: (i) la longitud (100m, 200m y 300m) y (ii) el número de clases y confort ("r" una única clase y confort de servicios regionales y "l" con primera, segunda clase y cafetería confort de trenes de larga distancia).

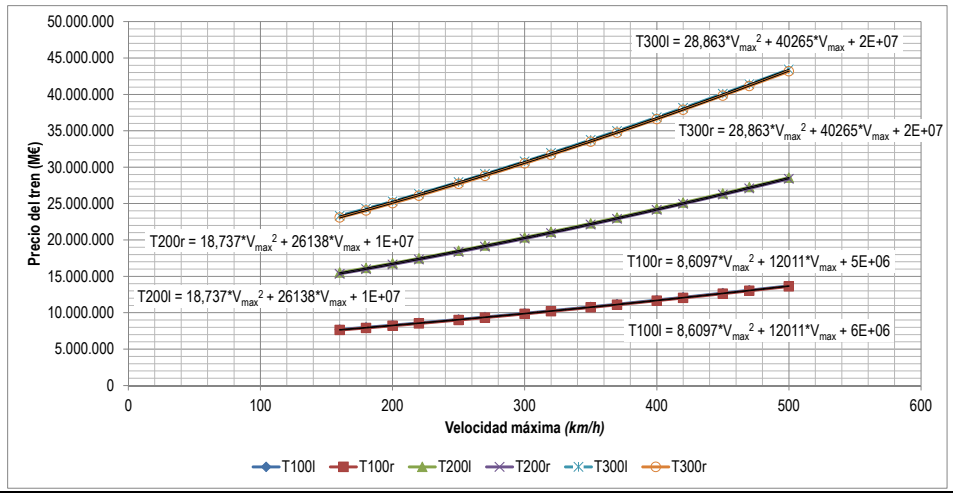


Figura 46. Precio del tren en función de la velocidad media.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa claramente que, sea cual sea la tipología del tren (longitud y confort), el coste de adquisición se incrementa con la velocidad máxima, debido a que la potencia necesaria del tren aumenta al incrementarse la velocidad máxima.

Se observa que para trenes más largos el coste es más elástico con respecto al parámetro velocidad máxima, es decir que el incremento del coste de adquisición debido a aumentos en la velocidad máxima es mayor en trenes de 300 metros de longitud que en trenes de 100 metros. Esto se debe a que la longitud del tren afecta al coeficiente aerodinámico (coeficiente C) de la resistencia al avance, que a su vez influye en el término potencia.

3.2.1.2 Producción anual de un tren

Un tren a lo largo de su vida útil produce una cantidad determinada de plazas-kilómetro, es decir que un tren durante los años de servicio recorre una cantidad determinada de kilómetros, ofertando además un número determinado de plazas.

La producción anual, por lo tanto, se obtendría multiplicando las plazas del tren por los kilómetros que recorre en un año de servicio.

Se entiende que los kilómetros que realiza un tren en un año son diferentes según el tipo de tren, el servicio que realizan, las horas de uso diarias del material, la rotación, etc. La distancia que un tren puede recorrer en un año se puede calcular a partir de la siguiente expresión (3. 9):

$$RA = (365 \times 60) \times \frac{V_{com} \times H_t \times D}{(R \times V_{com}) + (D \times 60)} \qquad (3.\ 9)$$

Donde:

- RA: Distancia recorrida por un tren en un año (km).
- V_{com}: se trata de la velocidad comercial (km/h).
- D: distancia del recorrido; longitud de la línea en la que el tren presta servicio (km).
- H_t: horas de servicio (h).
- R: tiempo de rotación (min).

Como puede observarse en la ecuación anterior la distancia anual está claramente relacionada con la velocidad media. (García Álvarez, 2011a) estima y cuantifica esta relación para una serie de trenes y servicios que introduce como inputs, representándola en la gráfica que se muestra a continuación (Figura 47).

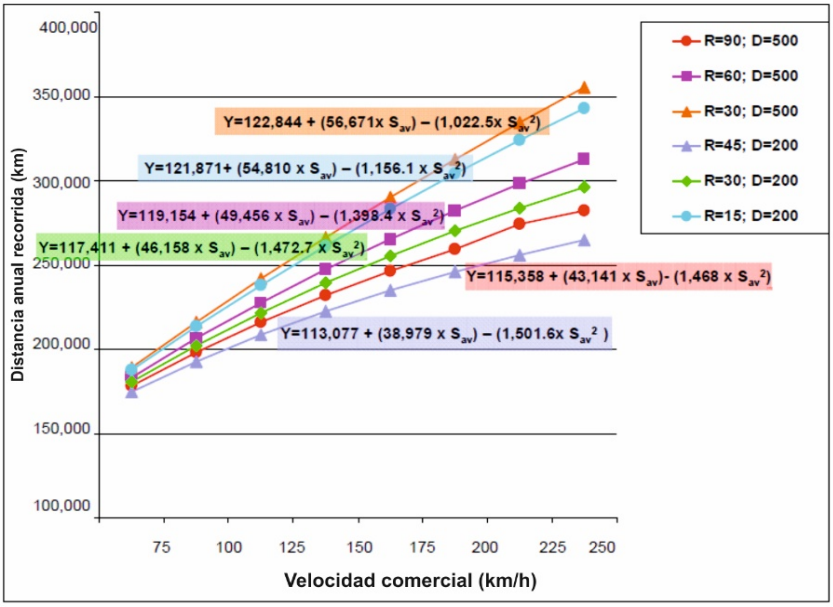


Figura 47. Distancia anual recorrida en función de la velocidad media y del tiempo de rotación

Nota: Sav: corresponde a la velocidad media (km/h)

Fuente: (García Álvarez, 2010c)

A medida que aumenta la velocidad media del tren se incrementa los kilómetros recorridos en todos los casos analizados y, por lo tanto, puede afirmarse que se incrementa la productividad del tren.

Conocido por lo tanto las plazas del tren y la distancia que recorre en un año, la producción anual se determina con la siguiente expresión (3. 10):

$$Producción(pkm) = Dist.anual \times plazas \quad (3.\ 10)$$

3.2.1.3 Costes relacionados con la posesión del tren

Finalmente, los costes de tenencia y posesión de un tren se desglosan en tres grandes partidas: amortización, costes de capital (ajeno y/o propio) y seguro del tren. Para calcular el coste anual de amortización de un tren se utiliza el método de amortización lineal sin valor residual por un periodo de 30 años (3. 11). No se considera el valor residual porque se está asumiendo que la vida útil del material ferroviario son 30 años, por lo que al final del periodo de evaluación se ha amortizado completamente el material.

$$Amortización = \frac{\frac{Coste\ de\ adquisición}{Producción\ anual} - Valor\ Residual}{Años\ de\ Vida\ Útil} \quad (3.\ 11)$$

Se observa que el coste de amortización tiene una gran relación con la velocidad ya que el coste de adquisición está dividido por la producción anual, parámetro que como hemos visto anteriormente, está totalmente relacionado con la velocidad. Por lo tanto, se demuestra que si se aumenta la velocidad disminuye la amortización por plaza kilómetro.

En cuanto a los costes por daños propios y a terceros, autores como (García Álvarez, 2012) afirman que pueden suponerse como un porcentaje del coste de adquisición. Este estudio afirma que los costes de capital pueden llegar a ser un 3% de los costes de adquisición, mientras que los costes de daños a terceros, se habla de un 0,3% de los costes de adquisición.
La relación entre los costes de posesión de trenes y la velocidad se refleja en la siguiente gráfica (Figura 48):

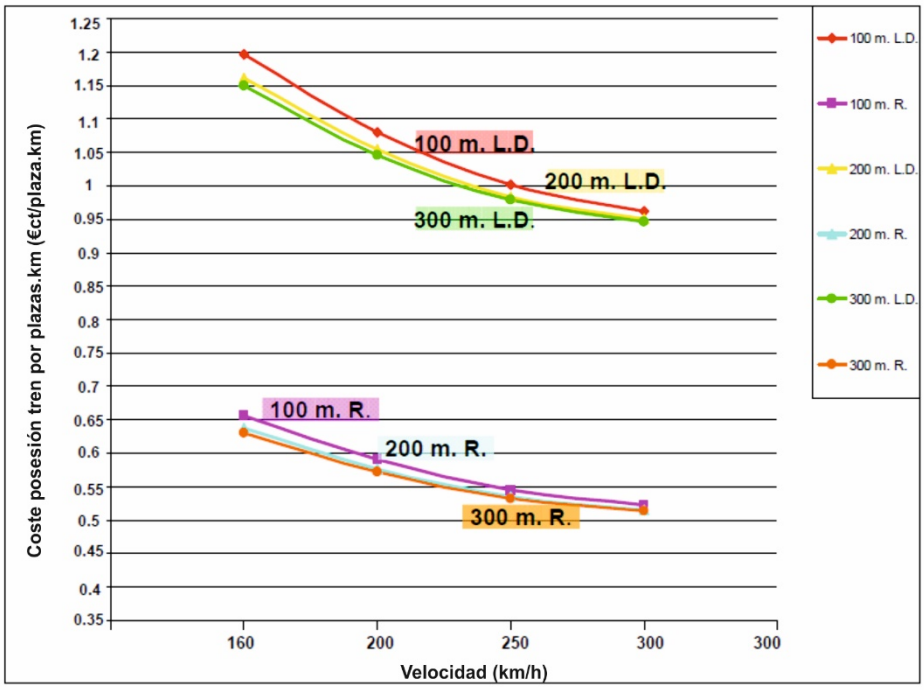


Figura 48. Elasticidad del coste de amortización, del coste de capital y del coste por daños propios y a terceros en relación a la velocidad media.

Nota: L.D: Larga distancia; R: Regional.

Fuente: (García Álvarez, 2010).

Se observa como a medida que se aumenta la velocidad media, los costes de posesión del tren disminuyen sustancialmente, esto sucede aproximadamente hasta los 250km/h. A partir de esta velocidad se observa como la reducción del coste empieza a equilibrarse, debido principalmente a que el precio de adquisición se incrementa en mayor medida que la distancia anual recorrida por el tren.

3.2.2 Costes de explotación

A continuación, se detallan uno a uno los diferentes costes de explotación que tiene que asumir el operador y se especifica su relación con la velocidad.

3.2.2.1 Costes de mantenimiento y limpieza

Los costes de mantenimiento incluyen: mantenimiento preventivo y correctivo, limpieza exterior e interior, suministro de material fungible y reparación de actos vandálicos.

Una parte de estos costes son fijos (parte pequeña) e independientes del recorrido y otros costes son variables y están ligados en su mayor parte a los recorridos del tren, aunque también algunos se producen por tiempo y otros se realizan por viaje.

En las siguientes secciones se realiza un análisis detallado de cada uno de ellos y su influencia con la velocidad.

3.2.2.1.1 Coste de mantenimiento preventivo y correctivo del tren

Una parte de estos costes corresponde a que parte de los elementos del tren se desgastan por el uso (ruedas pantógrafos…). En el caso de las ruedas los desgastes son menores en alta velocidad y, por lo tanto, los costes también son menores, principalmente porque en estos servicios, los radios de curva son más amplios y existe una reducción de la interacción de la pestaña de la rueda con el carril.

En cuanto a los pantógrafos sucede algo paradójico, aunque en alta velocidad se transporta electricidad a mayor voltaje (25.000V), se realiza con un solo cable, a diferencia de las líneas convencionales (3.000V) que se utilizan dos cables. La interacción pantógrafo catenaria y, por lo tanto, el desgaste del mismo es menor en alta velocidad que en servicios convencionales.
A continuación se muestra gráficamente (Figura 40) los resultados obtenidos en (Minayo de la Cruz, F. & García Álvarez, 2009) sobre el efecto de la velocidad, en este caso velocidad media y el desgaste de rueda, frenos y pantógrafo.

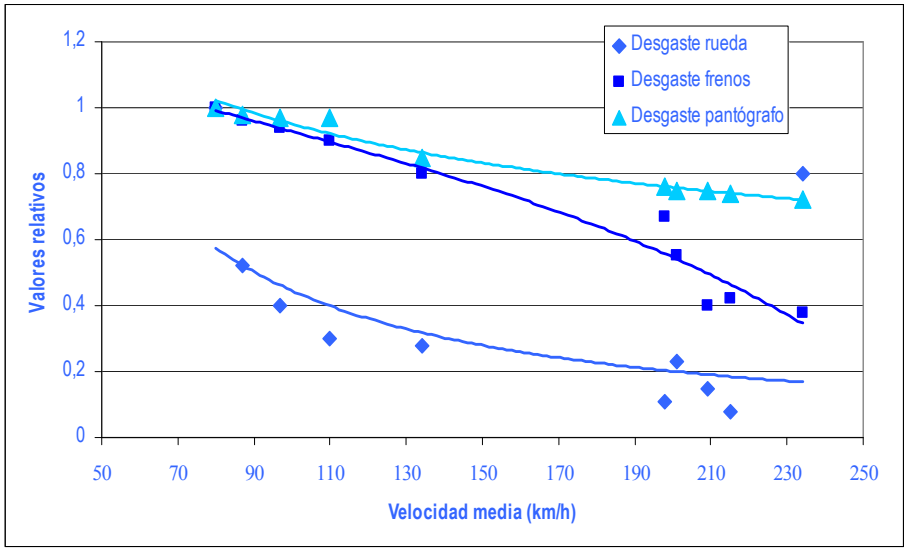


Figura 49. Relación entre el desgaste del diferentes materiales del tren y la velocidad media del servicio

Fuente: (Minayo de la Cruz, F. & García Álvarez, 2009).

El coste de mantenimiento puede expresarse de la siguiente forma (García Álvarez, 2012):

$$cv = 100 \times \frac{CF}{s \times RA} + \frac{CV\big(f(recorrido)\big) \times L_T}{s} \qquad (3.\ 12)$$

Donde:

- cv: coste unitario de mantenimiento por plaza kilómetro y tren (c€/plaza-kilómetro).
- CF: coste fijo de mantenimiento de un tren (€/m).
- CV: coste variable de mantenimiento por metro lineal y por los kilómetros de recorrido (c€/metro lineales-kilómetro).
- L_T: longitud del tren (metros lineales).
- s: plazas del tren.

A continuación se muestra una tabla (Tabla 49) con valores orientativos referentes al coste de mantenimiento para diferentes tipos de servicios:

Tabla 49. Valores orientativos del coste de mantenimiento (incluido la gran reparación pero no la limpieza.

Tipo y tamaño de tren	Coste unitario mantenimiento	Coste por km.tren	Coste por plaza.km
Larga distancia (200 m)	0,7 a 1,0 c€/ml.km	1,40 a 2,00 €	0,40 a 0,57 c€/p.km
Regional eléctrico (75m)	1,7 a 2,2 c€/ml.km	1,30 a 1,70 €	0,56 a 0,73 c€/p.km
Regional diésel (75 m)	2,0 a 2,6 c€/ml.km	1,55 a 2,00 €	0,70 a 0,9 c€/p.km
Cercanías elect. (75 m)	1,3 a 1,6 c€/ml.km	0,97 a 1,20 €	0,30 a 0,40 €/peskm

Fuente: (García Álvarez, 2012).

3.2.2.1.2 Coste talleres y limpieza exterior e interior

Los costes de talleres son costes de pequeña cuantía, comprenden entorno a un 5 o 6% del total de los costes de mantenimiento y de limpieza y se definen como los costes incurridos para la construcción del taller y su mantenimiento, vigilancia, seguridad, costes administrativos…

Los costes de limpieza comprenden los costes de retirada de objetos y residuos del tren y de limpieza de la preparación interior y exterior del tren, para cada viaje a realizar.

$$NC = 100 \times \frac{(L_T \times cc)}{D \times s} \qquad (3.\ 13)$$

Donde:

- NC: es el coste de limpieza por plaza-kilómetro (c€/plaza-kilómetro).
- L_T: longitud del tren (metros lineales).
- cc: Costes de limpieza por metro lineal de tren (€/metro-lineal), con valores comprendidos entre 1 y 1,5€/metro lineal.
- D: longitud del recorrido (kilómetros).
- s: plazas del tren (plazas/tren).

En (García Álvarez, 2012) puede encontrarse una tabla (Tabla 50) con valores orientativos y aproximados de los diferentes costes relacionados con el mantenimiento y que corresponden a un tren de alta velocidad de 200 metros lineales de longitud.

Tabla 50. Valores aproximados de coste de mantenimiento de un tren de alta velocidad de 200 metros de longitud.

Denominación	c€/km.tren	c€/plaza.km	%
Costes fijos de mantenimiento	0,77	0,1906	22%
Costes variables de mantenimiento	1,96	0,4851	56%
Costes de limpieza	0,56	0,1386	16%
Costes de mantenimiento de taller	0,14	0,0347	4%
Costes del operador del taller: agua, luz, gas, etc.	0,07	0,0173	2%
Coste total	3,5	0,866	100%

Fuente: (García Álvarez, 2012).

La relación entre la velocidad media y el coste de mantenimiento no es muy grande, si nos fijamos en las fórmulas que cuantifican tanto los costes de mantenimiento como los costes de limpieza, la velocidad solo incide en una parte pequeña de la función.

Asumiendo los valores de CF= 1.175€/metro-lineal-año, CV= 0,98€/metro-lineal-kilómetro y cc = 1,33€/metro-lineal como indica el proyecto (García Álvarez, 2010c) y utilizando los porcentajes indicados en la Tabla 50, sobre los costes totales de mantenimiento para el cálculo de los costes de mantenimiento de taller y costes del operador del taller, se puede obtener el coste total de mantenimiento y limpieza.

En la figura que se muestra a continuación (Figura 50) se refleja la influencia de la velocidad media en el coste total de mantenimiento y limpieza para recorridos con distancias de 200 km, 400 km y 500 km.

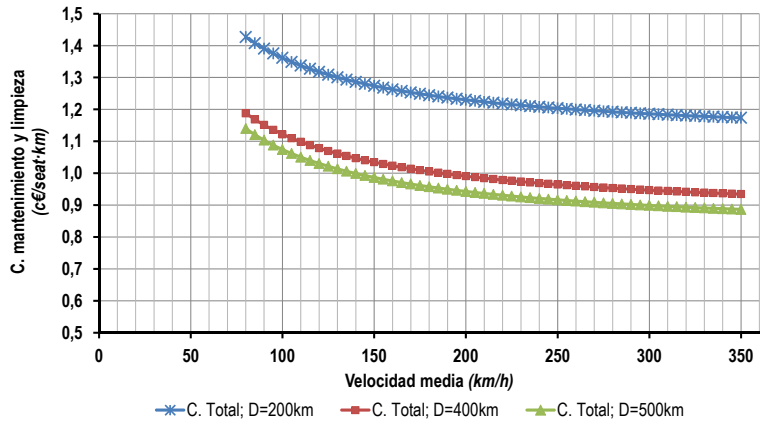


Figura 50. Elasticidad de los costes de mantenimiento y limpieza en relación a la velocidad media.

Se demuestra una elasticidad negativa en todos los casos entre la velocidad media y los costes de mantenimiento y limpieza, pero es importante expresar que esta variación (reducción de costes) no es muy acentuada, si se incrementa la velocidad media y se pasa de 220km/h a 280km/h la reducción de los costes es aproximadamente un 3%.

3.2.2.2 Costes de la energía de tracción

La energía de tracción es aquella energía necesaria para el movimiento de los vehículos y para alimentar los servicios auxiliares. Por lo tanto, para calcular el coste de la energía que se consume en el movimiento de los trenes, se tiene que tener en cuenta tres componentes: la energía consumida por el tren; la energía devuelta a la red (energía regenerada); y los costes derivados de la contratación de la potencia necesaria.

3.2.2.2.1 Energía consumida por el tren o energía de tracción

Se trata de cuantificar el coste de la energía que se consume por el simple movimiento, por lo tanto, se puede afirmar que cuando un tren está en movimiento consume energía para la tracción, pero también consume energía para alimentar los auxiliares (dispositivos como: aire acondicionado, calefacción…)

La metodología de cálculo que aquí se emplea se basa en el (García Álvarez, 2012) y toma la siguiente expresión (3. 14):

$$EC_s = E_{SM} \times EP_{SM} = E_{PM} \times \pi \times EP_{SM} \quad (3.\ 14)$$

El coste de la energía por plaza-kilómetro se expresa de la siguiente forma (3. 15):

$$ec = \frac{EC_s}{p} = (E_{PM} \times \pi \times EP_{SM}) \times \frac{1}{p} \quad (3.\ 15)$$

Donde:

- EC_s: es el coste unitario de la energía a la entrada en subestación por kilómetro.tren (c€/km.tren).
- E_{SM}: es la cantidad de energía importada a la entrada de subestación por kilómetro tren (kWh/km.tren).
- EP_{SM}: es el precio unitario de la energía y sus costes asociados (c€/kWh).
- E_{PM}: es la energía importada en el pantógrafo (kWh/km.tren).
- ◘: es el cociente entre la energía importada a la entrada en subestación y la energía importada en el pantógrafo (>1).
- p: plazas del tren.

En cuanto a la energía importada en pantógrafo (E_{PM}) el estudio (García Álvarez, 2012) establece que se puede estimar a partir de la siguiente expresión (3. 16):

$$E_{PM} = 3{,}2 \times 10^{-4} \times V_{com}^{0{,}8805} \times M \quad (3.\ 16)$$

Donde:

- V_{com}: es la velocidad media (km/h).
- M: es la masa del tren cargado (toneladas).

Tomando valores de ◘ = 1,03 para sistemas de corriente alterna (AC) como establece (Proyecto EnerTrans[14]) y para un precio de la energía de EP_{SM} = 9 c€/kWh, el cálculo del coste de la energía de tracción puede calcularse a partir de la siguiente expresión (3. 17):

$$ec = 3{,}32 \times 10^{-4} \times V_{com}^{0{,}8805} \times M \times 1{,}03 \times 9 \times \frac{1}{p} \quad (3.\ 17)$$

Tanto los valores de masa cargado como los valores de plazas se han considerado como hipótesis de entrada (412 toneladas y 350 plazas), por lo tanto, el coste de la energía de tracción puede formularse en función de la velocidad media de la siguiente manera:

[14] El proyecto de investigación EnerTrans desarrolla un modelo de cálculo y predicción de los consumos energéticos y emisión de transporte que permite valorar la sensibilidad de los consumos a las decisiones de inversión en infraestructuras y de política de transporte.

http://www.investigacion-ffe.es/proyecto_enertrans.asp

$$ec = 3{,}32 \times 10^{-4} \times V_{com}^{0{,}8805} \times 412 \times 1{,}03 \times 9 \times \frac{1}{350} = 3{,}623 \times 10^{-4} \times V_{com}^{0{,}8805} \quad (3.\ 18)$$

3.2.2.2.2 Energía devuelta a la red

La energía que los trenes devuelven a la red, gracias al freno regenerativo, se considera un coste negativo para el operador que se obtiene multiplicando la cantidad de energía devuelta en la subestación por el precio unitario.

El precio unitario recibido por la devolución de energía se calcula mediante la siguiente expresión (3. 19):

$$rec = -\left(E_{px} \times \frac{1}{\pi} \times (EP_{SM} \times \beta)\right) \times \frac{1}{p} \quad (3.\ 19)$$

Donde:

- rec: es el coste de la energía devuelta (c€/plaza.km).
- E_{px}: es la cantidad de energía devuelta en el pantógrafo (kWh/km).
- **◘**: es el factor de pérdidas entre la subestación y el pantógrafo (>1).
- EP_{SM}: es el precio de la energía importada (c€/kWh).
- **◘**: es el cociente entre el precio de la energía exportada y el precio de la energía importada; y p: es el número de plazas del tren.

La energía exportada se puede estimar como (3. 20):

$$E_{px} = 0{,}837 \times 10^{-4} \times V_{com}^{0{,}9652} \times M \quad (3.\ 20)$$

Con lo que, tomando valores de **◘** = 1, es decir que el coste de la energía que se devuelve es igual que el coste de la energía importada y tomando los valores considerados de referencia (3. 21):

$$rec = -\left(0{,}837 \times 10^{-4} \times V_{com}^{0{,}9652} \times 412 \times \frac{1}{1{,}03} \times (9 \times 1)\right) \times \frac{1}{350} = -11{,}14 \times 10^{-4} \times V_{com}^{0{,}9652} \quad (3.\ 21)$$

3.2.2.2.3 Coste de la contratación de la potencia

Es necesario contratar una potencia para el suministro de la electricidad y por lo tanto para garantizar el funcionamiento de la tracción eléctrica, es un coste que es soportado con independencia de su utilización. Imputar este coste al movimiento del tren o al tren es complejo, autores como (García Álvarez, 2012) lo relacionan con la velocidad media mediante la siguiente expresión (3. 22):

$$cp = P_t \times \xi \times \delta \times 100 \times Pc \times \frac{1}{30{,}4 \times 18 \times V_{com}} \times \frac{1}{p} \quad (3.\ 22)$$

Donde:

- *cp: es el coste unitario de la potencia (incluyendo impuestos y todos los pagos ligados a la potencia) (c€/p.km).*
- *P_t: es la potencia del tren (kW).*
- **◘**: es el factor adimensional de simultaneidad.
- *Pc: es el precio ligado a la potencia contratada (€/kW.mes).*
- *V_{com}: es la velocidad comercial (km/h).*

- ◘: es el factor de densidad de tráfico. Se considera que el mes medio tiene 30,44 días, y que el tráfico se desarrolla durante 18 horas diarias.

Tomando como ◘= 1,4, ◘ = 1 y Pc = 1,78 *€/kW.mes.* se obtiene el coste derivado de la contratación de la potencia necesaria en relación a la velocidad media.

Tras determinar cada uno de los costes que influyen en la energía necesaria para el movimiento de los trenes, el coste total se obtiene sumando el coste de la energía importada para tracción y auxiliares, se resta el coste de la energía devuelta a la red y agregando el coste la potencia, en todos los casos por plaza-kilometro.

$$tec = ec - rec + cp \qquad (3.\ 23)$$

Como se ha indicado, la velocidad media tiene un efecto importante sobre la energía importada, la exportada y sobre el término de potencia, por ello, no resulta complejo agrupar todos ellos y determinar la relación coste de energía y velocidad media.

El coste total de la energía de tracción en función de la velocidad comercial se resume en la siguiente gráfica (Figura 51). Se ha aplicado las fórmulas anteriormente expuestas para los trenes de la serie 103, 112 y el TGV dúplex, con el objetivo de estimar los costes energéticos en diferentes materiales y obtener así un rango de valores.

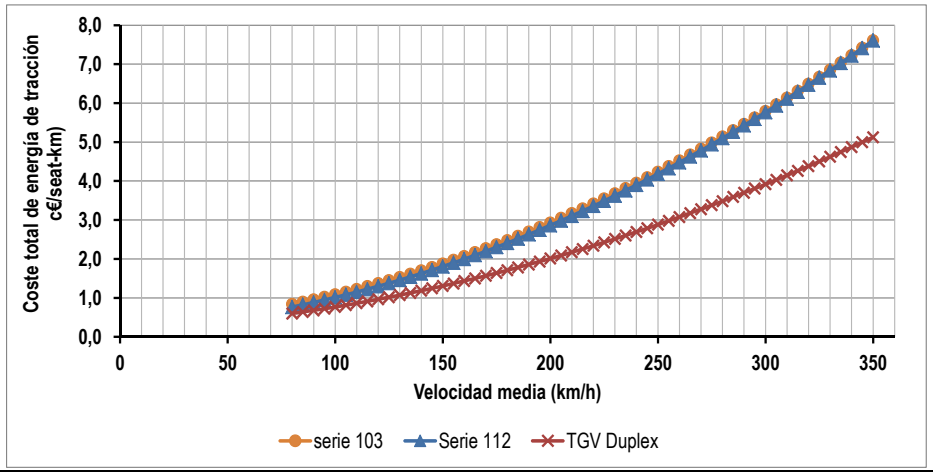


Figura 51. Coste total de la energía de tracción en función de la velocidad media.

Fuente: Elaboración propia.

En este caso se observa que el incremento de la velocidad media provoca el aumento de los costes *(c€/plaza-kilómetro)*. Se observan unas elasticidades medias positivas de 1,035.

3.2.2.3 Costes de personal de a bordo

En relación al personal que trabaja a bordo, se observa una relación negativa entre los costes que se generan y la velocidad media de los trenes en los que trabajan. De hecho, este personal tiene un horario de trabajo fijo que viene siendo unas 40 horas a la semana, si durante esta jornada laboral los trenes circulan a mayor velocidad los empleados recorrerán un mayor número de kilómetros, reduciendo así el número de personas necesarias para ofrecer el mismo servicio y por lo tanto el coste laboral por unidad de oferta (plaza-kilómetro).

El coste unitario de personal responde al a siguiente ecuación (García Álvarez, 2012):

$$C_{personal} = \left(\frac{LC_{dr} + C_{comp} \times J_{dr}}{J_{dr} \times H_{dr} \times V_{com}} + \frac{LC_a + C_{comp} \times J_a}{J_a \times H_a \times V_{com}}\right) \times 100 \times IL \qquad (3.\ 24)$$

Donde:

- *LC: [€/personal] es el coste anual de un trabajador para la empresa (con subíndice "dr"; si es un maquinista, y el subíndice "a" si es personal de acompañamiento).*
- *J: es el número de días al año laborables.*
- *H: el número de horas de trabajo al día.*
- *C_{comp}: es el coste complementario por día del personal (comidas, dietas, etc.).*
- *IL: es el coeficiente que tiene en cuenta el coste del personal indirecto.*

En la tabla que se muestra a continuación (Tabla 51) se indican los valores de cada una de las variables de la ecuación en el caso de España.

Tabla 51. Valores fijos para el cálculo del coste de personal a bordo

Coste anual de maquinista *(€/año)*	40.000
Costes anual de acompañante *(€/año)*	30.000
Número de jornadas anuales de trabajo	210
Horas efectiva sde conducción por jornada *(h)*	4
Horas efectivas de acompañamiento por jornada *(h)*	4,5
Coste Complementario por día *(€)*	15
Coef. de repercusión del personal indirecto	1,1
Plazas tren	350

Fuente: (García Álvarez, 2012).

Utilizando los valores expuestos en la tabla anterior y la ecuación que cuantifica el costes del personal a bordo se calcula el coste en función de la velocidad media expresado en c€/plaza-kilómetro (Figura 52).

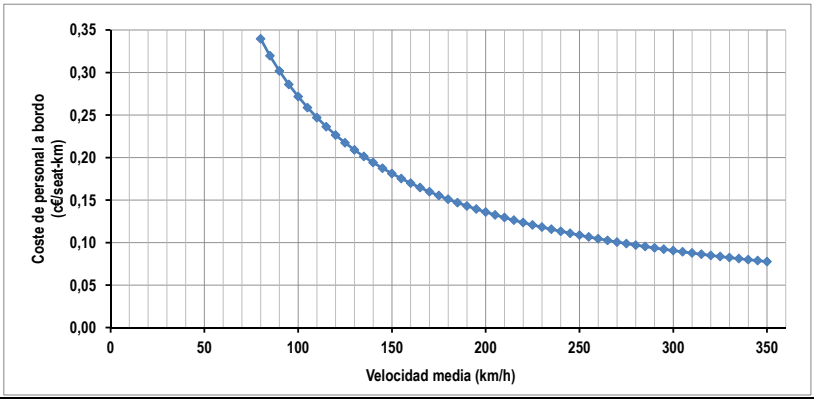


Figura 52. Coste total del personal de abordo en relación a la velocidad media.

Fuente: Elaboración propia.

La elasticidad del coste del personal en relación a la velocidad media es negativa como se afirmaba al principio de este capítulo, de hecho la influencia de la velocidad en los costes de personal es mayor que en los demás costes de explotación, en este caso si se pasa de circular de 220km/h a 280km/h se reducen los costes en un 23% (pasando de 0,1222c€/plaza-kilómetro a 0,0944c€/plaza-kilómetro) y esto es debido principalmente que si los trenes circulan más rápido hacen un mayor número de kilómetros en las horas que trabaja el personal de abordo, por lo tanto los costes, que son fijos (dependiendo si es un maquinista o personal de acompañamiento), por kilómetro se reducen.

3.2.2.4 Conclusiones

Como resumen, se muestra para varias velocidades medias, para diferentes trenes (serie 103, serie 112 y TGV Duplex) y para diferentes longitudes de línea (D), el coste total de explotación teniendo en cuenta que es la suma del coste de mantenimiento y limpieza, energía y personal a bordo, ya que son los costes que deben tenerse en cuenta en un ACB.

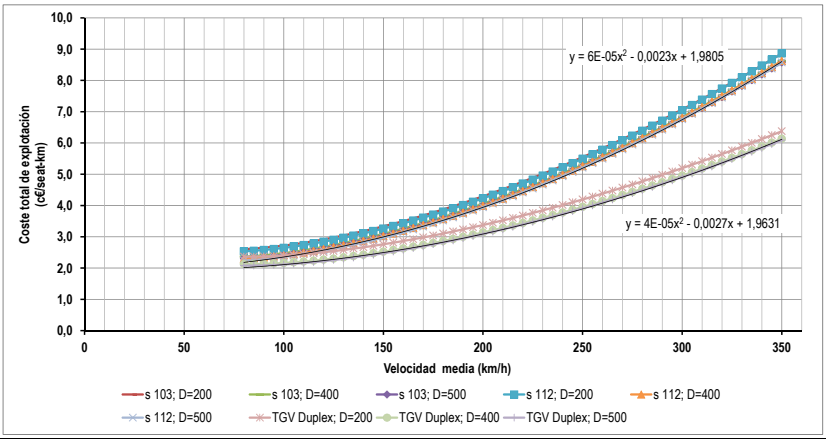


Figura 53. Estructura de costes de explotación en diferentes velocidades medias

Fuente: Elaboración propia.

Mediante el ajuste de los datos obtenidos tras usar las ecuaciones que estiman cada uno de los costes considerados, es posible determinar el coste total de explotación en función de su velocidad. Éste coste se encuentra dentro del rango delimitado por las siguientes ecuaciones:

$$C.exp_{max} = 6 \cdot 10^{-5} \times V_{com}^2 - 0{,}0023 \times V_{com} + 1{,}9805$$
$$C.exp_{min} = 4 \cdot 10^{-5} \times V_{com}^2 - 0{,}0027 \times V_{com} + 1{,}9631 \quad (3.\ 25)$$

Gracias a las gráficas y las fórmulas introducidas se puede determinar cada uno de los costes en c€/plaza kilómetro que supone al operador circular a una determinada velocidad con un tren de alta velocidad en una línea con unas determinadas características.

Estos costes (c€/plaza-kilómetro) calculados son en base a unas hipótesis de entrada (características del tren y del servicio) por lo que, es posible que si se utiliza otro tren y otro servicio pueden variar. De todas formas, para todos y cada uno de los costes de explotación se ha explicado su metodología de cálculo, lo que permite su estimación en el caso de que alguna de las condiciones o parámetros de entrada fuera diferente.

3.2.3 Costes de operación

Como se ha especificado anteriormente, en un ACB no solo es necesario cuantificar los costes de explotación, sino que también los costes de operación. Los costes de operación que no se encuentran dentro de los costes de explotación, son aquellos que no son necesarios para mover el tren, pero se incurre en ellos para captar viajeros y para que éstos puedan adquirir sus billetes.

Se identifican tres grandes costes operativos que no se han incluido dentro de los costes de explotación:

- Costes ligados a la venta y distribución.
- Costes de servicios a bordo.
- Costes generales de estructura.

3.2.3.1 Costes de venta y distribución

Existe un coste asociado a la venta de billetes, así como realizar el control de acceso, que deben de ser asumidos por el operador. Según el manual para la evaluación de inversiones en ferrocarril, elaborado por Adif, este coste recoge los valores mostrados en la Tabla 52.

Tabla 52. Costes incurridos por el operador debido a la venta de billetes. (Euros 2011)

Costes ligados a la venta	€/pasajero-km
Coste de venta pasajero de trenes de alta velocidad largo recorrido	0,0084
Coste de venta pasajero de trenes de alta velocidad tipo lanzaderas	0,0056
coste de venta pasajero de trenes convencionales	6%*

*sobre los ingresos por venta de billetes

Fuente: Manual para la evaluación de inversiones en ferrocarril, Adif 2011.

Puede observarse como este coste está relacionado con los viajeros (a mayor número de viajeros, mayor coste) viajeros que como hemos visto en el capítulo anterior están relacionados con la velocidad media (capítulo 1.3.3), por lo tanto, puede afirmarse que el coste asociado a la venta es un coste dependiente de la velocidad media.

3.2.3.2 Costes de servicios a bordo

Existe una serie de servicios que el operador ofrece sobre los viajeros de ferrocarril que suponen un coste relativamente elevado. Estos servicios son aquellos relacionados con la atención al cliente, entre los que encontramos la habilitación de salas de espera en estaciones, la entrega de prensa, catering, música…

Suelen se ofertados mayoritariamente en líneas de larga distancia y para plazas preferentes y club. El principal objetivo de este servicio principalmente reside en aumentar la competitividad o el atractivo del servicio, pero también trata de reducir la percepción del tiempo de viaje

El manual para la evaluación de inversiones de ferrocarril que elabora Adif los evalúa en los siguientes costes (Tabla 53).

Tabla 53. Costes incurridos por el operador debido a la atención al cliente

Asientos de clase club o preferente	€/plaza ofertada
Tren AV	7,46
Tren Convencional	5,45
Asientos de clase turista	0,55

Fuente: Manual para la evaluación de inversiones en ferrocarril, Adif 2011

Aquí la relación entre el coste y la velocidad no es tan clara como el caso anterior pero como hemos visto en el plan de explotación, a mayor número de viajeros mayor número de plazas tiene que ofertar el operador para cubrir esa demanda y por lo tanto mayor número de plazas mayor costes.

3.2.3.3 Costes generales y de estructura

Esta cuantía comprende los costes del personal de estructura y directivos, oficinas, locales, la energía para usos distintos de tracción, así como todos aquellos costes que son necesarios para el correcto uso de una empresa operadora de servicios ferroviarios

Según el manual de inversiones ferroviarias este concepto debe valorarse como un 30% del total de los costes resultantes de aplicar las fórmulas anteriores, porcentaje muy elevado en relación al valor que proporciona (García Álvarez, 2012) que está en torno al 8% para empresas ferroviarias e incluso afirma que para servicios de alta velocidad este valor baja a un 3% debido a la alta percepción media.

En este estudio se empleará un porcentaje del 3% ya que este dato ha sido obtenido con datos reales de Renfe Operadora.

3.2.4 Costes operativos: caso ejemplo línea Madrid-Valencia

En este apartado se estiman los costes de explotación del operador de transporte en la línea Madrid-Valencia. Al igual que se ha hecho en el capítulo ingresos y dimensionamiento del parque, el ejercicio consiste en variar la velocidad media y el precio del billete, con el fin de conocer, en esta ruta, el efecto de la velocidad en el coste de explotación para diferentes tarifas.

Recuérdese que el coste de explotación se estima en función de las plazas-kilómetro ofertadas y no sobre los viajeros kilómetro (como en los ingresos); es decir, las plazas kilómetro ofertadas son el inductor de coste y, por lo tanto, el coste de explotación depende de la oferta de transporte (número de trenes y características de los mismos).

Por ello, los resultados que aquí se mostrarán podrían ser considerablemente diferentes si las características de los trenes utilizados para el caso ejemplo cambiasen, por ejemplo, si el tren tiene una capacidad diferente: trenes con mucha capacidad (plazas) permiten transportar gran cantidad de viajeros en un solo servicio y, por lo tanto, el coste por plaza-kilómetro se reduce considerablemente si se compara con trenes con pocas plazas.

Para la realización de este caso ejemplo se ha considerado un tren con una capacidad fija, se emplea el mismo tren con las mismas características que el utilizado en el dimensionamiento del parque (tren AVE serie 112 Talgo con características expuestas en Tabla 33). El hecho de emplear el mismo tipo de tren (mismas características) y la misma línea reduce considerablemente el número de cálculos necesarios para la estimación del coste de explotación. Uno de los parámetros básicos para estimar el coste de explotación es el número de trenes-kilómetro necesarios para atender a la demanda, este número de trenes (dimensionamiento del parque) será diferente si el tipo de tren tiene unas características u otras.

En este caso, al emplear la misma tipología de tren, el número de trenes necesarios para dar servicio a la ruta analizada (Madrid-Valencia) es conocido y se ha calculado en el capítulo anterior (véase Tabla 48). Conocido el parque móvil y empleando la metodología expuesta en el apartado anterior, se fijan diferentes velocidades medias (rango entre 220km/h y 350km/h), diferentes precios de billete por viajero kilómetro (rango que va desde 8c€/vkm hasta 29c€/vkm), y se estima para cada caso el coste de explotación.

Este coste de explotación además contemplará el coste pagado por el operador al gestor de la infraestructura por el "uso" de la infraestructura y sus instalaciones (canon). En este caso se tendrán en cuenta dos supuestos: (i) el operador paga el canon marginal que corresponde a una tasa fija, (establecida en 2€/tren-kilómetro según (Crozet, 2007))

y (ii) el operador paga un canon que depende de la velocidad comercial (ecuación (2. 23)).

A continuación se incluyen en una tabla (Tabla 54) los resultados obtenidos tras proceder a la estimar el costes de explotación, considerando un canon marginal de 2€/tren-kilómetro.

Tabla 54. Costes de explotación en M€ del operador en función de la velocidad y del precio del billete, considerando un canon marginal de 2€/tren-km.

Precio Medio (c€/vkm)	Percepción media (c€/vkm)	Costes de Explotación (M€)													
		220 km/h	230 km/h	240 km/h	250 km/h	260 km/h	270 km/h	280 km/h	290 km/h	300 km/h	310 km/h	320 km/h	330 km/h	340 km/h	350 km/h
8	6,0	101,23	102,49	103,67	104,79	105,87	102,25	103,21	104,14	105,05	105,95	106,84	**107,73**	103,51	104,33
8,5	6,4	100,27	101,53	98,25	103,86	100,35	101,34	102,31	103,25	104,17	105,08	105,98	106,88	102,67	103,49
9	6,8	99,27	96,14	97,27	98,36	99,39	100,40	101,37	102,32	98,40	99,26	100,11	100,95	101,78	102,61
9,5	7,1	93,91	95,12	96,27	97,36	98,41	94,76	95,68	96,57	97,45	98,32	99,18	100,02	100,87	96,54
10	7,5	92,87	94,09	95,24	91,80	97,39	93,75	94,68	95,58	96,47	97,35	98,21	94,03	99,91	95,60
10,5	7,9	87,47	88,63	89,72	90,76	91,76	92,72	93,65	94,57	95,46	91,43	92,24	93,04	93,83	94,62
11	8,3	86,40	87,56	88,65	89,70	90,70	91,67	87,88	88,74	89,58	90,40	91,22	92,02	92,82	93,61
11,5	8,6	80,99	82,08	83,11	84,09	85,03	85,94	86,82	87,68	88,53	89,35	90,17	90,98	91,78	92,58
12	9,0	79,92	81,00	82,03	83,01	83,95	84,86	85,75	86,61	82,61	83,38	84,14	84,89	85,63	86,37
12,5	9,4	78,85	75,52	76,48	81,93	78,27	79,11	79,94	80,74	81,53	82,30	83,06	83,81	84,56	85,30
13	9,8	73,45	74,45	75,40	76,31	77,18	78,03	78,85	79,65	80,44	81,22	81,98	82,73	83,48	84,22
13,5	10,1	72,40	73,39	74,33	75,24	76,11	76,95	73,04	73,78	74,51	75,22	75,92	76,61	77,30	77,98
14	10,5	67,04	67,95	68,81	69,64	70,44	71,22	71,97	72,71	73,43	74,14	74,84	75,53	76,21	76,89
14,5	10,9	66,03	66,93	67,78	68,60	69,39	70,16	70,91	71,64	72,36	73,06	73,76	74,45	75,13	75,81
15	11,3	56,37	65,93	57,83	67,58	59,17	59,80	60,41	61,01	61,60	62,18	62,75	63,31	63,87	64,42
15,5	11,6	55,43	56,16	56,85	57,52	58,16	58,78	59,39	59,98	60,57	61,14	61,70	62,26	62,81	63,36
16	12,0	54,52	55,22	55,90	56,55	57,18	57,80	58,39	58,98	59,55	60,12	60,68	61,23	61,78	62,32
16,5	12,4	53,64	49,92	54,99	51,09	56,24	52,18	57,43	53,22	53,72	59,13	54,71	55,19	55,67	56,15
17	12,8	48,46	49,06	49,64	50,19	50,73	51,26	51,77	52,27	52,77	53,25	53,74	54,21	54,69	55,16
17,5	13,1	47,66	48,24	48,79	49,33	49,86	50,37	50,87	51,36	51,85	52,33	52,80	53,27	53,74	54,20
18	13,5	46,90	43,05	47,99	48,51	44,42	49,52	50,01	45,70	50,96	51,43	46,92	52,36	52,82	53,27
18,5	13,9	41,84	42,31	42,76	43,20	43,63	44,05	44,46	44,87	45,27	45,67	46,06	46,45	46,84	47,22
19	14,3	41,16	41,60	42,04	42,46	42,87	43,28	43,68	44,07	44,46	44,85	45,23	45,62	46,00	46,37
19,5	14,6	40,52	40,94	41,36	41,76	42,16	42,55	42,94	43,32	43,70	44,07	44,45	44,82	45,19	45,56
20	15,0	35,58	40,32	36,24	36,57	41,48	41,86	37,51	42,61	42,97	43,34	38,73	44,07	44,43	44,79

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior destaca (celdas sombreadas) para cada velocidad comercial el precio de billete que supondría el mayor coste de explotación para el operador. Se observa que en todos los casos el mayor coste se genera para precios de billete de 8c€/vkm, se observa también que el peor escenario para el operador se obtendría para velocidades medias de 330km/h (107,7M€), el resto de combinaciones supondría menos costes al operador.

A continuación se muestran los resultados suponiendo que el operador paga un canon variable en función de la velocidad comercial (Tabla 55).

Tabla 55. Costes de explotación en M€ del operador en función de la velocidad y del precio del billete, considerando un canon variable en función de la velocidad comercial

Precio Medio (c€/vkm)	Percepción media (c€/vkm)	Costes de Explotación (M€)													
		220 km/h	230 km/h	240 km/h	250 km/h	260 km/h	270 km/h	280 km/h	290 km/h	300 km/h	310 km/h	320 km/h	330 km/h	340 km/h	350 km/h
8	6,0	169,28	175,22	181,09	186,89	192,65	187,18	192,48	197,76	203,02	208,27	213,51	**218,74**	210,00	214,82
8,5	6,4	168,32	174,26	170,14	185,96	180,93	186,27	191,58	196,87	202,14	207,40	212,65	217,89	209,15	213,99
9	6,8	167,32	163,67	169,16	174,59	179,98	185,32	190,64	195,94	188,84	193,71	198,57	203,42	208,27	213,11
9,5	7,1	157,10	162,66	168,16	173,59	178,99	173,15	178,08	182,99	187,89	192,77	197,64	202,50	207,35	197,83
10	7,5	156,06	161,63	167,13	162,17	177,97	172,14	177,09	182,00	186,91	191,79	196,67	187,96	206,40	196,89
10,5	7,9	145,80	150,97	156,08	161,13	166,14	171,11	176,06	180,99	185,90	178,01	182,49	186,97	191,44	195,91
11	8,3	144,73	149,90	155,01	160,07	165,08	170,06	163,42	167,96	172,48	176,98	181,47	185,95	190,43	194,90
11,5	8,6	134,46	139,23	143,93	148,59	153,21	157,80	162,36	166,90	171,42	175,93	180,43	184,91	189,39	193,87
12	9,0	133,39	138,15	142,85	147,51	152,13	156,72	161,29	165,83	157,97	162,08	166,19	170,28	174,37	178,45
12,5	9,4	132,32	127,47	131,77	146,43	140,25	144,44	148,61	152,76	156,89	161,00	165,11	169,21	173,30	177,38
13	9,8	122,06	126,40	130,70	134,95	139,17	143,36	147,53	151,67	155,80	159,92	164,03	168,13	172,22	176,30
13,5	10,1	121,01	125,35	129,63	133,88	138,09	142,28	134,85	138,60	142,33	146,05	149,76	153,47	157,16	160,85
14	10,5	110,78	114,70	118,58	122,42	126,23	130,01	133,78	137,52	141,25	144,97	148,68	152,38	156,08	159,76
14,5	10,9	109,78	113,69	117,55	121,38	125,18	128,96	132,71	136,45	140,18	143,90	147,60	151,30	154,99	158,68
15	11,3	90,40	112,69	96,54	120,36	102,56	105,53	108,49	111,43	114,36	117,27	120,18	123,09	125,98	128,88
15,5	11,6	89,45	92,52	95,56	98,57	101,55	104,51	107,46	110,40	113,32	116,23	119,14	122,04	124,93	127,82
16	12,0	88,54	91,59	94,61	97,60	100,57	103,53	106,47	109,39	112,31	115,21	118,11	121,01	123,89	126,78
16,5	12,4	87,67	81,09	93,69	86,27	99,63	91,38	105,50	96,43	98,94	114,22	103,94	106,43	108,91	111,40
17	12,8	77,63	80,23	82,81	85,38	87,92	90,45	92,97	95,48	97,98	100,48	102,97	105,45	107,93	110,41
17,5	13,1	76,83	79,41	81,97	84,52	87,05	89,57	92,07	94,57	97,06	99,55	102,03	104,51	106,98	109,45
18	13,5	76,07	69,02	81,17	83,70	75,42	88,72	91,21	81,71	96,18	98,66	87,95	103,59	106,06	108,52
18,5	13,9	66,14	68,28	70,41	72,52	74,62	76,71	78,80	80,88	82,95	85,02	87,08	89,15	91,21	93,27
19	14,3	65,46	67,58	69,68	71,78	73,86	75,94	78,02	80,08	82,14	84,20	86,26	88,31	90,36	92,41
19,5	14,6	64,82	66,92	69,00	71,08	73,15	75,21	77,27	79,33	81,38	83,43	85,47	87,52	89,56	91,60
20	15,0	55,02	66,30	58,36	60,02	72,48	74,53	64,98	78,61	80,65	82,69	71,55	86,76	88,80	90,83

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que considerado el pago de un canon marginal el peor escenario, desde el punto de vista del coste, para el operador sería para un precio de billete de 8c€/vkm y dentro de este precio el caso en el que el coste alcanzaría el máximo sería para 330km/h.

Se observa también que en relación al caso anterior (canon marginal) el coste asumido por el operador se incrementa considerablemente, de media se obtiene que los costes son aproximadamente el doble (1,8) si el operador paga un canon variable que si paga un canon marginal.

Los resultados obtenidos tienen sentido, pues si nos fijamos en la demanda (Tabla 30) y en el número de trenes necesarios para atenderla (Tabla 48), ambos parámetros son mayores a precios bajos (mayor movilidad y mayor número de trenes necesarios), alcanzando su máximo en 8c€/vkm, por lo que sería de suponen, y así confirman los resultados, que con esta tarifa el operador tendrá mayores gastos.

Si volvemos a los ingresos del operador (Tabla 31), recuérdese que los mayores ingresos el operador los obtendría a precios entre 11c€/vkm y 12c€/vkm. Por tanto, pude afirmarse que fijar un precio de billete de 8c€/vkm sería una estrategia muy desaconsejable para el operador pues, no obtienen los máximos ingresos y además le generaría los mayores costes de explotación.

Centrándose ahora en la influencia de la velocidad en los resultados, tras el análisis se obtienen que incrementos en la velocidad y, por lo tanto, reducciones del tiempo de viaje, implican pequeños incrementos en el coste de explotación (véase Tabla 54 y Tabla 55) siempre y cuando el número de trenes necesario para atender el servicio sea el mismo. Esto sucede para tarifas de 13c€/vkm, 14c€/vkm y 16c€/vkm. Si se analiza el

número de trenes necesarios para estas tarifas (Tabla 48) se observa que no existe variación sea cual sea la velocidad.

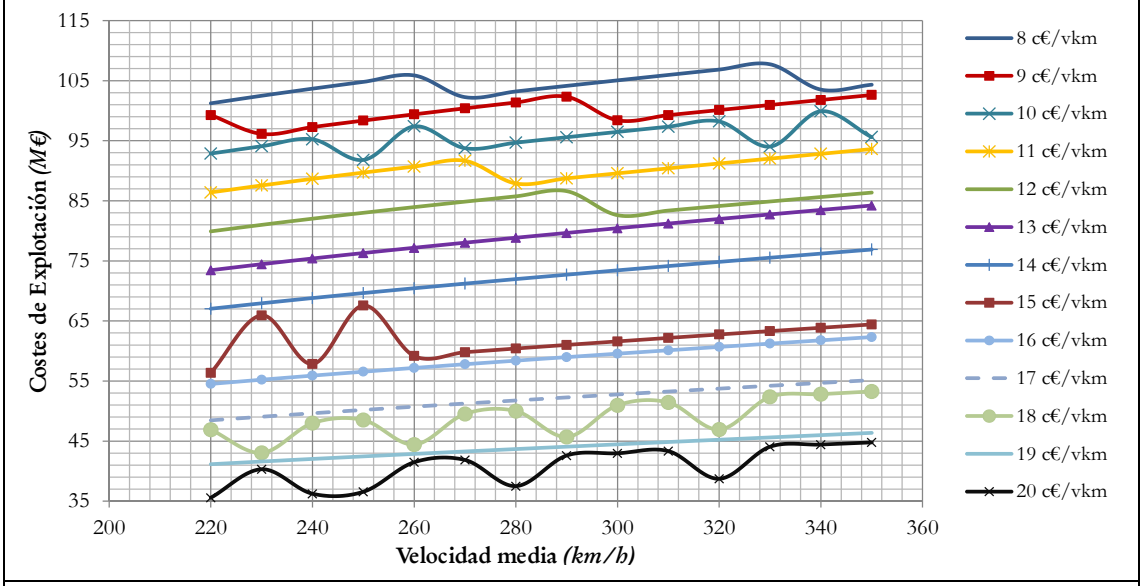


Figura 54. Efecto de la velocidad en el coste de explotación para diferentes tarifas y considerando un canon marginal.

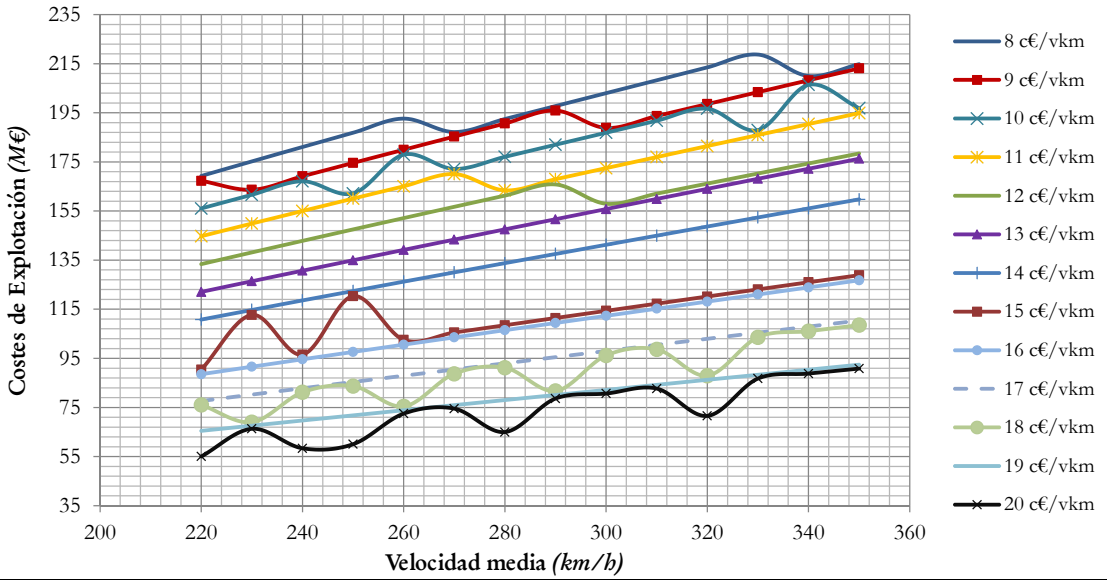


Figura 55. Efecto de la velocidad en el coste de explotación para diferentes tarifas y considerando un canon variable.

Fuente: Elaboración propia.

Las gráficas son diferentes si hay una variación del número de trenes a medida que se incrementa la velocidad media. Como se ha mostrado en la sección 2.6.3, a medida que aumenta la velocidad, en la mayoría de casos, se reduce el número de trenes necesarios para atender el servicio, aunque la demanda se incrementa, pues mayor velocidad mayor movilidad en el corredor, pero el hecho de circular más rápido permite al operador hacer mayor uso del material rodante, y con un mismo tren puede hacer más servicios.

Este efecto de incremento de velocidad y reducción del número de trenes necesarios se refleja en los costes de explotación, pues como se observa en las figuras anteriores a determinadas velocidades medias (dependiendo del precio de billete que se analice) hay una caída del coste de explotación por el simple hecho de que hay una reducción del número de trenes necesarios y, por lo tanto, la oferta de plazas del operador se reduce.

Es importante destacar que el coste está ligado a las plazas kilómetro que el operador oferta y, por lo tanto, en aras de minimizar el coste de explotación el operador debería de optimizar la capacidad de los trenes que utiliza para dar servicio a una determinada movilidad.

Los resultados del caso que se ha mostrado aquí cambiarían considerablemente si el tren utilizado tuviera un mayor número de plazas, ya que se reduciría el número de trenes necesarios.

Tras analizar los resultados y a modo de resumen se destacan los siguientes puntos:

- El importe del canon que tiene que pagar el operador es una cuantía muy considerable dentro de la estructura de costes del mismo y que afecta decisivamente a la competitividad del operador. Los resultados muestran que aplicando un canon marginal, el operador reduce sus costes casi a la mitad que si se aplica un canon variable como el estimado en la ecuación (2. 23). Por lo tanto, es una cuestión muy importante que afecta a la rentabilidad financiera de un proyecto, sobre todo en la rentabilidad financiera tanto del operador como del gestor de la infraestructura, y debe ser analizada en detalle, aunque está fuera del alcance de esta tesis doctoral.
- A menor precio de billete y suponiendo resto de parámetros constantes (en este caso la velocidad y capacidad del tren) mayor coste de explotación. Se produce un incremento en el número de viajeros y, por lo tanto, el operador necesita mayor número de trenes (más personal, mantenimiento, consumo de energía).
- La influencia de la velocidad media en los costes de explotación totales del operador no afecta de la misma manera en todos los casos ni en todos los escenarios, por lo tanto, es necesario realizar un análisis detallado para cada caso. En el escenario que aquí se propone se extraen las siguientes conclusiones:
    - A mayor velocidad, generalmente, se reduce el número de trenes necesarios para atender el servicio, ya que permite al operador hacer mayor uso del material rodante. Sin embargo, este efecto está condicionado por las características del tren (capacidad, etc.).
    - En aquellos casos en los que la velocidad no reduce el número de trenes necesarios para atender la demanda, el coste de explotación se incrementa ligeramente con la velocidad, ya que el coste de consumo de energía crece en mayor medida que la reducción que se produce en los costes de mantenimiento y personal.
- La última observación importante corresponde a la capacidad del tren, se observa que el coste de explotación está muy vinculado a este parámetro, ya que influye en el número de trenes necesario por el operador para dar servicio. Si el operador de transporte tiene la intención de reducir al máximo su coste de explotación debería de comprar trenes cuya capacidad está optimizada a la demanda de la ruta. Obsérvese que cuanta mayor capacidad del tren, generalmente, mayor coste de inversión en material rodante (ecuación (3. 2)), por lo que, el posible ahorro en costes de explotación puede no compensar el incremento en el coste de adquisición.

3.3 COSTES DE INVERSIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA Y SU RELACIÓN CON LA VELOCIDAD DE DISEÑO

3.3.1 Introducción

El objetivo principal de este capítulo consiste en analizar, estudiar y determinar la estructura de costes de inversión de una infraestructura ferroviaria. Tras este análisis, se estudiará el efecto de la velocidad máxima de diseño de una infraestructura ferroviaria en estos costes, lo que permitirá establecer una relación causa-efecto entre ambos parámetros (velocidad máxima y costes de inversión).

Analizar el papel que tiene la velocidad en los costes de inversión es tarea compleja. La escasez de datos referentes a diferentes infraestructuras ferroviarias que presentan características técnicas similares, pero con distintas velocidades de diseño, limita el análisis y dificulta la elaboración de una metodología válida basada en la explotación de datos de pasado que posibilite una comparación homogénea.

A este hecho se la añade la dificultad para encontrar un patrón común que sea inductor de costes de inversión. Una de las principales causas de estas diferencias se debe al distinto contexto económico y geográfico que presentan cada una de las diferentes referencias que se analizan para el desarrollo de este estudio. Por ejemplo, los precios básicos asociados a la estructura de costes (salarios, material, …) son parámetros importantes y que marcan relevantes diferencias según el país que se estudie, precios claramente condicionados por el poder adquisitivo y la coyuntura económica. Otra dificultad añadida son las diferentes leyes de expropiación, los criterios de definición de la superficie expropiable, indemnizaciones, etc.

Estas variaciones provocan grandes diferencias entre proyectos que presentan los mismos requerimientos técnicos, lo que al final se traduce en grandes diferencias en costes. El estudio preparado por (Steer Davies, 2004), en el que se contempla el coste de construcción de líneas de alta velocidad en diferentes países del mundo (España, Francia, Alemania, Japón, Corea, Italia, Taiwán, Países Bajos y Reino Unido), refleja perfectamente la variabilidad mencionada (Figura 56).

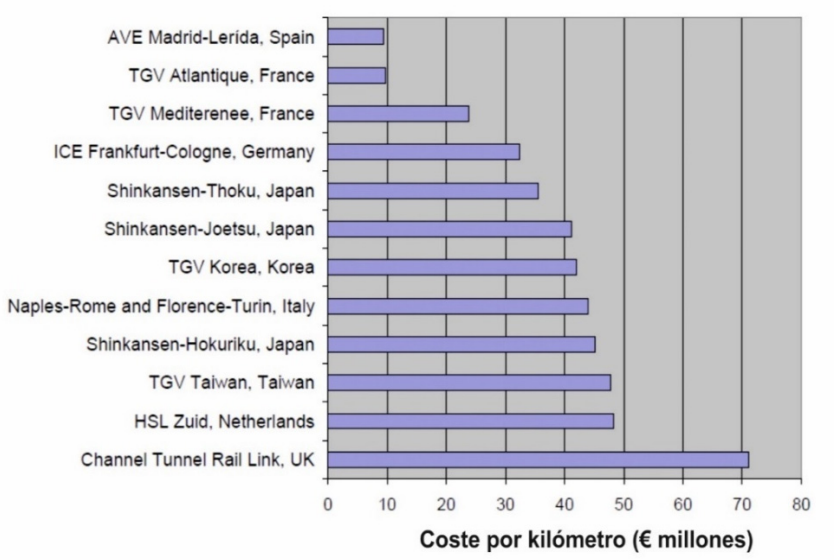


Figura 56. Coste de construcción de líneas de alta velocidad (I)

Fuente: (Steer Davies, 2004).

Otro estudio realizado por el CENIT (CENIT, 2008), confirma también la diferencia en costes según línea y país (véase Figura 57).

País	Líneas	M€/km (*)
Francia	París-Lyon	4,44
	TGV-Atlántico	7,40
	Valence - Marsella	14,52
Japón	Tokaido	19,26
	Sanyo	21,48
	Joetsu	48,13
	Tohoku	31,84
Alemania	Hannover-Würzburg	25,18
	Mannheim-Stuttgart	26,66
	Colonia - Frankfurt	26,97
España	Madrid-Sevilla	7,22
	Madrid - Lleida	10,37
Reino Unido	Londres-Folkestone (1er tramo)	31,12

(*) Actualizados año 2005

Figura 57. Coste de construcción de líneas de alta velocidad (II)

Fuente: (CENIT, 2008).

Las grandes diferencias observadas entre los costes por kilómetros obedecen a un extenso catálogo de razones:

- Años de construcción de las infraestructuras (lo que es relevante por la evolución de los costes en el tiempo).
- Países con costes unitarios y entornos económicos diversos.
- Calidad portante del terreno distinta.
- Relieve y orografía diferente entre líneas e incluso en tramos de una misma línea.
- Normativas técnicas de explotación, urbanísticas y medioambientales diferentes.
- Diferentes valores de la inclinación de la vía en alzado (rampas y pendientes).
- Velocidades máximas de diseño diferentes.

Las diferencias en costes no sólo se observan en líneas de diferentes países, sino también en infraestructuras de un mismo país. Si se analizan los costes de construcción de líneas de alta velocidad españolas, se observa también una grandísima variabilidad en lo relativo a costes de inversión (véase Tabla 56), lo que dificulta enormemente la determinación de una metodología común y válida.

La evolución en el tiempo de los costes unitarios y de los requerimientos técnicos y ambientales puede explicar en parte estas diferencias. Sin embargo, en general es el tipo de terreno y las características orográficas sobre las que se construye la infraestructura las que están detrás de estas diferencias.

Tabla 56. Costes de inversión de las diferentes líneas de alta velocidad españolas.

	Madrid-Barcelona	Madrid-Sevilla	Córdoba-Málaga	Madrid-Valladolid	Madrid-Levante	Orense-Santiago
Puesta en servicio	2007	1992	2007	2007	2010	2011
km de explotación	628	476	155	179,3	438	87
Velocidad diseño	350	270	350	350	350	350
Coste total (M€)	8.551,7	2.966,8	2455,68	4111,28	5491	2062,82
Coste por kilómetro (M€/km)	13,6	6,2	15,8	22,9	12,5	23,7

Fuente: Memoria Económica Adif 2006-2013. Costes actualizados a Diciembre 2014.

Advertida esta problemática, se entiende que una de las posibles formas de afrontar esta cuestión es mediante un enfoque "bottom-up" del tipo ingenieril, es decir, relacionando los requisitos (técnicos) necesarios para definir o construir una infraestructura con sus respectivos costes. Expuesto de otra manera, es posible centrar el estudio en la definición del trazado, analizando los parámetros geométricos básicos y necesarios para la construcción de una infraestructura ferroviaria y estudiar la relación de éstos con la velocidad máxima de diseño y con el coste de inversión.

Por lo tanto, el objetivo principal, consiste en analizar y cuantificar económicamente la influencia que tiene la velocidad máxima de diseño sobre una serie de parámetros básicos que condicionan el trazado ferroviario.

La influencia de la velocidad en parámetros tales como el radio de curva, pendiente, etc. es clara y ampliamente estudiada. Sin embargo, la relación con otros parámetros y elementos de la infraestructura no es tan evidente (porcentaje de túnel, viaducto y movimiento de tierras, etc.) y menos aún su relación con el coste de inversión.

A modo de resumen, se destacan y exponen las siguientes relaciones, que serán analizadas a lo largo de este capítulo:

1. Efecto de la velocidad en la longitud de línea. La "sinuosidad" de las líneas ferroviarias, vine condicionada por el radio de curva mínimo que presenta la infraestructura. Puede afirmarse que, a mayor velocidad, menos sinuosa será la línea (más recta) y, por lo tanto, existirá menor distancia entre origen y destino, lo que afectará al coste final de la infraestructura e instalaciones, pues se construirán menos kilómetros de línea.
2. Efecto de la velocidad en el tipo de obra construida y en el coste de inversión. La velocidad juega un papel fundamental en los costes de construcción de tramos montañosos o muy montañosos e influye claramente en la cantidad y en la longitud de túneles y viaductos a construir. A menor velocidad mayor posibilidad de "escapar" de aquellas zonas con relieves muy accidentados, ya que se dispone de radios más pequeños, ofreciendo así la posibilidad de construir una línea más sinuosa que transcurra, por ejemplo, por el cauce de los ríos o que rodee las montañas.
3. Efecto de la velocidad y la rampa máxima. Velocidades elevadas implican trenes con elevadas potencias, cuanta mayor sea la potencia de un tren mayor será la capacidad de este para subir rampas. Elevadas rampas permiten un mayor ajuste del trazado al relieve (orografía) y, por lo tanto, se reduce la necesidad de túneles y viaductos, lo que en definitiva supone una clara reducción de los costes de inversión.
4. Efecto de la velocidad y la sección de túnel. Cuanto mayor es la sección libre que existe entre túnel y tren, menor es la resistencia al avance en túnel y, por lo tanto, menor es la diferencia de presiones sufrida por los viajeros. Así pues, es

imprescindible aumentar la sección de los túneles para poder circular a elevadas velocidades, lo que supone un incremento en el coste de inversión.

5. Efecto de la velocidad y el ancho de la plataforma. A mayor velocidad, mayor distancia entre ejes, lo que incrementa el ancho de plataforma. Al incrementar el ancho de plataforma se incrementa el coste de inversión en la subestructura.
6. Efecto de la velocidad en el montaje de vía. A mayor velocidad mayor espesor de la capa de balasto bajo traviesa lo que supone un incremento en el coste. Además, la velocidad también afecta a la tipología de desvíos empleada, mayor velocidad implica la instalación de desvíos de punta móvil, lo que incrementa el coste sustancialmente.
7. Efecto de la velocidad y coste de electrificación. Entre otros efectos producidos por la velocidad máxima en el coste de la electrificación, puede destacarse que, a mayor velocidad máxima, mayor potencia de los trenes que circularán por la vía y, por tanto, la potencia de la subestación también será mayor (mayor potencia de los transformadores), incrementándose la corriente (intensidad) que circula por el cable. Al incrementarse la corriente, es necesario emplear cables con mayor sección. Ya sea por el aumento de potencia de los transformadores o por el aumento de sección de los cables o por ambas causas, el coste se incrementa considerablemente.
8. Efecto de la velocidad y costes de señalización. La influencia de la velocidad máxima reside básicamente en la tecnología instalada, tanto a bordo como en tierra. A mayor velocidad los sistemas tanto de comunicación como de señalización deben de ser tecnológicamente más avanzados, pues los requerimientos de seguridad son mayores, lo que implica un mayor coste de inversión.

Antes de profundizar en la materia, es importante mencionar que los valores y modelos que aquí se exponen, pueden servir para realizar una primera aproximación de la inversión necesaria en proyectos de infraestructuras ferroviarias (son buenas aproximaciones para evaluaciones *ex-ante*). Las cifras que se mostrarán a lo largo de este estudio son necesariamente aproximadas, recogidas de forma empírica tras el análisis de casos reales. Esto no limita el alcance del proyecto, ya que los valores mostrados permiten tener una idea clara de la magnitud de cada uno de ellos.

3.3.1.1 Estado del arte

La literatura analizada en este campo se centra mayoritariamente en dos grandes líneas:

- Análisis de la estructura de costes de construcción de líneas ferroviarias dimensionadas para una determinada velocidad máxima. Entre los estudios más destacados se puede citar el artículo (Campos, De Rus, & Barrón, 2009) y el informe (Atkins, 2002).
- También se destaca aquí, como estudio de referencia, que tiene por objeto el análisis de los distintos elementos que componen los costes de inversión, el estudio desarrollado por el CENIT (CENIT, 2008). Importante también es el proyecto (Quandel Consultants, 2011) principalmente, por la desagregación de costes que se muestra (desvíos, cruces, estructuras…).
- Y aquellos que se centran en la solución a problemas puntuales que limitan la velocidad de circulación de los trenes, entre ellos se destaca (Subhash & Verma, 2007).

Existen también una gran cantidad de estudios relativos a otras disciplinas que tienen por objeto determinar el trazado óptimo teniendo en cuenta sus costes (Lee & Cheng, 2001) y otros que tienen en cuenta la optimización del trazado dependiendo de limitaciones propias del sistema ferroviario (radios de curva, pendientes…). Estudios importantes en este campo se pueden citar (Malo Gaona, 1992) o también (Linkerhägner, 1985).

Se puede encontrar también relevante literatura que trata sobre métodos constructivos, definición de las diferentes fases de construcción de una línea e importantes análisis de los distintos costes que supone realizar una línea ferroviaria, dentro de esta línea se puede destacar (López Pita, 2008).

En relación a la normativa puede citarse como relevante las I.G.P[15] o NRV[16] que especifican los requisitos y/o valores máximos y mínimos para la mayor parte de los parámetros relacionados con la explotación ferroviaria y que indirectamente están relacionados con los costes de construcción.

En cuanto a la relación entre la velocidad y los costes de construcción cabe destacar los estudios (Fröidh, 2012) y (Fröidh, 2014). En ellos se realiza un detallado análisis sobre los costes y su sensibilidad con la velocidad máxima, empleando para ello datos reales, extraídos mayoritariamente de proyectos suecos y noruegos. Otro estudio que presenta una gran base de datos, es el de (Baumgartner. J.P, 2001). En él se calculan los diferentes costes de construcción para dos velocidades máximas de diseño diferentes (100km/h y 300km/h), distinguiendo entre los costes de ingeniería civil y plataforma, costes de señalización y comunicaciones, costes de electrificación, etc.

3.3.2 Inversión en la infraestructura: costes totales de la infraestructura

Generalmente, se diferencian dos grandes grupos de inversión dentro de los costes de ingeniería civil: (i) aquellos que están relacionados con la infraestructura y (ii) los relacionados con la superestructura. La inversión realizada en cada uno de estos dos grandes grupos depende claramente de la línea analizada, sin embargo, artículos como (Fernández Arévalo & Vázquez, 2012) y estudios como (UIC, 1999) afirman que los costes de ingeniería civil (costes de infraestructura) pueden llegar a superar el 60% de los costes totales de construcción de una línea de alta velocidad.

A continuación se muestran algunos ejemplos de líneas de alta velocidad reales francesas y españolas (Tabla 57), datos que vienen a corroborar lo que los estudios citados afirman.

Tabla 57. Importancia de cada componente de una línea de alta velocidad sobre la inversión total..

		Francia				España		
		Paris-Lyon	TGV Atlántico	Lyon-Valence	Interconexión	Madrid-Zaragoza	Zaragoza-Lleida	Lleida-Barcelona
Infraestructura		61%	69%	74%	75%	60%	56%	66%
Superestructura	Vía	21%	12%	11%	11%	18%	20%	15%
	Electrificación	9%	9%	9%	6%	9%	10%	8%
	Instalaciones de seguridad	9%	10%	6%	8%	13%	14%	11%

Fuente: (López Pita, 2010).

Es importante mencionar que también existen otras partidas dentro de los costes de inversión que, aunque son de menor cuantía, pueden llegar a ser de gran importancia en determinados proyectos. Dentro de estos costes pueden encontrarse los costes de las estaciones y los costes de expropiación.

A modo de resumen puede afirmarse que el coste total de inversión se compone por:

[15] I.G.P. Instrucciones y Recomendaciones para Redacción de Proyectos de Plataforma

[16] N.R.V Normativa Renfe Vía

1. Coste de la subestructura:
    a. Plataforma.
    b. Capa de forma y drenaje.
2. Coste de la subestructura:
    a. Vía.
    b. Electrificación.
    c. Instalaciones.
3. Costes de expropiación.
4. Costes de estaciones.

Tomando la siguiente expresión:

$$C_{tot.Inv} = U_{tot.km} \times L_{línea} + C_{exp} + C_{est} \quad (3.\ 26)$$

$$U_{tot.km} = U_{sub} + U_{sup} = U_{Plat} + U_{C.FyD} + U_{vía} + U_{elec} + U_{ins} \quad (3.\ 27)$$

Donde:

- *$C_{tot.inv}$: coste total de inversión de una infraestructura ferroviaria (M€).*
- *U_l: coste total por kilómetro de línea (M€/km).*
- *U_{sub}, U_{sup}, U_{plat}, $U_{C.FyD}$, $U_{vía}$, U_{elec}, U_{ins}: coste por kilómetros de la subestructura, superestructura, plataforma, capa de forma y drenaje, vía, electrificación e instalaciones (M€/km).*
- *L_{linea}: longitud de la infraestructura (km).*
- *C_{exp}: coste de expropiación (M€).*
- *C_{est}: coste de las estaciones (M€).*

En las siguientes secciones de este capítulo se mostrará y analizará de manera independiente cada uno de los costes definidos en la ecuación (3. 26), pero antes de profundizar en este análisis, es importante poner el foco en dos parámetros que afectarán decisivamente al coste total de la infraestructura y que, como se verá más adelante, la velocidad tiene un efecto muy claro en ellos. Estos parámetros son: (i) longitud de la línea y (ii) tipo de terreno en el que se construye la infraestructura.

3.3.2.1 Longitud real de una línea y efecto de la velocidad máxima de diseño

Es importante tener en cuenta que la limitación de velocidad de circulación de los trenes viene determinada por los radios de curvas existentes en la infraestructura, más que por las propias características técnicas de los vehículos. Desde luego existen otras limitaciones, unas asociadas a la infraestructura (acuerdos verticales, estado de la vía, catenaria o señalización) y otras ligadas al material (dinámica del tren o capacidad de frenado).

Sin embargo, puede afirmarse que uno de los elementos que mayor influencia tiene sobre la velocidad máxima es el radio de curva. En el Anejo 4, que se incluye en esta tesis, se demuestra detalladamente la influencia del radio de curva en la velocidad máxima de los trenes.

Es clara la influencia del radio de curva en la velocidad máxima de los trenes, pero no menos clara su efecto en la longitud de una línea ferroviaria, cuestión que se tratará en el siguiente apartado.

3.3.2.1.1 La velocidad y su influencia en la longitud de las líneas: coeficiente de trayectoria

La "sinuosidad" de las líneas ferroviarias vine condicionada por el radio de curva máximo que presenta la infraestructura y, como se ha demostrado en el Anejo 4, el radio también afecta a la velocidad máxima del trazado. Por ello, puede afirmarse que a mayor velocidad menos sinuosa será la línea (más recta) y, por lo tanto, existirá menor distancia entre origen y destino, lo que afectará al coste final de la infraestructura.

Las líneas convencionales (que en la mayoría de los casos bordean las montañas o las dificultades orográficas) presentan unos radios de curva pequeños, limitándose la velocidad máxima de circulación e incrementándose así la longitud entre origen y destino con respeto a líneas de alta velocidad; las cuales buscan radios de curva más amplios para incrementar la velocidad máxima, lo que conlleva, generalmente, la construcción de túneles y viaductos de mayor longitud.

Se han tratado dos temas diferentes pero relacionados entre sí. El primero se basa en la relación entre la velocidad máxima y la sinuosidad de una línea férrea, y el segundo la relación entre la "sinuosidad" y longitud.

Ambos efectos se recogen en la siguiente expresión (3. 28):

$$L_{linea} = L_{Recta} \times Coef\left(\frac{L_{Real}}{L_{Recta}}\right) \qquad (3.\ 28)$$

Donde:

- $Coef\left(\frac{L_{real}}{L_{recta}}\right)$: coeficiente de trayectoria, relaciona la longitud real de una infraestructura entre dos puntos y su longitud "ortodrómica" o en línea recta.
- L_{Recta}*: Longitud en línea recta entre dos puntos (km).*

El parámetro coeficiente de trayectoria indica el incremento de longitud entre dos núcleos (ciudades, estaciones) con respecto a la longitud de una línea completamente recta. La pregunta que surge es la siguiente: ¿qué parámetros recoge el coeficiente de trayectoria?

Para responder a esta cuestión se han escogido una serie de líneas o tramos de la red ferroviaria española, mayoritariamente tramos montañosos, con diferentes velocidades máximas de diseño.

No se incluyen en la muestra líneas completas (rutas completas) de la red ferroviaria, sino más bien tramos de corta o media distancia. Una de las características intrínsecas del ferrocarril es dar servicio al mayor número de poblaciones posibles, esto suponen en muchos casos el trazado no sea ni mucho menos el óptimo. La obligación asociada a este modo de transporte que consiste en prestar servicio a gran parte de la sociedad, hace que en muchos casos el trazado de la línea se aleje del aquel que posiblemente sería el óptimo en términos económicos.

A continuación se muestra para cada línea o tramo los parámetros obtenidos (Tabla 58). Para cada línea seleccionada se toman los valores de velocidad máxima de diseño y se calcula su coeficiente de trayectoria, como relación entre la longitud real y la longitud en línea recta (longitud obtenida mediante Google Earth).

Tabla 58. Tramos o líneas representativas y su diferencia entre la línea real y la línea recta.

Líneas	Tramos de la línea	Velocidad de diseño Infra.	Longitud real *(km)*	Longitud linea recta	Coeficiente curvas
Villalba-Segovia AV	*Paso LAV Madrid-Segovia (Tramo Villalba-Segovia)*	500	45	44,5	1,01
León-Asturias	*LAV León-Asturias (Tramo La Robla-Pola de Lena)*	350	46,7	44,6	1,05
Madrid-Barcelona	*LAV (Tramo Guadalajara-Ricla)*	350	186,7	175	1,07
Orense-Santiago	*LAV (Orense-Santiago)*	350	82,06	79,84	1,03
Madrid-Alicante	*LAV (Bif Albacete-Albacete)*	345	73	70	1,05
Córdoba-Málaga	*LAV (Bif Málaga-Santaella)*	343	34,7	32,8	1,06
Córdoba-Málaga	*LAV (Santaella-Los Prados AV)*	330	115,4	105,80	1,09
Madrid-Valencia	*LAV (bif torrejón de Velasco-Cuenca)*	320	160,7	141,23	1,14
Madrid-Valencia	*LAV (Cuenca-Chiva)*	300	178,4	154,2	1,16
Madrid-Sevilla	*LAV (Tramo Córdoba-Majarabique)*	250	116,8	109	1,07
Madrid-Sevilla	*LAV (Tramo Brazatorta-Córdoba)*	240	118,2	101,5	1,16
La Encina-Valencia	*(La Encina-Xátiva)*	220	48,4	42,7	1,13
La Encina-Valencia	*(Xátiva-Valencia)*	160	62,9	57	1,10
Camireal-Zaragoza	*(Tramo Camireal-bifTeruel)*	150	112,8	92,65	1,22
Zaragoza-Lleida-Manresa-Bcn	*(Tramo Lleida Pirineus-Sabadell Sur)*	140	162,2	123,24	1,32
Zaragoza-Lleida-Manresa-Bcn	*(Tramo Zaragoza- Lleida Pirineus)*	140	179,3	124,31	1,44
Madrid-Barcelona	*(Tramo Ricla-Zaragoza)*	140	59	44,58	1,32
Palencia-A Coruña	*(Tramo Palencia-Astorga)*	140	174,4	134,25	1,30
Madrid-Hendaya	*(Tramo Quintanilleja-Altsasua)*	140	175,7	145,5	1,21
Lleida-Tarragona	*(Tramo Lleida-Reus)*	135	89,5	64,33	1,39
Tarragona-Barcelona	*(Tramo San Vicent del Calders-Cornellá)*	130	68,4	50,1	1,37
Medina-Zamora	*(Tramo Medina del Campo-Zamora)*	130	89,7	72,76	1,23
Madrid-Burgos	*(Tramo Turbuelo-Bif Aranda)*	130	145,4	112,38	1,29
Cordoba- Málaga	*(Tramo Aguilar de la Frontera-Las Mellizas)*	130	92,7	72,48	1,28
Madrid-Burgos	*Paso Somosierra (Tramo Manzanares-Turrbuelo)*	120	99	73,1	1,35
Madrid-Barcelona	*(Tramo Zaida Sástago-Mora la Nova)*	105	130,6	95,4	1,37
Linares-Almería	*(Tramo Cazorla-Fonelas)*	105	184,7	147,6	1,25
Venta de Baños-Santander	*Puerto Pozazal (Tramo Aguilar de Campoo-Boó)*	100	112,3	72,6	1,55
Monforte de Lemos-Vigo	*(Tramo Orense-Vigo)*	100	131,7	70,36	1,87
Madrid-Barcelona	*(Tramo Mora La Nova-Reus)*	100	48,1	37,98	1,27
Zamora-A Coruña	*Alto del Padornelo (Tramo Pedralba-Paderne/Cantoña)*	100	110,7	91,1	1,22
Redondela-Santiago	*(Tramo Redondela-Santiago)*	95	92	65,22	1,41
Monforte-Vigo	*(Tramo Monforte-Orense)*	95	46,1	36,31	1,27
Castejón-Bilbao	*Rampa de Orduña (Tramo Miranda-Miravalles)*	90	90	54,4	1,65
Villalba-Segovia	*Paso de Tablada (Tramo Villalba-Segovia)*	90	62,7	37,7	1,66
Bobadilla-Algeciras	*Cordilleras Béticas (Tramo Teba-San Pablo)*	90	104	62,3	1,67
Orense-Santiago	*Convencional*	90	129,6	79,84	1,62
Palencia-A Coruña	*Puerto del Manzanal (Tramo Astorga-Ponferrada)*	90	76,6	51,6	1,48
León-Gijón	*Rampa de Pajares (Tramo La Robla-Pola de Lena)*	75	83,1	42,67	1,95

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que, mayoritariamente, a medida que disminuye la velocidad de diseño de la infraestructura, el coeficiente de trayectoria se incrementa. Es decir, la diferencia entre la longitud de la línea real y la longitud en línea recta es cada vez mayor, corroborando lo expuesto anteriormente. Esta tendencia se observa mejor gráficamente (Figura 58).

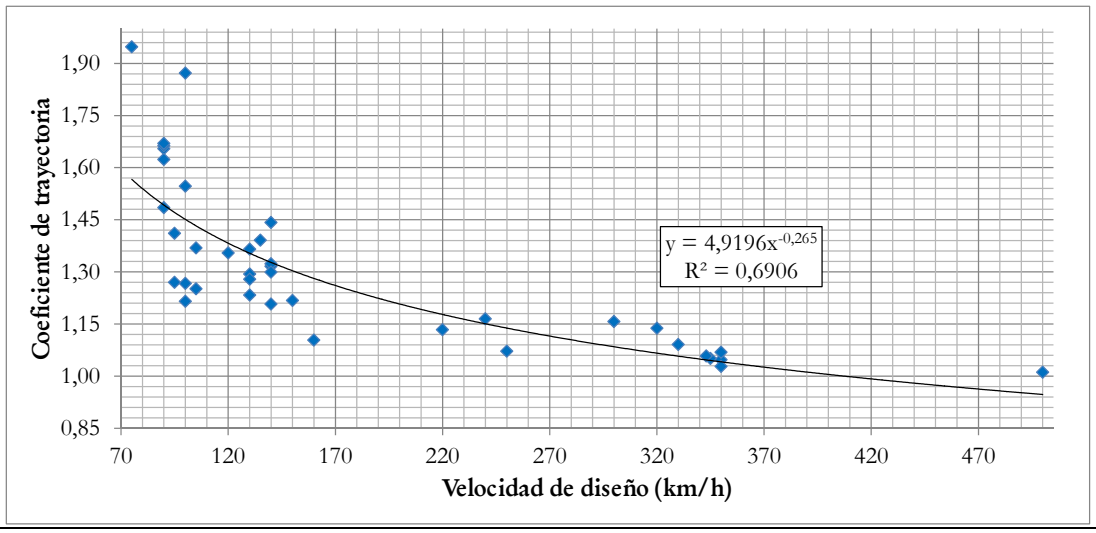


Figura 58. Relación entre la velocidad de diseño de la infraestructura y el coeficiente de trayectoria.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la gráfica anterior (Figura 58), se obtiene la expresión que permite calcular este coeficiente.

$$Coef\left(\frac{L_{Real}}{L_{Recta}}\right) = 4{,}9196 \times V_{diseño}^{-0{,}265} \; \forall V_{diseño} \in [70, 350] \qquad (3.\ 29)$$

Donde:

- $V_{diseño}$: corresponde a la velocidad máxima de diseño de la infraestructura (km/h).

Esta ecuación es válida hasta 350km/h, a partir de este valor la diferencia entre la longitud en línea recta y la longitud real es prácticamente nula. Véase el ejemplo de la línea de alta velocidad Madrid-Segovia (trazado planificado para 500km/h) que recoge valores de 1,01.

Utilizando esta metodología puede determinarse, aproximadamente la longitud que tendrá la infraestructura antes de que ésta se construya. Por ejemplo, suponiendo que no existe línea ferroviaria entre Orense y Santiago de Compostela y conocida la longitud en línea recta entre las estaciones de ambas ciudades (79,84 kilómetros), la longitud real de la línea si ésta fuese de alta velocidad (por ejemplo, para 350km/h), si se construyese para 200km/h o si se construyese para 90km/h, es la siguiente:

Orense-Santiago:

- (350km/h) → $L_{real} = L_{recta} \times Coef\left(\frac{L_{real}}{L_{recta}}\right) = 79{,}84 \times 4{,}9196 \times 350^{-0{,}265} = 83{,}1\,km$
- (200km/h) → $L_{real} = L_{recta} \times Coef\left(\frac{L_{real}}{L_{recta}}\right) = 79{,}84 \times 4{,}9196 \times 200^{-0{,}265} = 96{,}4\,km$
- (90km/h) → $L_{real} = L_{recta} \times Coef\left(\frac{L_{real}}{L_{recta}}\right) = 79{,}84 \times 4{,}9196 \times 90^{-0{,}265} = 119{,}1\,km$

Actualmente existe entre estas dos ciudades una línea de alta velocidad y una línea convencional. La distancia real de la línea de alta velocidad construida para una velocidad máxima de 350km/h es de 82,06 kilómetros, obsérvese que la diferencia con la distancia calculada es aproximadamente del 1%, en este caso la fórmula se ajusta muy bien a la realidad. Para el caso de la línea convencional la distancia real es de 129,6 kilómetros. La diferencia, en este caso, es algo mayor, aunque no llega al 9%.

3.3.2.2 Definición de tipo de terreno y su clasificación

Una clasificación relevante de los diferentes tipos de terreno y su relación con el coste es la realizada por el Adif en el documento de *"Principales ratios de costes/km"* de 2008, que clasifica el tipo de orografía, no por el gradiente que tiene o que tendrá la infraestructura ferroviaria, sino por la cantidad y tipo de obra ejecutada. Por ejemplo, se afirma que: *"(…) un terreno llano es aquel que sólo necesita obras de tierra, pasos de drenaje y, en alguna ocasión, algún paso superior"*. En el caso del terreno semillano se especifica que: *"(…) obras de tierra, pasos de drenaje, pasos superiores y algunos viaductos de pequeño porte"* y, por último, para el caso de terreno accidentado se expone que: "*(…) obras de tierra, pasos superiores, viaductos y túneles (doble vía y/o bitubos con galerías de conexión)".*

Es interesante la relación que establecen entre el tipo de terreno, la obra necesaria y los costes, sin embargo, no se diferencia entre la cantidad de obra requerida en un tipo de terreno u otro o dentro del mismo relieve, es decir, se afirma que en zonas montañosas son necesarios túneles, pero, ¿la infraestructura cuesta lo mismo si se construye el 20% de la línea en túnel que si se construye el 80%?

Otra posible clasificación del terreno podría realizarse mediante determinación de la rampa característica[17]. Se entiende que, cuanto mayor es la pendiente característica, más accidentado será el terreno. Este método es válido para diferenciar casos extremos, como por ejemplo entre terrenos suaves y montañosos. Por ejemplo, la rampa característica de la línea León-Gijón (rampa de Pajares) es de 23‰ y, por tanto, puede ser considerada como muy montañosa; en cambio el tramo Medina-Zamora tiene una pendiente característica de 10‰.

El problema aparece cuando es necesario diferenciar entre una línea semillana y una montañosa o entre una montañosa y una muy montañosa. Por ejemplo, ¿es igual de montañosa una línea como París-Lyon con rampas de 35‰ y aproximadamente un 1% del recorrido en túnel, que una línea como Madrid-Segovia con rampas de 26‰ pero con un 84,73% de longitud bajo túnel? Si se centra el análisis en la rampa máxima de la infraestructura, se podría afirmar que la línea París-Lyon es una línea "más" montañosa que Madrid-Segovia, pero si se presta atención al porcentaje de túnel sobre la longitud total de la línea se observa que la línea de alta velocidad Madrid-Segovia necesita un gran número de kilómetros de túnel para vencer las elevadas pendientes que existen en la orografía. Orografía que es capaz de superar la infraestructura ferroviaria de Paris-Lyon con rampas de 35‰. Por ello, puede afirmarse que en líneas con relieves accidentados los porcentajes de obra serán mayores que en líneas con relieves suaves.

Teniendo en cuenta que no existe una definición clara del tipo de relieve de una infraestructura ferroviaria y que las clasificaciones existentes pueden causar confusión, se procede a elaborar una clasificación que englobe todas las posibles casuísticas.

El proceso seguido consiste, en una primera fase, en el análisis de la orografía del terreno con la que se puede encontrar una infraestructura. Para ello, se utiliza un mapa de elevaciones del terreno que contiene la altitud de diferentes países de la Unión Europea y del Norte de África. En este proceso se emplean modelos digitales del

17 Rampa característica es el valor empleado para el cálculo de las cargas máximas y por lo tanto se considera el valor de rampa más restrictivo de todo el trayecto. Se calcula teniendo en cuenta el valor de las rampas máximas, pero también otros condicionantes como los radios de curva existentes en la rampa, la pérdida de velocidad en la misma, posibilidad de asegurar el arranque y la posibilidad de dañar el material motor por sobreesfuerzos.

terreno[18] (MDT´s) procedentes del STRM (Shuttle Radar Topography Missión) en los que se obtiene una importante base de datos topográficos.

Posteriormente, estos datos serán tratados con un programa de GIS[19] que permite su correcta visualización (véase Figura 59). Se ha creado con una gama de colores que van de blancos a negros en función de su elevación, así pues, gradientes más bajos (zonas llanas) se asocian a colores más blancos y gradientes mayores (zonas montañosas) a colores más oscuros.

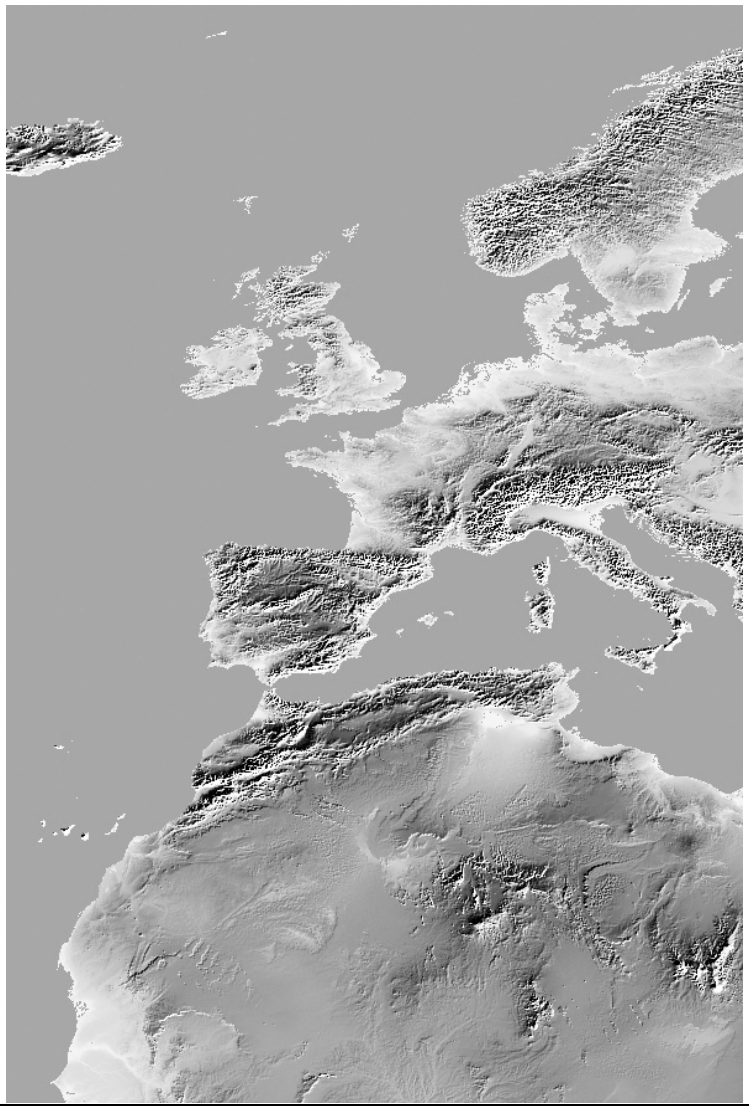


Figura 59. Mapa de pendientes medias de Europa y Norte de África.

Fuente: Elaboración propia con mapas de STRM de NASA.

Resulta obvio afirmar que España presenta un relieve muy accidentado sólo comparable con Suiza o con el Norte de África. La unión del centro de España con la periferia

18 MDT, conjunto de datos numéricos almacenados digitalmente que describen la distribución espacial de una característica del territorio. Se construyen a partir de los MDE. A diferencia de los MDT, los MDE, son una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno.

19 GIS: Geographic Information System.

supondrá atravesar elevadas cordilleras, problema al que no se enfrentan, por ejemplo, en el suroeste de Francia o en el sur de Gran Bretaña (véase Figura 60).

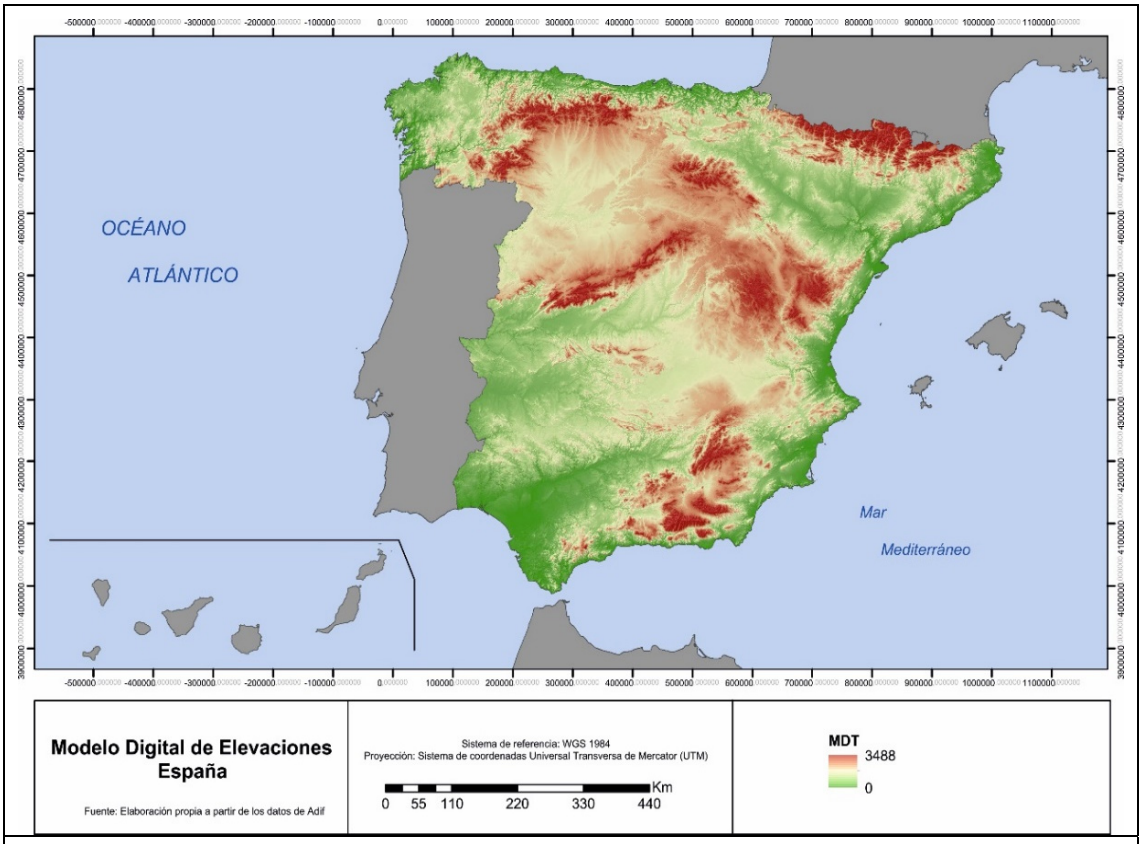


Figura 60. Modelo digital del terreno: Mapa de altitudes España.

Fuente: Elaboración propia.

Estos mapas de elevación del terreno permiten distinguir, a simple vista, las diferentes zonas según "complejidad". Pero a la hora de asignar una clasificación determinada para cada tipo de terreno que muestre, a su vez, una relación con la infraestructura ferroviaria, los mapas de pendientes medias son más útiles que los mapas de altitudes, básicamente por dos razones: (i) definen la orografía del terreno al igual que hace la altitud y (ii) presentan una estrecha relación con las pendientes del ferrocarril.

Se puede afirmar que la pendiente media del terreno es un parámetro ampliamente utilizado para la clasificación de las infraestructuras ferroviarias, de hecho estudios como (Atkins, 2002) definen y clasifican la orografía en función de las pendientes medias del terreno. La clasificación realizada en este estudio es la siguiente:

- Terreno suave: gradiente< 3%.
- Terreno montañoso: 3%< gradiente <10%.
- Terreno muy montañoso: gradiente >10%.

Observando esta clasificación y atendiendo a los modelos digitales del terreno creados por el IGN (Instituto Geográfico Nacional), la clasificación del tipo de terreno según pendientes medias puede adquirir un mayor grado de definición y quedar de la siguiente forma:

- Terreno suave: 0%< gradiente< 2,5%.
- Terreno semillano: 2,5%< gradiente< 10%
- Terreno montañoso: 10%< gradiente< 20%
- Terreno muy accidentado: gradiente>20%

Centrándose en España, uno de los escenarios más desfavorables en cuanto a relieve, como se refleja en Figura 59, es posible crear un mapa de pendientes que refleje, según

la clasificación anterior, las diferencias orográficas y poder así determinar aquellos terrenos que son más complejos para la construcción de una infraestructura.

A partir del MDT de altitudes se ha realizado el mapa de pendientes de la España peninsular (Figura 61) utilizando un Sistemas de Información Geográfica (GIS):

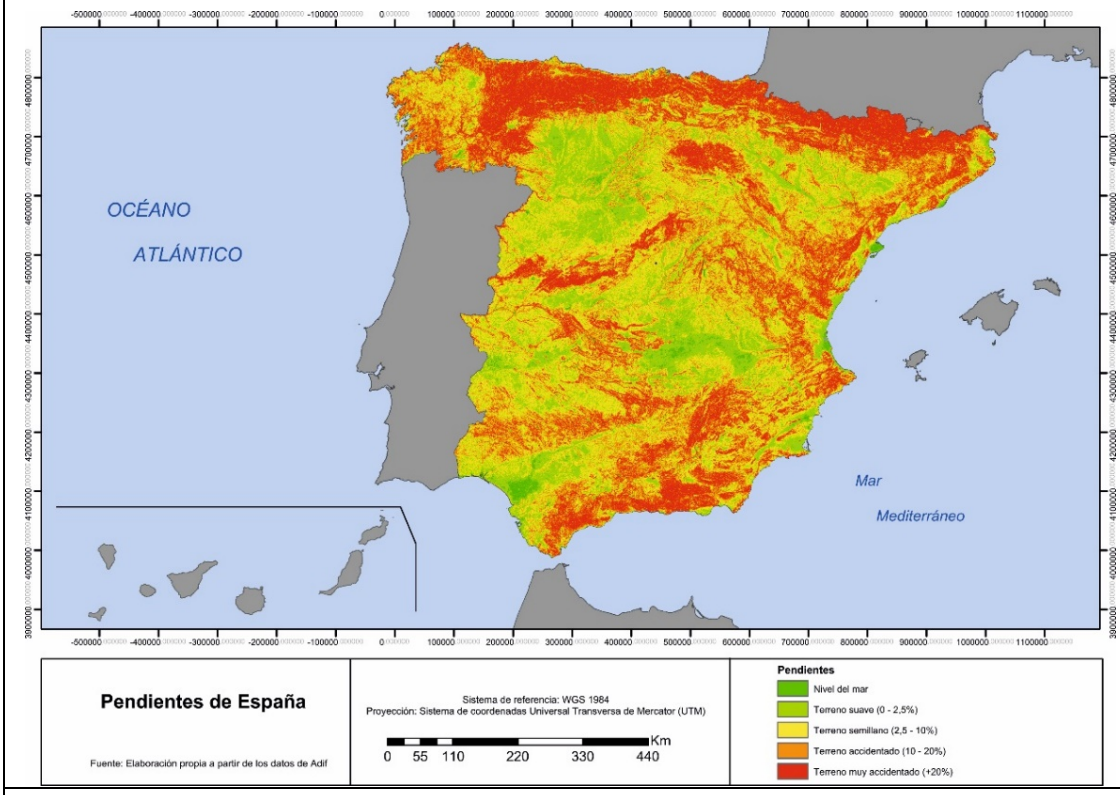


Figura 61. Modelo digital del terreno: Mapa de pendientes (derecha) de la península ibérica.

Fuente: Elaboración propia.

En el mapa resultante se pueden diferenciar tres gradientes diferentes en función de la pendiente media de terreno en la que, claramente, se pueden distinguir tres conjuntos morfo-estructurales: (i) una gran meseta central rodeada y circundada por cadenas montañosas, (ii) una serie de cordilleras próximas a la costa y (iii) dos grandes depresiones, una localizada en el extremo suroeste (depresión del Guadalquivir) y otra en el cuadrante noreste (depresión del Ebro).

Este sistema orográfico determina un escenario de pendientes extremas en diferentes puntos del territorio que, unido a la configuración centralizada de la red ferroviaria española, en la que la mayor parte de las líneas parten de Madrid (capital europea situada a mayor altura sobre el nivel del mar) y se dirigen a las principales ciudades periféricas situadas a nivel del mar, marcan un difícil escenario de planificación de red.

La construcción en distintos relieves de una misma infraestructura ferroviaria, no presentará las mismas características de trazado, ni por supuesto la misma cantidad de obra construida y, por lo tanto, no supondrá el mismo coste si se trata de un relieve u otro. Se entiende que construir una infraestructura que atraviese el sistema pirenaico, que presenta pendientes medias superiores al 20%, precisará gran cantidad de túneles y de viaductos, lo que supondrá un coste muy elevado. En contraposición se encuentra la meseta septentrional, con grandes llanuras con bajos gradientes (entre 0 y 2,5%).

La pregunta que surge ahora es la siguiente: ¿Es posible encontrar una relación entre la cantidad de túneles, viaductos y movimientos de tierra y el tipo de terreno identificado?

La respuesta a esta pregunta la resolveremos en la sección 3.3.2.2 de este mismo capítulo, pues la velocidad máxima de diseño de la infraestructura influye en la cantidad de obra a construir.

Tras analizar y definir los diferentes tipos de terrenos y el efecto de la velocidad máxima en la longitud de una infraestructura ferroviaria, se procede al análisis y estudio de los diferentes costes de inversión, siguiendo la ecuación que permite su estimación (ecuación (3. 26)).

3.3.2.3 Costes de inversión y de mantenimiento de la subestructura

Con el objetivo de definir y estimar el coste de los diferentes elementos que forman la subestructura, este apartado se dividirá también en dos bloques:

1. Determinación de los costes de plataforma, capa de forma y drenaje. En este apartado se expondrá la metodología aplicada y se definirán los diferentes parámetros que afectan al coste, mostrándose precios unitarios de cada uno de ellos.
2. Efecto de la velocidad máxima de diseño en los costes de inversión de la subestructura. Esta sección se dividirá en diferentes apartados, en cada uno de ellos se expondrá y cuantificará el efecto de la velocidad en los costes de los diferentes elementos de la subestructura.

3.3.2.3.1 Estimación de los costes de plataforma

La plataforma es la parte más profunda de la infraestructura y la que soporta, en último término, todos los esfuerzos derivados de la circulación de los trenes. En resumen, es el elemento portante sobre el que descansa o se cimenta la superestructura (Escolano Paul, 1998).

En una clasificación general puede afirmarse que las vías férreas pueden ir directamente sobre suelo (trincheras o terraplenes), sobre puentes y viaductos o atravesar las dificultades orográficas mediante túneles. Atendiendo a esta clasificación simplificada, puede afirmarse que los costes de plataforma muestran una estrecha relación con el tipo de obra construida; es decir, están claramente relacionados con el porcentaje de la línea que discurre en túnel, puente y/o viaducto.

Una primera aproximación a esta relación coste-porcentaje de obra se encuentra en (CENIT, 2008). En este estudio se muestra gráficamente (véase Figura 62) la influencia del tipo de obra construida sobre los costes finales de inversión.

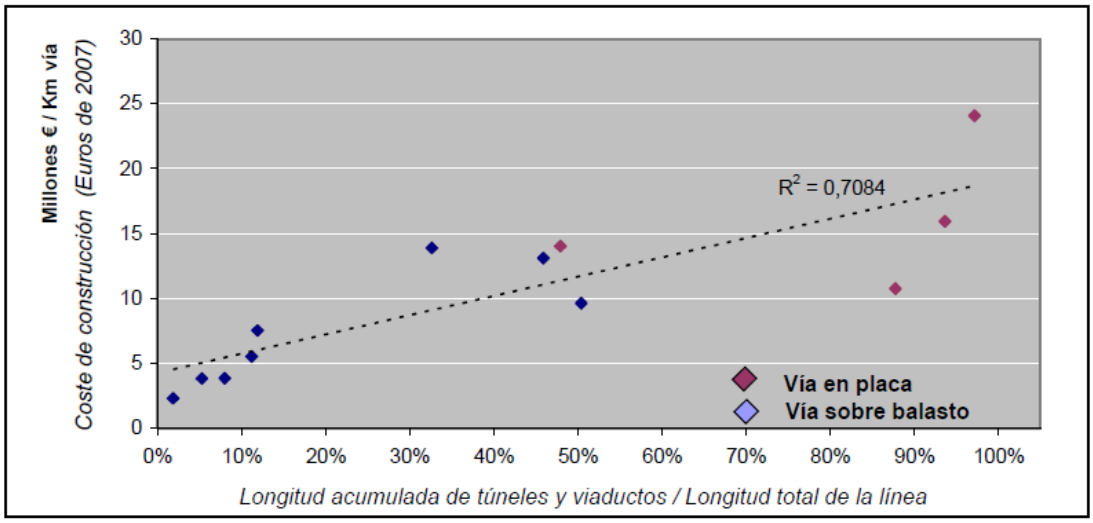


Figura 62. Relación entre el coste de construcción y la presencia de túneles y viaductos en líneas de alta velocidad.

Fuente: (CENIT, 2008).

Dejando a un lado cualquier otro condicionante con influencia en los costes (costes de plataforma en este caso), como puede ser el contexto económico y político del país, la formación del personal laboral, impacto medioambiental, etc. basaremos la metodología desarrollada en esta tesis en la búsqueda de un modelo "bottom-up" que se base en la relación coste-tipo de obra.

Empleando como base los estudios (Kang, Jha, & Buddharaju, 2012) o (Goh, Chew, & Fwa, 1988), los costes de inversión en la infraestructura pueden estimarse a partir de la formulación que se muestra a continuación (3. 30):

$$C_p = U_l \times L_{línea} = (\alpha \times U_{M.Tierras} + \beta \times U_{Tunel} + \lambda \times U_{estructuras}) \times L_{línea} \quad (3.\ 30)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{n_{Mov.t}} l_{i,M.Tierras}}{L_{Linea}} \times 100 \quad (3.\ 31)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} l_{i,Tunel}}{L_{Linea}} \times 100 \quad (3.\ 32)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^{n_v} l_{i,estructuras}}{L_{Linea}} \times 100 \quad (3.\ 33)$$

Donde:

- *C_p: coste de plataforma en función de la longitud de la línea y del relieve (M€).*
- *U_l : coste total por kilómetro de línea (M€/km).*
- *$L_{línea}$: longitud total de la línea (km).*
- *$L_{i,M.Tierra}$, $L_{i,túnel}$, $L_{i,estructura}$: longitud de la línea construida (movimiento de tierras, túneles y viaductos) (km).*
- *$U_{M.Tierra}$, $U_{túnel}$, $U_{estructuras}$: principales ratios de costes medios por kilómetro de movimiento de tierras, túneles y estructuras (pasos inferiores, pasos superiores, pérgolas, viaductos y grandes viaductos) (M€/km).*
- *"i"; $n_{Mov.t}$, n_t, n_v: cada una de las zonas por las que atraviesa la infraestructura (movimiento de tierras, túneles y viaductos).*
- **□**, **□**, **□**: porcentajes de movimiento de tierras, túneles y viaductos respectivamente en función de la longitud total de la línea.

El modelo planteado se trata de un modelo diferencial (ecuación (3. 30)), en el que se toma como referencia una plataforma con unas características determinadas (escenario base) para determinar posteriormente el coste de inversión. Una vez determinado el coste de este escenario base, se procede a estimar el coste incurrido cuando se varía la velocidad máxima de diseño, pues se producirá variaciones en él, ya que cambios en la velocidad supondrán cambios en las características de la plataforma (mayor o menor anchura, mayor o menor distancia entre eje, etc.).

El escenario base se compone de una plataforma de ancho de 14 metros a los que se les añaden aproximadamente 2 metros por cada lado para la capa de forma y subbalasto (véase Figura 63). Se considera ancho de vía estándar (1.435mm), vía doble y distancia entre ejes de 4,7 metros que según la ETI de Infraestructura[20] es la distancia mínima para velocidades superiores de 300km/h. Además, la ecuación que permite la estimación de costes se asocia a una rampa máxima de 25‰ para casos normales.

20 Directiva 96/48-Interoperabilidad del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad. Especificación Técnica de Interoperabilidad. Subsistema de infraestructura con fecha 2008.

Teniendo en cuenta estas características, como se ha mencionado, en primer lugar, se determina el coste unitario de cada tipo de obra para la construcción de la plataforma, capa de forma y subbalasto y, posteriormente, se procede con el estudio de la influencia de la velocidad máxima sobre los diferentes parámetros de referencia de la plataforma (escenario base).

Explanación o movimientos de tierras

La explanación corresponde a la obra que trata de modificar o adecuar el terreno natural para poder establecer sobre este la plataforma en la que se asentará la vía. Uno de los grandes problemas que surgió con la construcción de las primeras líneas de alta velocidad fue decidir la altura máxima permitida en la construcción de terraplenes y desmontes, y a partir de la cual, sería más conveniente sustituirlos por viaductos y túneles, respectivamente.

En líneas como París-Lyon la decisión fue tomar un criterio único, tanto para terraplenes como para desmontes, que establecía la altura máxima de este tipo de obras (terraplenes o desmonte) en aproximadamente 35 metros. Esta decisión puede condicionar mucho el volumen de tierra a mover y, por supuesto, los costes derivados.

De forma resumida, el tipo de explanación se puede clasificar en:

- **Desmonte** es la parte de obra de ingeniería civil que consiste en la excavación de tierra de una determinada zona con el fin de bajar la rasante del terreno y, por lo tanto, bajar la cota de este para crear un plano de apoyo en el que se pueda asentar la infraestructura.
  Los precios previstos para las unidades de excavación según base de precios 2011 elaborada por Adif son los siguientes (Tabla 59):

Tabla 59. Precios por m^3 para las diferentes unidades de excavación (año 2011).

Movimiento de tierras		Precio
Excavación de tierra vegetal	€/m^3	1,74
Excavación con medios mecánicos, sin explosivos	€/m^3	1,52
Excavación con ayuda local de explosivos y ripado	€/m^3	2,10
Excavación con sistemas de voladura	€/m^3	4,34
Excavación en vaciado en cualquier tipo de terreno a cielo abierto entre pantallas	€/m^3	3,82
Excavación en vaciado entre pantallas en cualquier tipo de terreno en zonas cubiertas	€/m^3	6,88
Excavación en vaciado o saneo	€/m^3	1,92
Excavación para formación de escalonado en cimientos de terraplén con medios mecánicos	€/m^3	3,63
Excavación suplementarios en retaluzado son explosivos	€/m^3	2,61
Excavación suplementaria en retaluzado con explosivos	€/m^3	13,91
Excavación en zanjas, pozos, cimientos por medios mecánicos	€/m^3	10,01
Excavación zanjas, pozos, cimientos con empleo de explosivos	€/m^3	11,71
Excavación manual, pozos y cimientos	€/m^3	67,86
Excavación en formación de cuneta por medios mecánicos	€/m^3	12,20
Regularización fondo desmonte en roca	€/m^3	7,12

Nota: La unidad de excavación aquí tratada, incluye carga y transporte del material al lugar de empleo o vertedero, así como la formación de este último. También quedan incluidas en esta unidad todas las operaciones previas a la excavación, como demoliciones, despeje y desbroce del terreno, precorte en roca…etc., así como el posterior refino de taludes. Estos precios no sólo contemplan los costes de obra, sino también la mano de obra, los materiales utilizados (dinamita en caso de voladura…) y la maquinaria y medios auxiliares (equipo de perforación, pala cargadora, camión…).

Fuente: Elaboración propia con datos de Adif.

Al no disponer de antemano de la información relativa al tipo de excavación que será necesario llevar a cabo en cada tramo, se toma un valor medio aproximado de coste (10,09€/m^3). En cualquier caso, si en el cálculo del coste de la plataforma se dispusiera de la información suficiente para conocer el tipo de excavación que es necesario realizar en cada tramo de la línea, se aplicarían los precios unitarios aquí expuestos (Tabla 59).

- **Terraplén**- En ingeniería civil se define terraplén como el volumen de tierras utilizado para rellenar una determinada zona, permitiendo así elevar su rasante y, por lo tanto, su cota. Este tipo de obra, al igual que ocurre con el desmonte, tiene la función de crear un plano de apoyo en el que se asiente la infraestructura. El precio previsto para la unidad de terraplén, según base de precios 2011 elaborada por Adif, es el siguiente (Tabla 60):

Tabla 60. Precios por m^3 para las diferentes unidades de terraplén (año 2011).

Movimiento de tierras		Precio
Terraplén o pedraplén con materiales procedentes de la excavación	€/m^3	1,04
Terraplén o pedraplén con materiales procedentes de préstamos	€/m^3	3,66
Terraplén en formación de caballón con material procedente de excavación	€/m^3	0,81

Fuente: Elaboración propia con datos de Adif.

Al igual que ocurre con la excavación de los desmontes, al no conocer de antemano qué tipo de obra va a ser necesaria, se considera para los cálculos un precio medio de 1,83€/m^3.

Los precios adoptados para las unidades de excavación y de terraplén son valores calculados por m^3 (volumen de tierra). El coste unitario del movimiento de tierras depende del volumen que se mueva, ya sea para la construcción de trincheras (desmontes) o de terraplenes, y esto dependerá de la línea, del relieve y de la altura máxima permitida para ambos, por lo que será diferente en cada caso (cada infraestructura).

Tras la recopilación de datos de proyectos y estudios informativos de diferentes líneas ferroviarias en el entorno europeo y su posterior procesamiento (véase Anejo 7) se obtiene una gran muestra de la que se pueden determinar diferentes indicadores que sirven como modelo o base. En este caso, es necesario determinar un valor medio de volumen de tierra (m^3) tanto para el caso de trincheras como el de desmonte, que pueda servir de referencia para este estudio. Para ello se obtiene, de la muestra recopilada (Anejo 7), un valor medio de volumen de tierra por kilómetro de línea (m^3/km) que servirá, posteriormente, para determinar el coste unitario por kilómetro de línea.

De la muestra analizada se obtiene que:

- Volumen medio movido de desmonte por kilómetro = 111.009,54 m^3/km.
- Volumen medio movido de terraplén por kilómetro = 105.241,62 m^3/km.

A partir de estos costes y de los precios medios calculados anteriormente, es posible determinar el coste unitario por kilómetro (año 2011):

- Trinchera: 111.009,54 m^3/km x 10,09 €/m^3 = 1,12 M€/km.
- Terraplén: 105.241,62 m^3/km x 1,83 €/m^3 = 0,193 M€/km.

Costes de mantenimiento de la explanación o movimiento de tierras

Como se ha expuesto anteriormente, los costes de mantenimiento pueden ser cuantificados como un porcentaje de los costes de inversión. En cuanto al coste anual atribuible al mantenimiento de los terraplenes y desmontes, (Baumgartner. J.P, 2001)

afirma que suponen un 0.5% de sus costes de construcción. Este porcentaje será el empleado en esta tesis para la estimación de los costes anuales de mantenimiento de terraplenes y desmontes.

Estructuras

Se denominan obras de fábrica o estructuras a aquellas obras que se realizan para salvar los obstáculos naturales del terreno. Se pueden citar las siguientes estructuras: viaductos, puentes, pasos a distinto nivel, pasos a nivel y túneles.

Los condicionantes físicos del territorio (características orográficas y geológicas, núcleos urbanos e infraestructuras existentes), y aquellas características que son intrínsecas del ferrocarril, llevan a la construcción de estructuras. La necesidad de crear una red ferroviaria eficiente obliga al estudio detallado de todas las posibles alternativas de trazado, siendo el equilibrio entre el coste que supone este tipo de obras y el valor que aportan a la explotación ferroviaria una cuestión básica y primordial.

En muchos casos prevalecerá el valor que aportan a la operación ferroviaria (por ejemplo, el tiempo de viaje, reducción de la longitud de la línea, …) pero en otros, el alto coste económico que supone su construcción influirá negativamente en la decisión.

Viaductos, puentes y pasos superiores

A continuación se muestra los precios resultantes relacionados con la construcción de este tipo de estructuras (Tabla 61). Estos costes han sido obtenidos de dos fuentes diferentes y actualizados a 2011:

- Estudio Informativo de la línea Burgos-Victoria y
- "Principales ratios de coste/km" año 2007, informe desarrollado por Adif (Adif, 2007).

Tabla 61. Precio por kilómetro de las diferentes estructuras (año 2011).

Estructuras	Precio
Paso superior convencional 8 metros ancho plataforma	4 M€/km.
Paso superior convencional 11 metros ancho plataforma	4,9 M€/km.
Paso superior convencional 13 metros ancho plataforma	5,8 M€/km.
Paso inferior convencional 7 metros ancho plataforma	6,4 M€/km.
Paso inferior convencional 10 metros ancho plataforma	7,4 M€/km.
Paso inferior convencional 13 metros ancho plataforma	8,5 M€/km.
Pérgolas para ferrocarril	18,3 M€/km.
Viaducto de 25 metros de luz máxima	8,6 M€/km.
Viaducto de 32 metros de luz máxima	10 M€/km.
Viaducto de 40 metros de luz máxima	10 M€/km.
Viaducto de 110 metros de luz máxima	14 M€/km.
Viaducto de más de un kilómetro de longitud con pilas de más de 40 metros de altura con dovelas lanzadas desde uno de los estribos	25,87M€/km.

Fuente: Elaboración propia con datos de Adif y el estudio informativo Burgos-Victoria, actualizando los datos de costes al año 2011.

Se puede considerar un precio medio para cada una de las diferentes estructuras:

Tabla 62. Precios medios por kilómetro para diferentes estructuras (año 2011).

Estructuras	Precio	
Pasos superiores	4,9 M€/km	U_{ps}
Pasos inferiores	7,4 M€/km	U_{pi}
Pérgolas para ferrocarril	18,3M€/km	U_{per}
Viaductos	10,6M€/km	U_{via}
Viaductos de más de un kilómetro con pilares de más de 40 metros	25,87 M€/km	U_{viaG}

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, el precio unitario por kilómetro se puede estimar con la siguiente expresión (3. 34):

$$U_{estr} = \frac{n_{ps} \times U_{ps} + n_{pi} \times U_{pi} + n_{per} \times U_{per} + n_{via} \times U_{via} + n_{viaG} \times U_{viaG}}{n_{Tot.est}} \quad (3.\ 34)$$

Donde:

- n_{ps}, n_{pi}, n_{per}, n_{via}, n_{viaG}: número de pasos superiores, inferiores, pérgolas para el ferrocarril, viaductos y viaductos de gran tamaño (más de 1 km de longitud y más de 40 metros de altura), respectivamente, en el total de la línea.
- U_{ps}, U_{pi}, U_{per}, U_{via}, U_{viaG}: coste unitario de cada una de las estructuras (M€/km).
- $n_{Tot.est}$: número total de estructuras a lo largo de toda la infraestructura ferroviaria.

Túneles

Decidir si es conveniente construir un túnel en una determinada zona o simplemente cambiar el trazado depende, principalmente, del coste económico, coste que depende claramente del tipo de suelo a perforar y de las técnicas constructivas empleadas, por lo que cuantificarlo de forma general supone una tarea compleja que dependerá de muchos factores.

Una forma de abordar este tema es basándonos en datos existentes y reales. En este caso se emplearan los valores proporcionados por Adif (base de precios (Adif, 2007) actualizados a 2011). A continuación se muestra una tabla resumen (Tabla 63):

Tabla 63. Precio por kilómetro de túnel, actualizados año 2011.

Estructuras	Precio	
Túnel para doble vía (sin vía en placa)	31 M€/km	U_{tunel}
Túnel bitubo con galerías de conexión (sin vía en placa)	52 M€/km.	U_{bitubo}

Fuente: Elaboración propia con datos de Adif.

Al igual que en el caso de viaductos, puentes y pasos superiores, el precio unitario de los túneles se puede estimar con la siguiente expresión (3. 35):

$$U_{tunel} = \frac{n^{o}_{túnel} \times U_{túnelD} + n^{o}_{bitubo} \times U_{bitubo}}{n_{Tot.tun}} \quad (3.\ 35)$$

Donde:

- n_{tunel}, n_{bitubo}: número de túneles de doble vía y bitubo, respectivamente.
- U_{tunelD}, U_{bitubo}: coste unitario, por kilómetro, de túnel para vía doble y bitubo, respectivamente (M€/km).
- $n_{Tot.tum}$: número total de túneles a lo largo de toda la infraestructura ferroviaria.

Cabe destacar que los costes aquí expuestos corresponden con una sección trasversal de túnel de 100m^2 que permite circulaciones a velocidades de más de 300km/h.

Costes de mantenimiento de las estructuras

Al igual que en el caso anterior, el coste de mantenimiento de estas estructuras (túneles y viaductos) se puede calcular como un porcentaje de sus correspondientes costes de inversión. (Baumgartner. J.P, 2001), estima estos porcentajes y los determina según tipo de estructura, clasificándolos en muros, puentes de acero y puentes de hormigón, aportando los siguientes valores:

Tabla 64. Coste de mantenimiento de estructuras.

	Porcentaje %	
Walls	0,5	0,1 to 1,5
Steel Bridges	1,5	1 to 2
Concrete bridges	1	0,1 to 2

Fuente: (Baumgartner. J.P, 2001).

Atendiendo a lo expuesto por (Baumgartner. J.P., 2001), el valor empleado para estimar los costes de mantenimiento de túneles se encuentra en el intervalo entre 0,1% a 2%, aconsejando un valor medio de 0,5%, porcentaje que se empleará en esta tesis.

3.3.2.3.2 Capa de forma, subbalasto y drenaje

La plataforma debe quedar rematada por una capa de terminación (capa de forma) construida con un determinado material y provista de pendientes trasversales que faciliten la evacuación de aguas pluviales. Tiene como función principal repartir las cargas concentradas que recibe, amortiguar una parte de las vibraciones y asegurar un buen comportamiento de la vía en cuanto a rigidez y drenaje. Las características que rigen los requerimientos y los ensayos que deben llevarse a cabo se marcan en la normativa UIC-719-R[21].

En las vías de nueva construcción, sobre esta capa de forma se dispone una nueva capa, llamada subbalasto y que está formada por grava arenosa bien granulada. Las prescripciones para el subbalasto se marcan en la PGP-2004[22] o, al igual que la capa de forma, en la normativa ya mencionada en el párrafo anterior (UIC-719-R).

La medición de ambas capas se ha previsto por kilómetro de línea y su valoración se ha realizado teniendo en cuenta un ancho total de plataforma de 14 metros y un espesor de 0,60 metros para la capa de forma y de 0,30 metros para el subbalasto.

21 UIC-719-R: Earthworks and track bed construction for railway lines

22 PGP: Pliego de Prescripciones Técnicas tipo para los Proyectos de Plataforma.

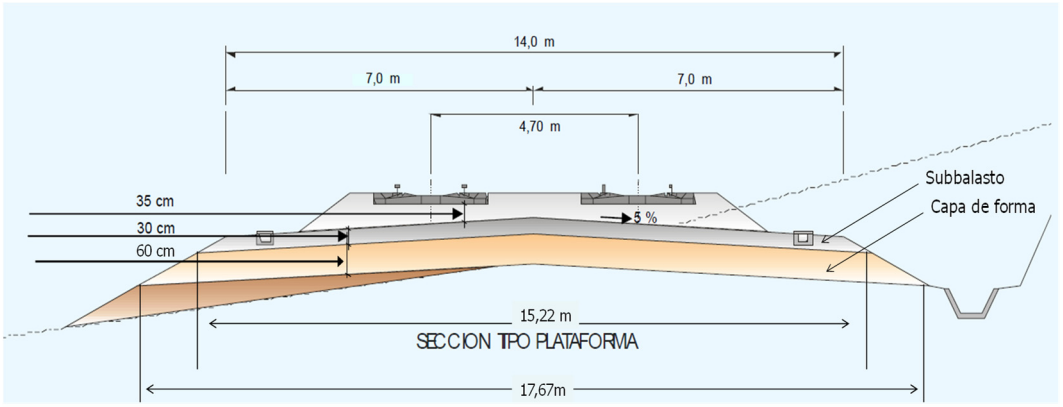


Figura 63. Sección tipo plataforma.

Coste de la capa de forma, subbalasto y drenaje

Para el establecimiento del precio correspondiente de la capa de forma y del subbalasto, se consideran unos precios básicos, obtenidos de la base de precios Adif 2011.

- Capa de forma……2,25€/m^3.
- Subbalasto……...12,69€/m^3.

De acuerdo a los precios y a los parámetros considerados de plataforma, se puede calcular el coste por kilómetro con la siguiente expresión (3. 36):

$$\left(\frac{14+15,22}{2} \times 0,3 \times 12,69 + \frac{15,22+17,67}{2} \times 0,6 \times 2,25\right) \times 1.000 = 77.821,02 \frac{€}{km} \qquad (3.\ 36)$$

En cuanto a la estimación del coste de instalación de sistemas de drenaje longitudinal, se ha supuesto una longitud media de cunetas de 1.300 metros por kilómetro de línea, dato obtenido del Estudio Informativo de la línea de alta velocidad Burgos-Victoria. Es decir, por cada kilómetro de línea se construyen 1,3 kilómetros de cunetas (sumando ambos sentidos). De esta longitud se debe excluir la correspondiente a la longitud de los viaductos en los que no se instala drenaje longitudinal.

En definitiva, el precio básico del metro lineal de cuneta es de 33,33€/m, dato obtenido del Estudio informativo Burgos-Victoria. Por todo ello, el coste por kilómetro del drenaje longitudinal será de 43.333€/m.

Costes de mantenimiento capa de forma, subbalasto y drenaje

En cuanto a los costes de mantenimiento de la capa de forma y subbalasto, (Baumgartner. J.P, 2001) los incluye en los costes de vía, que serán tratados más adelante. (Ver Tabla 78).

En el caso de instalaciones para drenaje, (Baumgartner. J.P, 2001) propone un porcentaje sobre el costes de inversión comprendido entre 1% y 3%. Atendiendo a los porcentajes propuestos por Baumgartner en su estudio, en esta tesis se empleará un valor medio de 2% sobre el coste total de drenaje.

3.3.2.3.3 Efecto de la velocidad máxima de diseño en los costes de la subestructura

Las características básicas de la infraestructura ferroviaria condicionan notablemente las posibilidades de generar, a través de ellas, una oferta comercial de calidad. Uno de los problemas más importantes y más comunes en la construcción de una línea ferroviaria, ya sea convencional o de alta velocidad, es tratar de determinar el mejor trazado que satisface: (i) las limitaciones de diseño (radio mínimo, pendientes…), (ii) las limitaciones geográficas (demanda potencial…) y (iii) que minimiza el coste y el impacto ambiental.

Hoy en día la selección del trazado en una línea ferroviaria viene condicionada, principalmente, por las poblaciones a los que ésta tiene que atender. Una vez decididas las diferentes zonas geográficas que atenderá la infraestructura, se trazan las diferentes rutas, las cuales cumplirán unos criterios de diseño específicos para un servicio determinado. Otro aspecto relevante que definirá el futuro trazado de una infraestructura es la naturaleza del tráfico que circulará por la línea. La decisión de explotar una línea con tráfico mixto o tráfico exclusivo de viajeros influye decisivamente en los requisitos de construcción. Un servicio mixto exigirá, por ejemplo, peraltes menores o pendientes de menor gradiente (máximo 15‰).

Estos criterios de diseño (también llamados parámetros de diseño) que van a definir nuestro proyecto ferroviario y que, posteriormente, condicionarán la operación, influyen en la construcción de la infraestructura y, por supuesto, en sus costes de inversión.

Cuatro parámetros de la infraestructura son los considerados claves a estudiar, debido a su influencia en los costes, en la operación y a su relación con la velocidad máxima:

1. Porcentaje de túnel, viaducto y movimiento de tierras.
2. Rampa máxima.
3. Sección de túnel.
4. Ancho de plataforma (distancia entre ejes).

Efecto de la velocidad máxima de diseño en el tipo de obra construida

Otra cuestión a analizar es la orografía del terreno o más bien el relieve que tiene que atravesar una nueva infraestructura ferroviaria. Los costes variarán ostensiblemente si el terreno en el que se va a construir una nueva infraestructura es suave o si es accidentado. De hecho, una de las principales conclusiones a las que llega el estudio (Steer Davies, 2004) es que las variaciones de costes en líneas de alta velocidad se derivan de las diferencias en la orografía existente. En el estudio anteriormente mencionado, se afirma que el coste de construcción de una línea que transcurre por una zona con dificultades orográficas es de 4 a 6 veces mayor que el coste de una línea que atraviesa terrenos sin dificultades en el relieve.

Puede afirmarse, líneas que presentan un coste más elevado por kilómetro, principalmente indican que transcurren por terrenos montañosos con elevados porcentajes de obras (túneles y viaductos). Por lo tanto, la cantidad de túnel y de viaducto que es necesario construir en una infraestructura ferroviaria, condiciona los costes, incrementándolos a medida que aumenta este tipo de obra, como así refleja la ecuación (3. 30).

La pregunta que surge ahora es la siguiente: ¿Qué porcentaje de túnel, viaducto y movimiento de tierras hay en cada uno de los tipos de terrenos definidos (línea llana, semillana, montañosa, muy montañosa)?

Tipo de relieve y porcentaje de túneles y viaductos en la red ferroviaria española

El informe citado anteriormente (Atkins, 2002) considera que de media en tramos muy montañosos el 50% de la línea se construye bajo túnel y el 50% restante el tipo de obra utilizado es el viaducto. Estas consideraciones son valores medios y no se centran en un caso concreto, pues no es lo mismo una línea construida para 300km/h con radios de curva amplios que una línea de 90km/h con radios de curva más cerrados que permiten salvar las dificultades del terreno.

La velocidad juega un papel fundamental en los costes de construcción de tramos montañosos o muy montañosos e influye claramente en la cantidad y en la longitud de túneles y viaductos. A menor velocidad mayor posibilidad de “escapar” de una zona muy accidentada, ya que se dispone de radios de curva más cerrados, posibilitando el trazado de líneas “sinuosas” que transcurren por el cauce de los ríos o que rodean terrenos accidentados.

Para estimar la cantidad de obra necesaria y mostrar un orden de magnitud según tipo de terreno y velocidad máxima se considera imprescindible analizar cómo la red

ferroviaria española se enfrenta y traza su infraestructura ante las diferentes dificultades orográficas.

Para ello, se crea una capa con la red ferroviaria de toda España, actualizada al año 2011, en la que aparecen todas las líneas tanto convencionales como de alta velocidad existentes hasta esta fecha. Esta nueva capa se superpone al mapa de pendientes mostrado anteriormente (Figura 61), en el que se definen y visualizan perfectamente los diferentes tipos de terreno existentes en España.

Esto permite, por un lado, distinguir cada uno de los tramos ferroviarios según relieve, es decir, distinguir si son tramos llanos, semillanos, montañosos o muy montañosos, etc. (obsérvese que en el mapa se identifica cada uno de estos tramos con un color diferente) y, por otro lado, visualizar cómo y de qué manera se han construido las líneas ferroviarias dependiendo del terreno (radios de curva muy pequeños o amplios, si atraviesan una montaña o la rodean…).

A continuación se muestran ambas capas superpuestas (Figura 64), en las que se diferencian las líneas de alta velocidad y las líneas convencionales por la tonalidad y por el grosor de la línea.

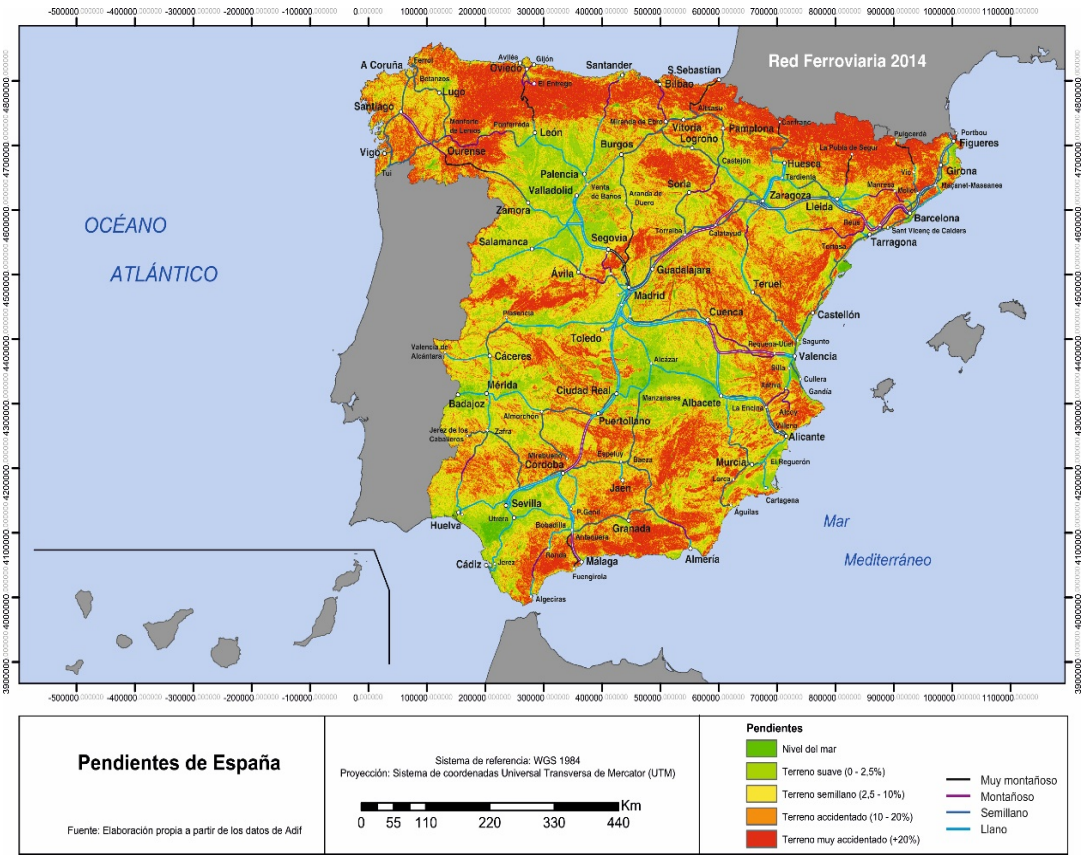


Figura 64. Red ferroviaria española superpuesta sobre el mapa de pendientes.

Fuente: Elaboración propia a través del GIS.

En esta figura, se observa perfectamente como determinados tramos transcurren sobre zonas claramente llanas (colores verdes), por ejemplo, la línea de alta velocidad Madrid-Cuenca-Valencia o el tramo Segovia-Valladolid, y como otros tramos de red se adentran en cadenas montañosas que presentan grandes pendientes (colores rojos).

Resulta curioso, sobretodo en estos últimos, cómo las líneas convencionales intentan "escapar" de esas pendientes tan elevadas mediante cerrados radios de curva que les permiten adentrarse en valles o en zonas con menores pendientes (colores más claros) evitando o reduciendo así el número y la longitud de los túneles y viaductos/puentes.

Un claro ejemplo de esto se observa en la línea Palencia-La Coruña, en el tramo entre Astorga y Monforte de Lemos (Figura 65) y en la línea León-Gijón (Figura 66). Se observa cómo ambas líneas convencionales se trazan atravesando zonas con menores pendientes, intentando así esquivar lo máximo posible aquellas zonas con relieves muy accidentados (rojo oscuro).

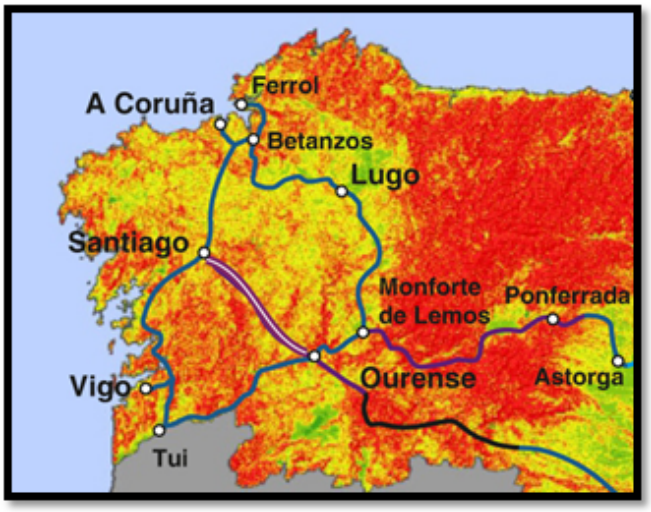


Figura 65. Tramo Astorga-Monforte de Lemos.



Figura 66. Tramo León-Gijón.

Fuente: Elaboración propia.

Otro caso curioso es el tramo Madrid-Segovia (Figura 67), en él se puede observar la diferencia existente entre la red convencional y la red de alta velocidad. Se aprecia claramente la diferencia de trazados utilizados para atravesar la Sierra de Guadarrama. En este caso, la línea de alta velocidad, ante la imposibilidad de reducir los radios de curva que conduciría a una penalización en el tiempo de viaje entre Madrid y Segovia debe atravesar la sierra de Guadarrama por la zona con mayores pendientes medias, lo que implica la construcción de túnel prácticamente en toda la línea (84,7%).

Si se centra el análisis en la línea convencional, sucede prácticamente lo mismo que la línea Palencia-La Coruña (Figura 65), en todo momento intenta rodear la montaña

"escapándose" de las zonas con mayor pendiente, reduciendo claramente el porcentaje de túnel (5,52%).



Figura 67. Tramo Madrid-Segovia.

Fuente: Elaboración propia.

Estos ejemplos ilustran perfectamente como la red convencional con menores velocidades proyecta trazados más "sinuosos", lo que permite reducir la cantidad de obras de fábrica y túneles.

Tras el análisis del comportamiento de la red ferroviaria ante las dificultades orográficas, es necesario cuantificar o dar un orden de magnitud a esta realidad observada, con el objetivo de cuantificar el efecto de la velocidad en el porcentaje de obra construida.

Conocidos y clasificados los diferentes tramos según orografía del terreno (Figura 64), el siguiente paso consiste en calcular para cada uno de ellos el porcentaje de obra (túnel, viaducto y movimiento de tierras) y la velocidad máxima de diseño. Esto permite determinar y cuantificar el efecto de la velocidad sobre el tipo de terreno y línea.
Una vez que se dispone del porcentaje de obra para cada tipo de tramo de línea y la velocidad máxima (véase Anejo 5 en el que se muestra toda la información recopilada), se procede con el análisis de la relación de ambos parámetros. A continuación, se muestra de manera gráfica para cada tipo de terreno la influencia de la velocidad máxima en el porcentaje de túnel y en el porcentaje de viaducto.

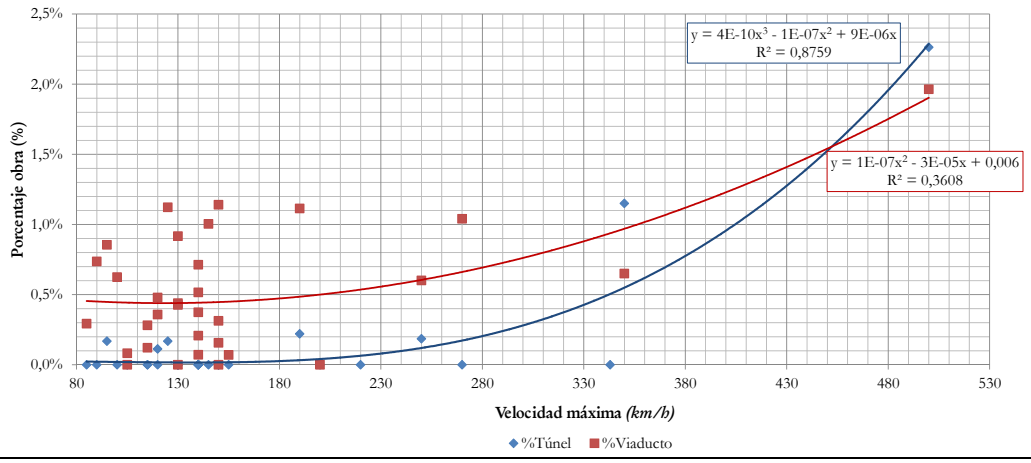


Figura 68. Porcentaje de túnel y viaducto en función de la velocidad máxima en tramos suaves.

Fuente: Elaboración propia.

Tras la recopilación de todos los datos y el posterior análisis, se confirma que el porcentaje de túnel y viaducto es insignificante en este tipo de terrenos (terreno llano).

Los resultados obtenidos están en línea con lo expuesto por Adif: "*un terreno llano, es aquel que sólo necesita obras de tierra, pasos de drenaje y en alguna ocasión algún paso superior (…)".*

Aunque el porcentaje tanto de túnel como de viaducto sobre el total de la línea es bajo, la velocidad máxima tiene una incidencia considerable sobre ambos parámetros. Si se observa la Figura 68 se puede afirmar que para velocidades inferiores a 200km/h, casi no se construyen túneles o son de muy pequeña longitud, mientras que la media de puentes por tramo corresponde a un 0,4% de la longitud total. Para velocidades superiores a 200km/h, los porcentajes aumentan ligeramente no llegando a alcanzar el 3%.

De los datos obtenidos se extrae que el porcentaje medio de túnel y viaducto en tramos llanos y su relación con la velocidad máxima, se puede estimar a partir de las siguientes expresiones:

$$\%_{túnel} = 4 \cdot 10^{-10} \times V_{Max}^3 - 1 \cdot 10^{-7} \times V_{Max}^2 + 9 \cdot 10^{-6} \times V_{Max} \quad (3.\ 37)$$

$$\%_{viaducto} = 1 \cdot 10^{-7} \times V_{Max}^2 - 3 \cdot 10^{-5} \times V_{Max} + 0{,}006 \quad (3.\ 38)$$

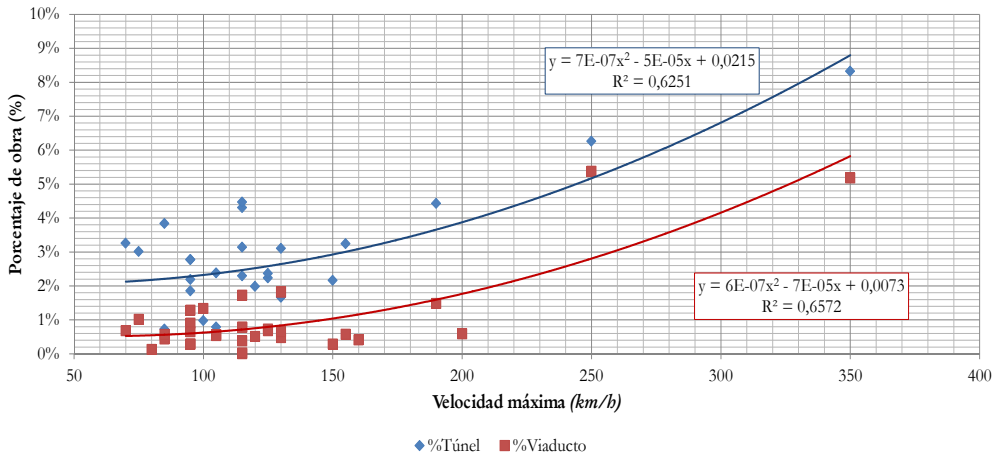


Figura 69. Porcentaje de túnel y viaducto en función de la velocidad máxima en tramos semillanos.

Fuente: Elaboración propia.

En comparación con el terreno llano, se produce un incremento tanto en el porcentaje de túnel como en el de puentes o viaductos. Además, al igual que en el caso anterior la velocidad influye claramente en el porcentaje de obra, a mayor velocidad mayor porcentaje de túnel y viaducto. Este efecto se resume en:

- Para velocidades menores o iguales a 200km/h, se ha construido entre un 0,1% y un 4,5% de túnel (sobre la longitud total del tramo) y de máximo un 1,8% de puentes y/o viaductos.
- Para velocidades superiores a 200km/h, se han construido entre un 1,6% y 8,3% de túnel y entre 3,1% y 5,4% de puentes y/o viaductos.

El porcentaje medio de túnel y viaducto en tramos semillanos se puede estimar a partir de las siguientes expresiones:

$$\%_{túnel} = 7 \cdot 10^{-7} \times V_{Max}^2 - 5 \cdot 10^{-5} \times V_{Max} + 0{,}0215 \quad (3.\ 39)$$

$$\%_{viaducto} = 6 \cdot 10^{-7} \times V_{Max}^2 - 7 \cdot 10^{-5} \times V_{Max} + 0{,}0073 \qquad (3.\ 40)$$

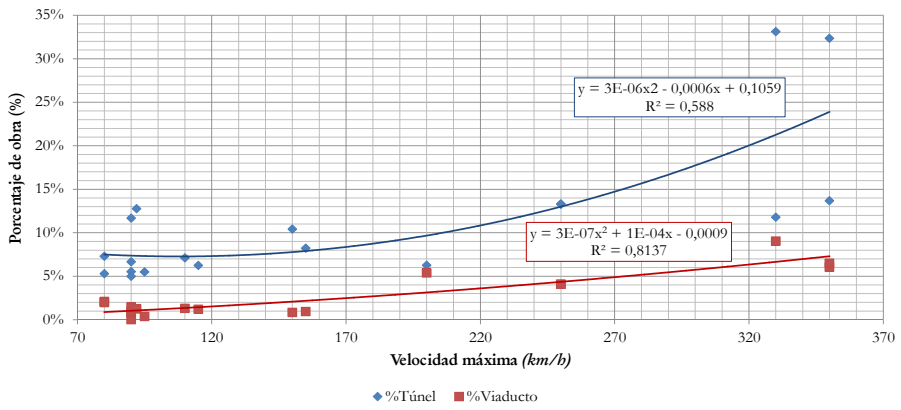


Figura 70. Porcentaje de túnel y viaducto en función de la velocidad máxima en tramos montañosos.

Fuente: Elaboración propia.

Queda claramente reflejado en la figura anterior (Figura 70) cómo el porcentaje de túnel construido sobre el total de línea se incrementa considerablemente si se compara con el obtenido en terrenos llanos y semillanos y que este porcentaje, tanto de túnel como de viaducto, aumenta con el incremento de la velocidad.

El efecto de la velocidad máxima sobre el porcentaje medio de túnel y viaducto en tramos montañosos, se puede determinar a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\%_{túnel} = 3 \cdot 10^{-6} \times V_{Max}^2 - 0{,}0006 \cdot \times V_{Max} + 0{,}1059 \qquad (3.\ 41)$$

$$\%_{viaducto} = 3 \cdot 10^{-7} \times V_{Max}^2 - 10^{-4} \times V_{Max} - 0{,}0009 \qquad (3.\ 42)$$

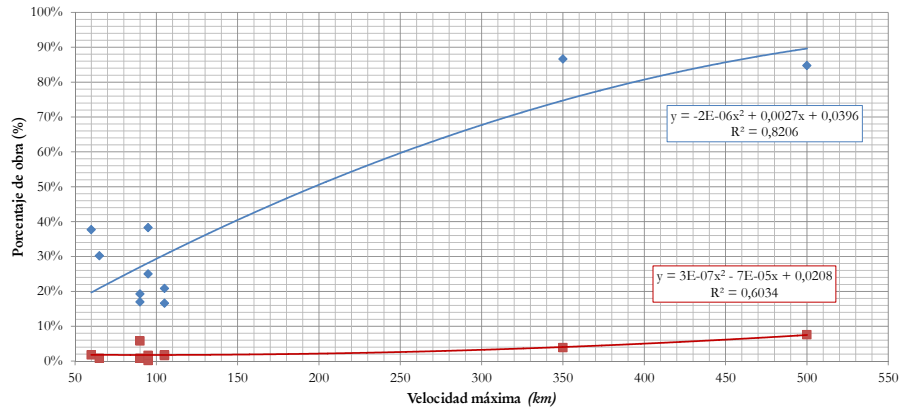


Figura 71. Porcentaje de túnel y viaducto en función de la velocidad máxima en tramos muy montañosos.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede ver claramente cómo la cantidad de obra de fábrica y túnel se dispara en este tipo de tramos, sobretodo en el caso de líneas de alta velocidad. De los resultados se puede destacar que para:

- Velocidades inferiores a 120km/h se construye en torno a un 25,6% de túnel (entre un 16% y 38,3%) y un 1,8% de puentes (entre un 0,1% y 5,8%).
- Para velocidades mayores o iguales a 350km/h, el porcentaje de túnel construido esta en torno al 85,7% y de viaducto al 5,7%.

Aquí claramente se observa cómo en estos tipos de tramos el incremento de la velocidad penalizará sustancialmente a los costes, ya que la necesidad de construir túneles y viaductos es muy grande (porcentajes de obra elevados).

A modo de resumen, las expresiones que se muestran a continuación permiten determinar el efecto de la velocidad máxima sobre el porcentaje medio de túnel y viaducto en tramos muy montañosos:

$$\%_{túnel} = -2 \cdot 10^{-6} \times V_{Max}^2 + 0{,}0027 \times V_{Max} + 0{,}0396 \quad (3.\ 43)$$

$$\%_{viaducto} = 3 \cdot 10^{-7} \times V_{Max}^2 - 7 \cdot 10^{-5} \times V_{Max} + 0{,}0208 \quad (3.\ 44)$$

Utilizando casos reales, en un escenario como el español que presenta una gran casuística debido a la complejidad de su relieve, se ha demostrado que no todos los casos son iguales y que no debe de calcularse los costes considerando que existe un 50% de túnel y un 50% de viaducto (en tramos montañosos) sin tener en cuenta, por ejemplo, parámetros como la velocidad máxima de la línea.

Es importante mencionar que las gráficas resumen obtenidas muestran porcentajes medios para cada tipo de obra y para pendientes máximas de 25‰. Por lo tanto, estos porcentajes pueden verse corregidos si la pendiente máxima considerada es diferente, tarea que se realizará en la siguiente sección.

Efecto de la velocidad máxima de diseño y la rampa máxima

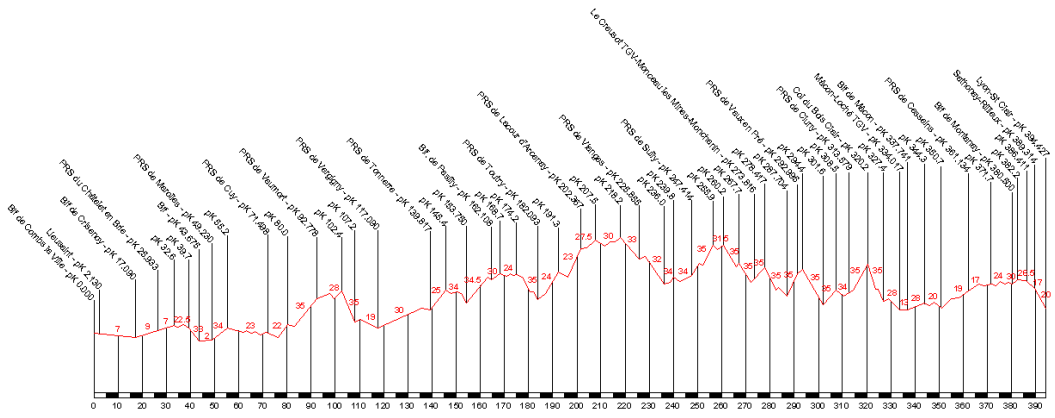
Es conocido que la adopción de unos parámetros geométricos u otros pueden influir en los costes de inversión de una manera significativa. El hecho de utilizar un valor u otro de rampa máxima vendrá derivado de: (i) tipo de servicio (viajeros o tráfico mixto) y, (ii) los costes asociados a uno y a otro trazado.

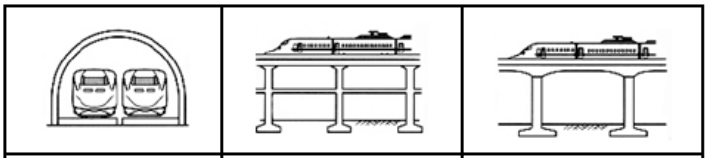
Rampa máxima y su relación con los costes de construcción

Es importante entender que el valor de la pendiente influye en los costes de infraestructura, de forma que elevadas rampas condicionan el perfil longitudinal del trazado de vía en relieves accidentados. Esto supone la necesidad de construir gran cantidad de obras de fábrica (túneles y viaductos) aumentando así el coste de la infraestructura con respecto a lo que supondría su construcción en terreno llano, como se ha visto en la sección anterior.

A mayor gradiente admitido, mayor ajuste del trazado al terreno natural y, por lo tanto, se reduce la necesidad de obras de fábrica y túneles, lo que en definitiva supone una clara reducción de los costes de inversión. Los ferrocarriles franceses ya tuvieron en cuenta el efecto de la pendiente en el coste de inversión, pues en la línea Paris-Lyon (línea proyectada para servir exclusivamente a tráfico de viajeros) se utilizó un valor de pendiente máxima de 35 milésimas, valor propio de una línea alpina. La decisión de adoptar este gradiente evitaba la construcción de gran número de kilómetros de túneles, lo que suponía una gran reducción del coste de construcción.

Como se observa en la figura mostrada a continuación (Figura 72), se trata de una línea con grandes rampas y grandes pendientes, pues prácticamente toda la línea presenta pendientes por encima de 25 milésimas.





	Túnel		Viaducto		Puentes	
Longitud total	Longitud	%	Longitud	%	Longitud	%
394,427	4436	1,125%	2506	0,635%	183	0,046%

Figura 72. Perfil de línea Paris-Sud Est y porcentaje de obras.

Fuente: Rail21. http://florent.brisou.pagesperso-orange.fr/Lignes.htm.

Se han encontrado dos estudios que analizan en detalle esta cuestión. En ellos se analizan casos reales (líneas ferroviarias reales) tratando de establecer una relación funcional entre las pendientes máximas y los costes de inversión. A continuación se resumen los resultados que obtienen:

- El primer estudio analizado es (Linkerhägner, 1985) en el que se compara la cantidad de túnel y viaducto en dos líneas alemanas, una de ellas con 35‰ de gradiente máximo y la otra con 12,5‰ para posteriormente, calcular los costes de construcción.
  A continuación se muestra los resultados obtenidos (Tabla 65).

Tabla 65. Porcentajes de obra y costes en dos líneas diferentes con la adopción primero de gradientes máximos de 12,5‰ y después 35‰

Tracé de Westerwald	
Ouvrages d'art	38 % - 15 %
Coûts	100 % - 87 %
Tracé Hagen - Friedberg	
Ouvrages d'art	60 % - 45 %
Coûts	100 % - 91 %

Fuente: (Linkerhägner, 1985).

Se puede comprobar que pasar de una pendiente máxima de 12,5‰ a una de 35‰ supone una reducción de los costes muy elevada, en torno al 10% (entre

un 13% y un 9%), diferencia de costes que se confirma en otras dos líneas alemanas de características similares (perfil montañoso).

Tabla 66. Reducción de costes en dos líneas (Hannover-Würzburg y Mannhelm-Stuttgart) con la adopción de rampas con gradientes de 35‰.

Ligne nouvelle Hannover - Würzburg (Rethen - Kassel)	
Coûts	100 % - 89 %
En adoptant en plus un R = 3 250 m au lieu de 5 100 m	
Coûts	100 % - 85 %
Ligne nouvelle Mannheim - Stuttgart	
Coûts	100 % - 90 %
En adoptant en plus un R = 3 250 m au lieu de 5 100 m	
Coûts	100 % - 87 %

Fuente: (Linkerhägner, 1985).

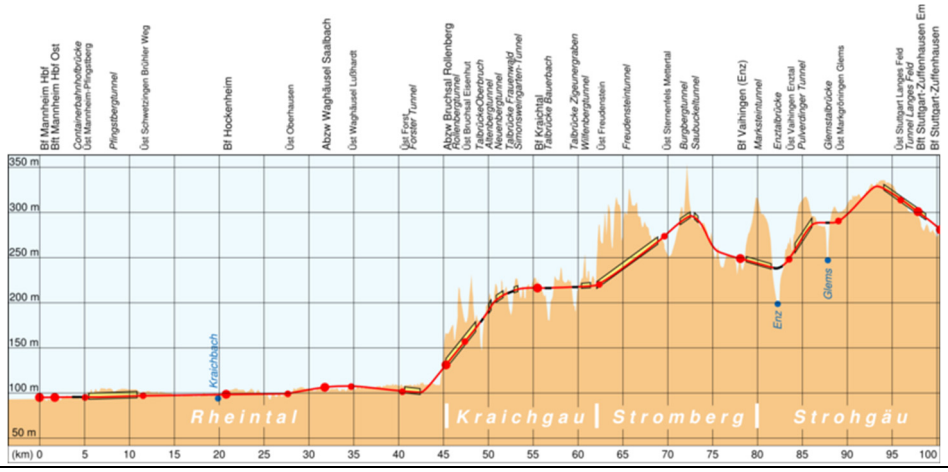


Figura 73. Perfil de la línea Mannheim-Stuttgart

Fuente:
http://de.wikipedia.org/wiki/Schnellfahrstrecke_Mannheim%E2%80%93Stuttgart

- En el estudio (Malo Gaona, 1991) se plantea un caso similar; emplea la conexión entre Madrid y Zaragoza incluyendo tres alternativas (trazados) diferentes y considerando distintos valores de rampa. En una primera fase considera rampas máximas de 12,5‰ y, posteriormente, rampas de 35‰ (considerando rampas máximas en túnel de 10‰ y de 25‰). Al igual que el artículo anterior, trata de calcular la cantidad de obra que sería necesario construir para cada rampa máxima.

Tabla 67. Porcentaje de túnel y viaducto en relación a la longitud total de cada alternativa analizada.

	Resultados del estudio a escala 1:50.000						
	% Tunel		% Puente		Coste por km		
	35 ‰	12,5 ‰	35 ‰	12,5 ‰	35 ‰	12,5 ‰	Diferencia
Alternativa 1	10,90%	23,12%	7,22%	8,75%	143	291	50,9%
Alternativa 2	9,25%	26,08%	6,30%	5,57%	122	258	52,7%
Alternativa 3	7,47%	22,69%	5,19%	7,62%	100	246	59,3%

Fuente: Elaboración propia con datos de (Malo Gaona, 1992)

Puede observarse que, al igual que el estudio de Linkerhägner, la reducción del porcentaje tanto de túnel como de puentes es muy grande lo que supone una reducción considerable en los costes de inversión.

Es importante tener en cuenta que no es lo mismo una línea que atraviesa zonas con gran densidad de población que una línea que evita zonas urbanas. Esto puede ser una de las causas que expliquen que la reducción de costes en el estudio de las líneas ferroviarias alemanas no es tan acusada como el caso de los diferentes trazados analizados en la relación Madrid-Zaragoza.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los estudios citados, se procede a analizar la muestra de datos de costes de inversión de diferentes líneas de alta velocidad analizadas en el estudio de la UIC *"Couts des lignes Nouvelles a Grande Vitesse"* (véase resumen de costes en Anejo 7). De la muestra se eliminan aquellas líneas que atraviesen zonas con grandes densidades de población, debido a que, en estos casos, ya sea a causa de los costes de expropiación o por la mayor necesidad de obras de fábrica en zonas urbanas, se produce un gran incremento de los costes, lo cual desvirtúa la comparativa que se pretende en este apartado.

La figura que se expone a continuación (Figura 74), muestra la relación costes de inversión-rampa máxima para la muestra analizada.

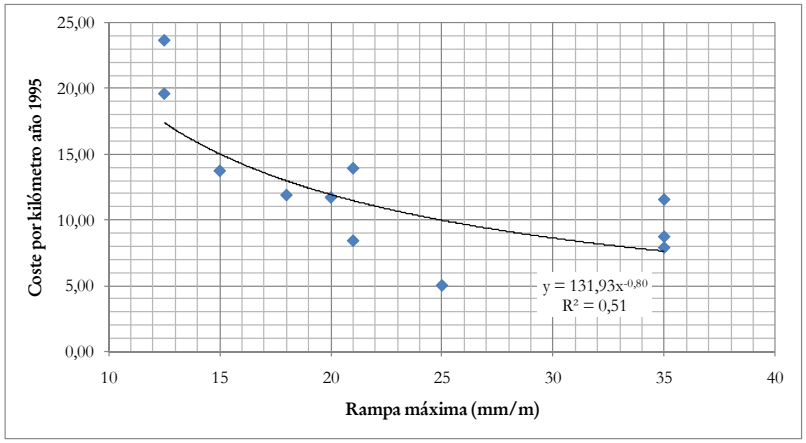


Figura 74. Relación entre el coste por kilómetro y la rampa máxima de diferentes líneas europeas.

Fuente: Datos de 1995, informe UIC, líneas utilizadas: Mannheim-Stuttgart, Hannover-Würzburg, Turin-Milan, Milan-Bologne; Rome-Naples, Bruxeles-Frontiere F., Bruxeles-A. la Capelle, Rohne-Alpes, Paris Est, Paris-Mediterranee, Calatayud-Ricla.

A la vista de los resultados, la diferencia en cuanto a costes entre construir una línea de alta velocidad con una rampa de 35‰ y otra con una rampa 12,5‰ está en torno al 56% (pasa de 7,67M€/km a 17,49M€/km). Esta diferencia está en línea con el estudio (Malo Gaona, 1992). La influencia de la rampa máxima en los costes es clara, en los estudios mostrados anteriormente, se observa cómo a medida que se incrementa la rampa máxima, los costes por kilómetro se reducen, pero la casuística es tan amplia que cada línea necesitaría un análisis detallado.

A falta de datos reales sobre el trazado y el relieve del terreno, los resultados obtenidos por Malo Gaona pueden ser empleados como datos de entrada, pues son comparables

a los resultados obtenidos tras el análisis de los costes por kilómetro de diferentes líneas incluidos en el Anejo 7.

Solo se tendrá en cuenta los escenarios montañosos y muy montañosos, pues se considera que son los casos en los que la rampa máxima tiene un efecto importante en la longitud de túnel y viaducto. En terrenos llanos y semillanos el porcentaje medio de túnel y viaducto es bajo, en estos casos el trazado ferroviario se adapta bien a este tipo de orografía (un incremento de la pendiente no supondría una reducción sustancial en la construcción de este tipo de obra).

De los resultados obtenidos del estudio de Malo Gaona puede extraerse que, de media, por cada milésima de pendiente máxima que se aumenta, se le resta 0,66% al porcentaje inicial de túnel, es decir que si la línea tiene un porcentaje de túnel del 23% para 12,5‰ pasar a una pendiente de 35‰ supone reducir el porcentaje de túnel a 8,1%.

Adoptando las variaciones en el porcentaje de túnel estimadas, a los resultados obtenidos en pendientes máximas de 25‰ (Figura 70 y Figura 71), se obtiene la gráfica que se muestra a continuación (Figura 75).

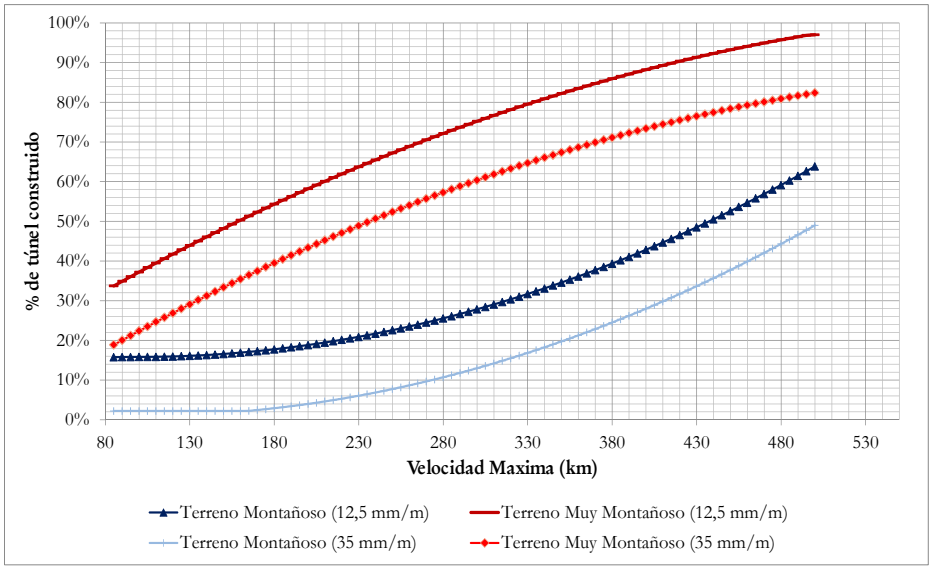


Figura 75. Porcentaje de túnel para diferentes velocidades máximas, considerando pendientes máximas de 35‰ y 12,5‰.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa claramente cómo el porcentaje de túnel es mayor para pendientes máximas de 12,5‰ que para pendientes de 35‰, pues a medida que la pendiente máxima es mayor el trazado se adapta mejor al relieve del terreno y, por lo tanto, se reduce la cantidad de túnel construido.

En el caso del porcentaje de puentes y/o viaductos los resultados que se obtienen del estudio de Malo Gaona muestran que la reducción no es tan acusada. Puede extraerse que incrementar la pendiente máxima en una milésima supondría restarle un 0,05% al porcentaje inicial de viaducto.

A continuación se muestra gráficamente (Figura 76) el porcentaje de viaducto en función de la velocidad máxima para terrenos montañosos y muy montañosos y para pendientes máximas de 35‰ y 12,5‰.

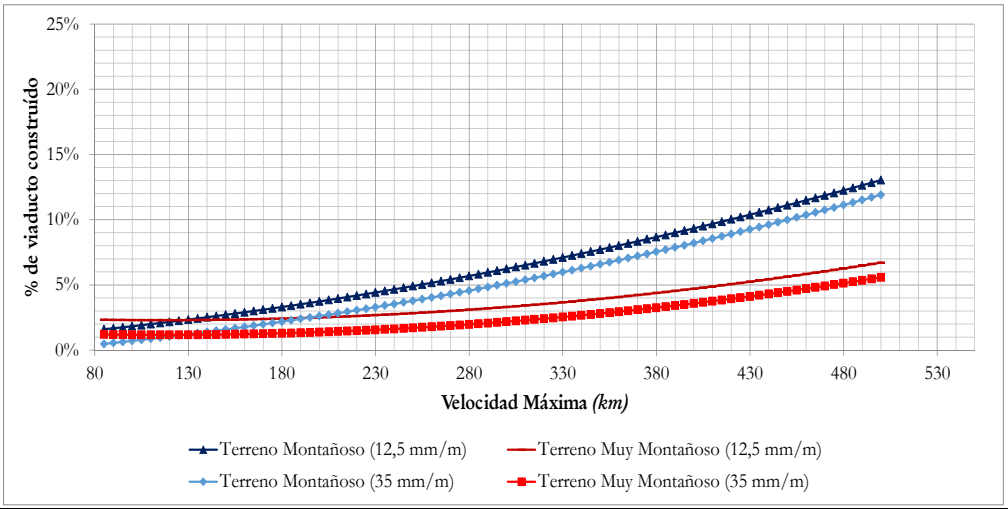


Figura 76. Porcentaje de viaducto para diferentes velocidades máximas, considerando pendientes máximas de 35‰ y 12,5‰.

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el caso anterior rampas máximas mayores reducen el porcentaje de viaducto necesario. Obsérvese que solo se incluyen porcentajes en terrenos montañosos y muy montañosos, ya que para el resto de tipos de terrenos se emplean los valores ya calculados para un valor de rampa máxima de 25‰, pues se entiende que en estos casos la pendiente no modifica el porcentaje de obra.

Efecto de la velocidad máxima de diseño y la sección de túnel

La aparición de la alta velocidad en Japón evidenció la existencia de fenómenos aerodinámicos no solo a la entrada de los túneles, sino que también en el interior de los mismos. Este aumento de los efectos aerodinámicos se produce, principalmente, porque cuando el tren entra en un túnel comprime el aire a la entrada; una parte se propaga a la velocidad del sonido y la otra parte se desplaza hacia los laterales del tren (entre éste y el túnel). El fenómeno provoca que a medida que el tren avanza por el túnel la presión sufrida tanto frontal como lateral aumenta de manera considerable, lo que supone una reducción del confort de los viajeros.

Este efecto se incrementa con la velocidad, a medida que se incrementa la velocidad, la presión generada es mayor y, por lo tanto, disminuye el confort del viajero. Por ello, cuanto mayor es la sección libre que existe entre túnel y tren, menor es la resistencia al avance en túnel y, por lo tanto, menor es la diferencia de presiones sufrida por los viajeros. Así pues, es claro que es necesario aumentar la sección de los túneles para poder circular a grandes velocidades.

La experiencia mostrada por los diferentes trazados de alta velocidad prueba la relación existente entre el tamaño de la sección trasversal de los túneles y la velocidad máxima de circulación del material rodante.

La Figura 77 muestra la relación sección trasversal-velocidad máxima, relación obtenida de la experiencia francesa en alta velocidad.

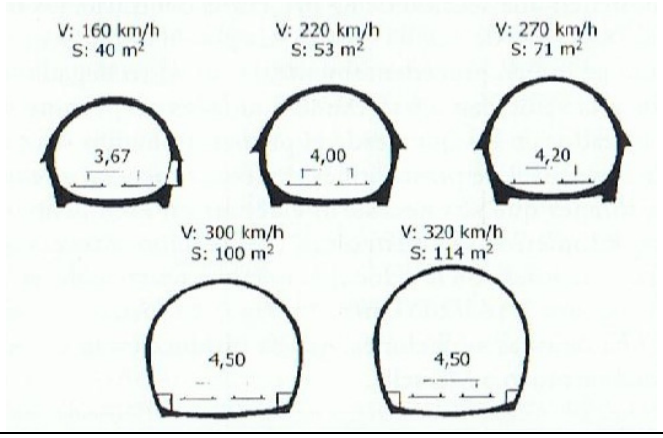


Figura 77. Variación de la sección trasversal con la velocidad.

Fuente: (López Fernández, 2012).

Costes en función de la sección trasversal

Conocida la relación entre la velocidad y la sección trasversal, es necesario relacionarlo con el coste, ya que es uno de los propósitos de esta tesis. Es clara la relación entre ambos parámetros, aunque la sección trasversal no es el único parámetro que afecta al coste (problemas de excavación, soporte en la construcción de túneles, técnicas constructivas…), es conocido que su influencia en el coste es importante.

En estudios como el de (Puertas Herranz, 2011) se analiza esta relación y se determina la elasticidad del coste por metro lineal de túnel a consecuencia de variaciones en la sección trasversal (véase Figura 78).

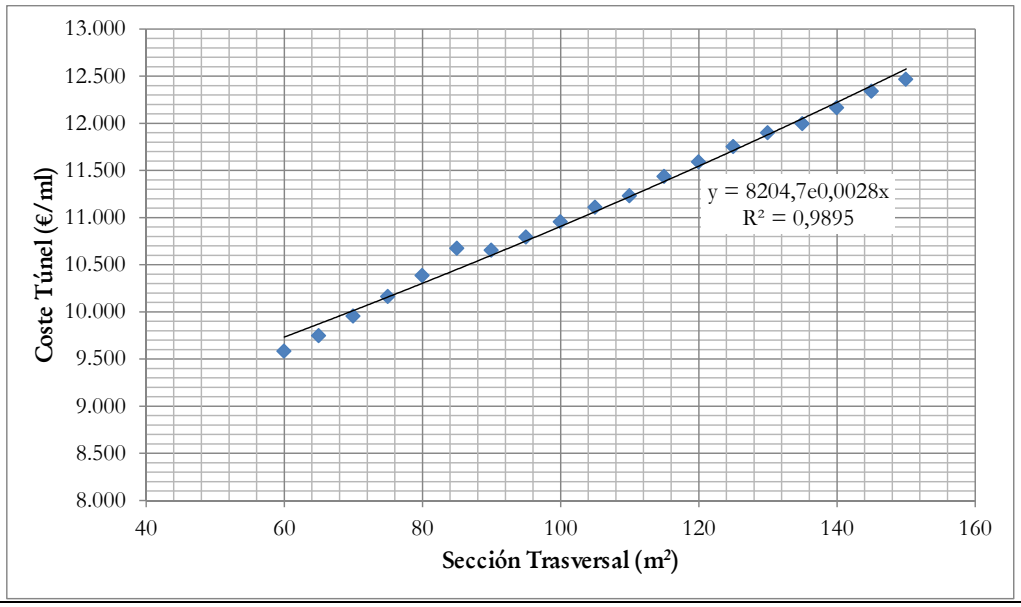


Figura 78. Coste por metro lineal en función de la sección trasversal de túnel (m²)

Fuente: (Puertas Herranz, 2011).

Extrapolando los resultados obtenidos en el estudio de (Puertas Herranz, 2011) a los costes que declara Adif (Tabla 63) puede hallarse la relación ente el coste y la sección trasversal, sección trasversal que se determina en función de la velocidad máxima (véase Figura 77).

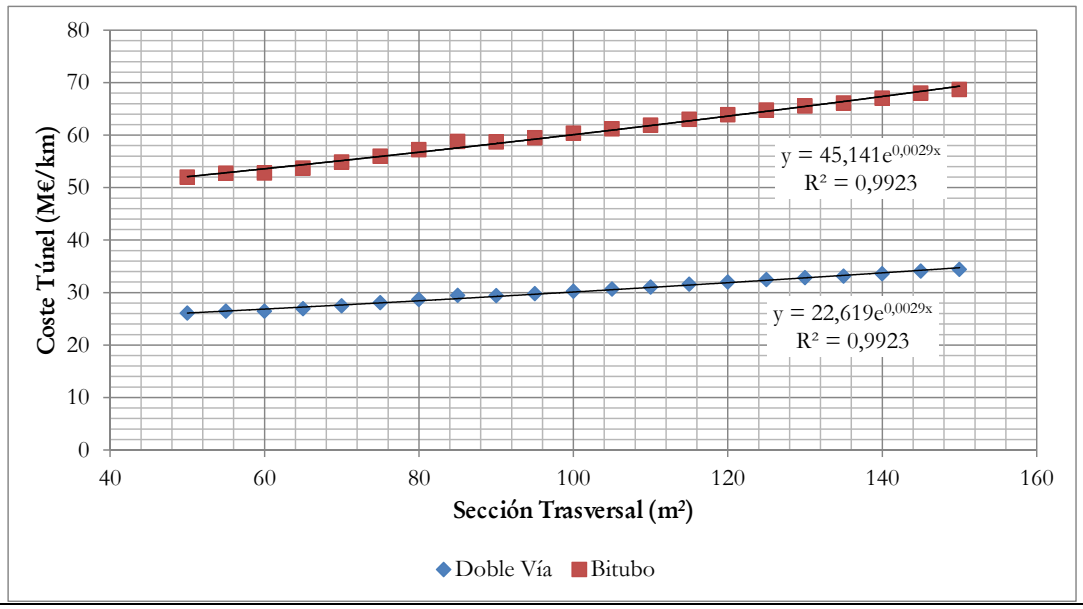


Figura 79. Costes por kilómetro en función de la sección trasversal de un túnel

Fuente: Elaboración propia.

En definitiva, el coste por kilómetro para construir un túnel se puede estimar a partir de las siguientes expresiones:

- Para túneles doble vía sección trasversal única:

$$C_{VDoble} = 22{,}619 \times e^{0{,}0029 \times S} \quad (3.\ 45)$$

- Para túneles bitubo:

$$C_{bitubo} = 45{,}141 \times e^{0{,}0029 \times S} \quad (3.\ 46)$$

Donde:

- C_{vdoble}: coste de inversión por kilómetro de túnel sección única (M€/km).
- C_{bitubo}: coste de inversión por kilómetro de túnel bitubo (M€/km) y
- S: sección trasversal de túnel (m^2).

Queda demostrada y cuantificada la relación sección de túnel-velocidad máxima de diseño y la relación sección de túnel-coste de inversión.

Efecto de la velocidad máxima de diseño en el ancho de la plataforma

Un parámetro importante en una línea de doble vía y que influye en el ancho de la plataforma es el llamado entreeje, que corresponde a la distancia que existente entre los ejes de las dos vías en la zona de paralelismo.

Según la ETI de Infraestructura[23] *"el gálibo de implantación de obstáculos y la distancia entre ejes de vía determinan principalmente la distancia entre las paredes de los vehículos, el pantógrafo y las estructuras próximas a la vía, y entre las propias paredes de los vehículos en caso de cruce. Además de establecer las condiciones necesarias*

23 Directiva 96/48-Interoperabilidad del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad. Especificación Técnica de Interoperabilidad. Subsistema de infraestructura con fecha 2008.

para evitar todo exceso de gálibo, estas interfaces permiten definir el nivel de esfuerzos transversales debidos a los efectos aerodinámicos sobre los vehículos y recíprocamente sobre las instalaciones fijas".

Pero, ¿existe alguna relación entre la distancia entre ejes y la velocidad máxima de diseño?

Velocidad máxima y distancia entre ejes de vía.

El valor que toma el entreeje ha ido creciendo progresivamente con el paso de los años. En los primeros tiempos de la doble vía sólo se trataba de garantizar que los vehículos no se chocasen o rozasen al cruzarse. Sin embargo, con el aumento de la velocidad de circulación las exigencias técnicas aumentan; el gálibo cinemático va siendo cada vez mayor al gálibo estático, por lo que un incremento de la distancia entre ejes proporciona un mayor grado de seguridad y se reducen los impactos aerodinámicos provocados por del cruce de trenes.

En la siguiente tabla (Tabla 68) pueden observarse los distintos valores de entrevía adoptados en los diferentes países, los años de inauguración de cada una y el tipo de tráfico que circula por ellas.

Tabla 68. Valores de entrevía en distintas líneas europeas de alta velocidad.

Línea	Entrevía (m)	Año de inauguración	Tráfico
París-Lyon	4,2	1981/83	Viajeros
TGV-Atlántico	4,2	1989/90	Viajeros
TGV-Norte	4,5	1993	Viajeros
TGV-Interconexión	4,2	1994/96	Viajeros
TGV-Rhône Alpes	4,5	1992/94	Viajeros
TGV-Mediterráneo	4,8	2001	Viajeros
TGV-Este	4,8	2007	Viajeros
Roma-Florencia	4	1984/92/97	Mixto
Roma-Nápoles	5	2006	Mixto
Madrid-Sevilla	4,3	1992	Viajeros
Madrid-Barcelona	4,7	2003/07	Viajeros
Hannover-Wurzburg	4,7	1991	Mixto
Mannheim-Stuttgart	4,7	1991	Mixto
Colonia-Frankfurt	4,7	2002	Viajeros

Fuente: (López Pita, 2008).

La tabla anterior demuestra que el entreeje no es un parámetro fijo, sino que depende de la decisión del planificador, siempre y cuando se respete la distancia mínima fijada por la normativa vigente (ETI de infraestructura).

La ETI de infraestructura es la especificación que establece los valores mínimos de entreeje que deben cumplir todas las infraestructuras nuevas, rehabilitadas o renovadas, bajo determinadas condiciones. Los valores mínimos especificados en la especificación técnica son los que se exponen en la siguiente tabla (Tabla 69):

Tabla 69. Distancias mínimas entre ejes de vía en función de las velocidades máximas permitidas.

Velocidad máxima permitida de los trenes que cumplan la ETI del material rodante del ferrocarril de alta velocidad.	Distancia mínima entre ejes de vías
V≥230 km/h	Si <4,00 m, se determina a partir del gálibo cinemático de referencia (apartado 4.2.3)
V≥230 km/h	4,00 m
250 km/h < V ≤ 300 km/h	4,20 m
V>300km/h	4,50 m

Fuente: ETI, Subsistema de infraestructura.

Desde un punto de vista teórico, como se mencionaba al principio del apartado, la distancia entre ejes se establece principalmente por los efectos aerodinámicos que se producen en un cruce o en el adelantamiento de trenes. En general, con el paso de un tren se genera una onda de presiones y depresiones que se actúa sobre cualquier objeto que se sitúe próximo a éste. Estas presiones producidas dependen de diversos parámetros entre los que se encuentra la velocidad y la distancia entre ejes.

De acuerdo a la Ficha UIC 779-1[24], este conjunto de presiones se puede estimar a través de la siguiente expresión (3. 47):

$$q_{1k} = k_1 \times cp \times \left(\frac{V}{3{,}6}\right)^2 \times \frac{1}{1600} \qquad (3.\ 47)$$

Donde:

- k_1: coeficiente que depende de la forma y tamaño del tren (toma valores de 0,6 para trenes de alta velocidad).
- V: Velocidad máxima del tren (km/h).
- cp: corresponde al coeficiente aerodinámico que es función de la distancia entre ejes (entreeje).

El coeficiente aerodinámico *cp* puede ser estimado a partir de la siguiente fórmula (3. 48):

$$C_p = \frac{2{,}5}{(Y + 0{,}25)^2} + 0{,}02 \qquad (3.\ 48)$$

Donde:

- Y: distancia entre ejes (m).

Basándonos en la experiencia real; considerando una distancia de entreeje de 4,7m para velocidades máximas de 350km/h (como es el caso de la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona), puede estimarse la relación entre distancia del entreeje y velocidad, buscando en cada caso el entreeje que hace que la presión sufrida sea constante e independiente de la velocidad máxima. Para ello se emplea la siguiente formulación (3. 49):

[24] Ficha UIC 779-1: Effect of the slipstream of passing trains on structures adjacent to the track.

$$cp_{teórico} = cp_{LAVMAD-BCN} \times \left(\frac{Vmax_{LAVMAD-BCN}}{Vmax_{LAVGenerica}}\right)^2 = cp_{LAVMAD-BCN} \times \left(\frac{350}{Vmax_{LAVGenerica}}\right)^2 \quad (3.\ 49)$$

Aplicando la expresión anterior para diferentes velocidades máximas y despejando la distancia entre ejes de la ecuación (3. 48) se obtiene los siguientes resultados en función de la velocidad máxima (Tabla 70).

Tabla 70. Distancia mínima de entreeje para velocidades superiores a 350km/h.

Vmax *(km/h)*	350	375	400	425	450	475	500
Distancia entreejes *(m)*	4,7	5,1	5,6	6,0	6,6	7,1	7,7

Fuente: Elaboración propia.

Costes en función del ancho de la plataforma

La relación entre ancho de plataforma y distancia entre ejes es clara, ya que al aumentar la distancia entre ejes es necesario incrementar la anchura de la plataforma. Por lo tanto, puede afirmarse que sí existe una relación entre la velocidad máxima de diseño de la infraestructura y el ancho de la plataforma, pues un incremento de la velocidad implica una mayor distancia entre ejes y, como consecuencia, un mayor ancho de plataforma.

Si se centra el análisis en la relación velocidad y costes de plataforma, al incrementarse el ancho de plataforma es necesario aumentar el ancho tanto de la capa de forma como la capa de subbalasto. Recuérdese que los valores de costes de capa de forma y subbalasto obtenidos en el apartado anterior se fundamentan sobre unas características fijas, que son: 4,7 metros de entreeje, 14 metros de ancho de plataforma, 30cm de espesor de la capa de forma y 60cm de espesor de subbalasto (véase Figura 63).

Tomando estos valores como referencia y variando el ancho de la plataforma en la misma proporción que el entreeje, el cual varía en función de la velocidad máxima (como se muestra en la Tabla 70), es posible calcular el coste aplicando la ecuación (3. 36) para los diferentes valores de ancho de plataforma.

A continuación se muestra el coste de capa de forma y subbalasto por kilómetro en función de la velocidad (Figura 80):

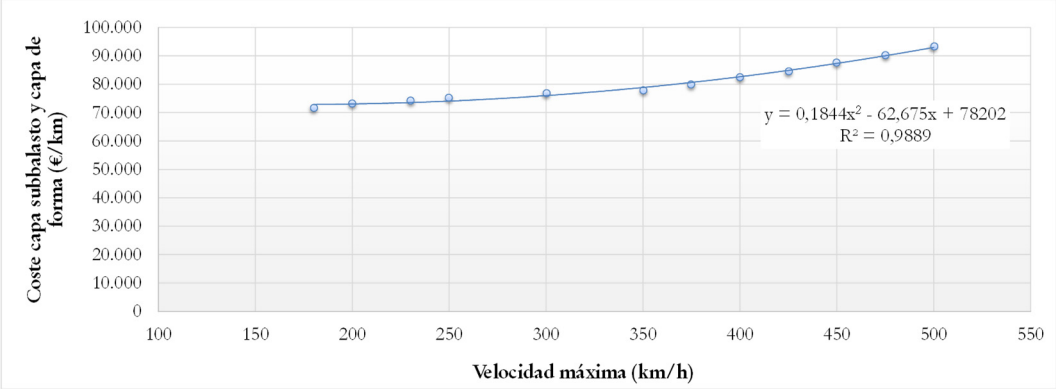


Figura 80. Coste de la capa de forma y del subbalasto en función de la velocidad máxima.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.3.4 Resumen costes subestructura

Aplicando los modelos desarrollados en este capítulo, es decir, utilizando los porcentajes de movimiento de tierras, estructuras y túneles en función de la velocidad máxima y de la rampa máxima para cada tipo de terreno definido, incluyendo el efecto de la velocidad en la sección de túnel y en la longitud de línea y sumando el coste de la capa de forma, subbalasto y drenaje (en función de la velocidad máxima), se obtiene el coste total de la subestructura.

Las gráficas que se muestra a continuación (Figura 81, y Figura 82) representa el efecto de la velocidad sobre el coste total de la subestructura para los diferentes tipos de terreno considerado. La intención es recoger y agregar el efecto de la velocidad máxima de diseño en todos y cada uno de los elementos que componen la subestructura y que han sido expuestos en los apartados anteriores.

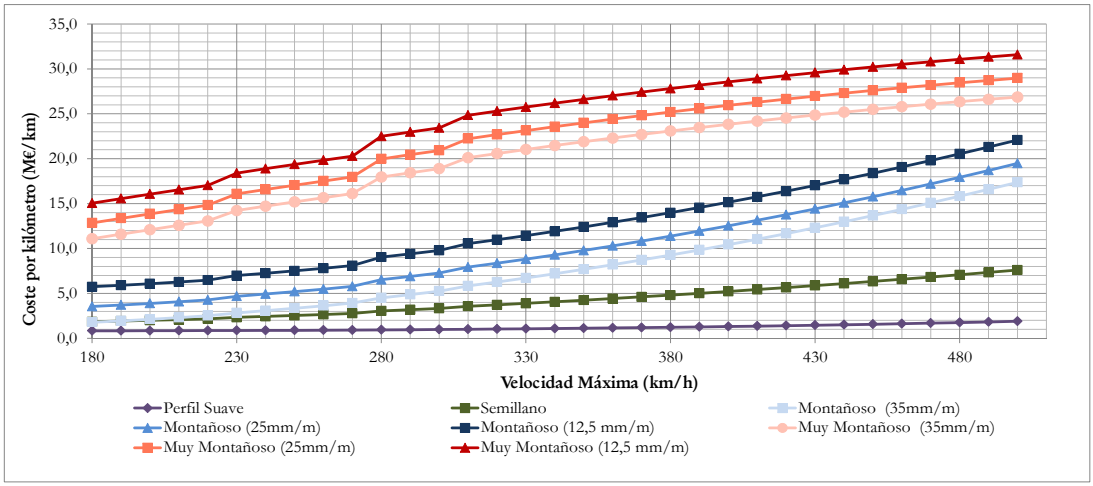


Figura 81. Coste por kilómetro de obra civil, capa de forma, subbalasto y drenaje en terrenos llanos, semillanos, montañosos y muy montañoso, considerando sección única de túnel

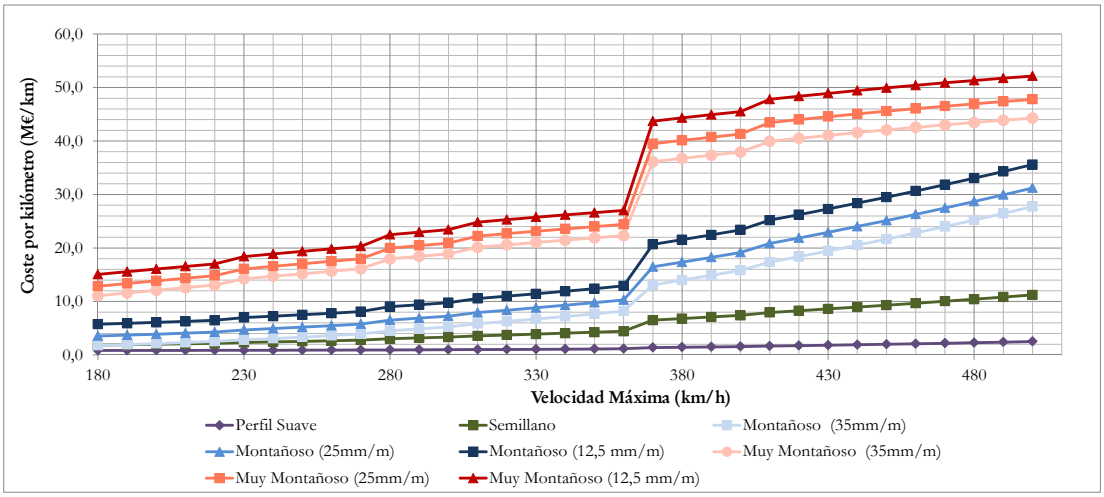


Figura 82. Coste por kilómetro de obra civil, capa de forma, subbalasto y drenaje en los diferentes tipos de terreno y considerando que a partir de 370km/h se construye túnel bitubo.

Los resultados obtenidos confirman la importancia de la velocidad máxima de diseño en los costes de inversión (en este caso en los costes de la subestructura). Las gráficas

muestran que a medida que se incrementa la velocidad máxima, sea cual sea la dificultad del terreno, los costes por kilómetro aumentan, pero este incremento es diferente si se trata de un perfil muy montañoso o de un perfil llano.

El caso más extremo se presenta en los tramos montañosos; en ellos, incrementar la velocidad máxima desde 180km/h a 500km/h supone multiplicar aproximadamente por 5 los costes (de 3,5M€/km a 19,5M€/km) o por 8 si se construye túnel bitubo (31,2M€/km), pues en estos casos el incremento de la velocidad implica un aumento considerado del porcentaje de túnel. Los casos que presentan menor sensibilidad a la velocidad se producen en tramos llanos y en tramos muy montañosos; pasar de 180km/h a 500km/h implicaría casi duplicar los costes, en este tipo de terrenos el incremento de la velocidad no supone un incremento considerable en el porcentaje de túnel y viaducto.

Los valores obtenidos con la metodología aquí propuesta están en línea con los resultados calculados por (Baumgartner. J.P, 2001). En ese estudio se calculan los costes para tres tipos distintos de relieve y para dos velocidades máximas diferentes (Tabla 71). En cada uno de estos escenarios, los costes toman valores dentro de un determinado rango, resultando similares a los determinados por la metodología propuesta en este capítulo.

Tabla 71. Costes de inversión de la subestructura según relieve y velocidad máxima

Tipo de vía	Velocidad máxima [km/h]	Terreno llano	Terreno semillano	Terreno montañoso
Vía única	100	2 (1 a 3)	5 (3 a 15)	20 (15 a 40)
Doble vía sobre plataforma única	100	2 (1 a 4)	7 (3 a 20)	20 (20 a 50)
	300	3 (2 a 6)	10 (6 a 30)	40 (20 a 50)

Nota: La inversión incluye los siguientes puntos: gestión del trabajo, preparación del terreno (deforestación, etc.), desvío de carreteras, terraplenes, drenaje, protección contra helada, estructuras de protección, estructuras (túneles, viaductos), pasos superiores, pasos inferiores, barreras u otros equipamientos y estructuras contra ruidos y muros

Fuente: (Baumgartner. J.P, 2001).

Otro estudio que muestra valores similares a los aquí obtenidos es el de (Fröidh, 2012), el cual realiza un análisis detallado de los costes de inversión, desagregando en los diferentes inductores que generan el coste.

Puede afirmarse que los costes de plataforma que se obtienen de la metodología propuesta se ajustan a los resultados obtenidos por otros autores, así como, a los estudios informativos analizados, por lo tanto, se puede afirmar que la metodología desarrollada permite calcular de manera objetiva los costes de los diferentes elementos de la subestructura así como su coste total.

3.3.2.4 Costes de inversión y de mantenimiento de la superestructura de vía

La superestructura es el conjunto de elementos que configuran la vía y que permiten la circulación de los trenes de forma segura y eficiente. Se destacan los siguientes elementos que componen la superestructura: balasto, traviesas, carriles, aparatos de vía y otros equipos, electrificación, señalización y comunicaciones.

En este apartado se procederá a la cuantificación económica de cada uno de ellos y, al igual que en el caso de la subestructura, se determina la relación con la velocidad máxima de diseño.

3.3.2.4.1 Coste de suministro y montaje de vía

En esta sección se describen brevemente los sistemas de vía (las tecnologías empleadas) para, posteriormente estimar su coste y su relación con la velocidad máxima.

Vía sobre balasto

Dentro del sistema montaje de vía sobre balasto se destacan los siguientes elementos:

- **Balasto**→ Se trata de roca machacada de tamaño comprendido entre 2cm y 6cm, colocado encima de la capa de subbalasto. Tiene como principal función la amortiguación y repartición de los esfuerzos, reducción de los ruidos, posibilidad de drenaje, protección de la plataforma contra heladas, permitir la nivelación y peralte y posibilitar la estabilidad de la vía tanto horizontal, longitudinal como transversal.
  La experiencia española en la construcción de infraestructuras ferroviarias, identifica una relación entre el tipo de línea y el espesor de la capa de balasto. Puede afirmarse que, generalmente en líneas de alta velocidad se emplea un espesor entre 30cm y 35cm (altura medida bajo traviesa hasta capa de subbalasto), mientras que en líneas convencionales suele emplearse una altura de 25cm o inferior (obsérvese Figura 83).

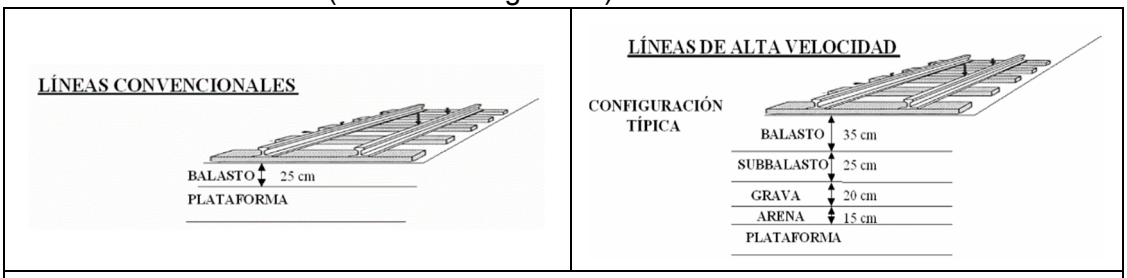


Figura 83. Sección trasversal de vía y disposición del balasto.

Fuente: (CENIT, 2008).

Esta diferencia según tipo de vía, permite establecer una relación entre la velocidad máxima de diseño y el espesor de la capa de balasto, pues a mayor velocidad se observa una mayor altura de la misma. Para reflejar el efecto de la velocidad en el coste de montaje de vía se considerará en esta tesis un valor de espesor de balasto diferente según rango de velocidad máxima.
El espesor de balasto considerado para cada rango de velocidades es:

- Para velocidades menores de 160km/h se considera un espesor de capa de balasto de 25cm.
- Para velocidades entre 160km/h y 300km/h se toma un espesor de 30cm.
- Para velocidades entre 300km/h y 400km/h se toma una capa de 35cm medidos bajo traviesa.
- Para velocidades mayores a 400km/h se toma un espesor de 40cm bajo traviesa.

- **Traviesas**→ La traviesa es un elemento constructivo imprescindible en toda línea ferroviaria, cuya principal función consiste en la sujeción del carril. Se disponen perpendicularmente a los raíles con una distancia (entre ejes de traviesa) entre 50cm y 70cm, siendo el valor más habitual 60cm. Los carriles se fijan a éstas mediante las sujeciones, de características determinadas.

Existen múltiples tipologías de traviesas (monobloque, bibloque…) y diversos materiales con los que poder fabricarlas (metal, madera, hormigón). Es este trabajo se considera la traviesa monobloque de hormigón ya que, hoy en día, es la que permite circulaciones a mayor velocidad.

- **Carril**→ La misión principal del carril consiste en guiar el material rodante en planta y en alzado, absorber, resistir y transmitir las cargas de tráfico y servir de conductor para el retorno de la corriente. Existe una gran variedad de carriles, sin embargo, generalmente la tipología empleada para alta velocidad es el carril UIC-60, que permite circulaciones a más de 350km/h.
- **Aparatos de vía**→ Los aparatos de vía son instalaciones que permiten asegurar la continuidad de la vía para un itinerario o ruta seleccionada. Los elementos que conforman los aparatos de vía son:
  - ✓ Desvíos: permiten que una vía se ramifique en dos o, excepcionalmente, en tres permitiendo así el paso de una vía a otra.
  - ✓ Travesías: permiten el cruce de dos vías (los ejes se cortan).

  Dentro de los componentes elementales de los desvíos y travesías se puede destacar:

  - Cambios, que a su vez están formados por agujas o espadines, contraaguja, y el talón.
  - Cruzamientos, que a su vez están formados por el corazón, laguna, contracarril y patas de liebre.

Costes asociados al montaje de la vía sobre balasto

Una vez definidas las funcionalidades de los diferentes elementos que componen una vía, se presenta un cuadro de precios de montaje de vía sobre balasto (Tabla 72).

Tabla 72. Cuadro de precios en el montaje de vía. (año 2011)

	Ud	Precio (€)	Ud	Vía Única*	Vía Doble**
Balasto					
Coste de producción balasto	tonelada	9,2	km	18.400	33.733
Suministro y transporte	tonelada	14,95	km	29.900	54.817
Formación del lecho de balasto con extendedora y compactación	m3	1,36	km	4.080	7.480
Traviesas					
Coses producción y suministro traviesa ancho UIC	Ud	69	km	115.000	230.000
Coses producción y suministro traviesa polivalente	Ud	73,6	km	122.667	245.333
Coses producción y suministro traviesa mixta tipo AM05	Ud	115	km	191.667	383.333
Carga de traviesas desde acopio a tren tren travesero y transporte y descaga en el lecho de balasto con grúa	Ud	1,98	km	3.300	6.600
Carril					
Coste producción carril	tonelada	715,3	km	85.836,0	171.672,0
Transporte desde producción hasta soldadura	toneladas	23	km	2.760,0	5.520,0
Soldadura carril	toneladas	34,5	km	4.140,0	8.280,0
Transporte desde soldadura hasta acopio	toneladas-km	0,1035	km	1.242 (1)	2.484 (1)
Transporte desde acopio a traza con tren carrilero y descarga	m	45,48	km	90.960	181.920
Montaje de los dos carriles sobre traviesa incluida la sujeción, incluida la alineación con bateadora	m	1,37	km	1.370	2.740

*Vía única considerando 3 m^3 de balasto

**Vía doble con con 5,5 m^3 de balasto

(1) Considerando 100km desde fabrica hasta acopio

Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Adif.

A partir de los costes unitarios mostrados en la Tabla 72 y conocida la sección trasversal de la vía (Figura 84) es posible trasformar los costes por m^3 o por tonelada en costes por kilómetro, se procederá de igual forma que en el caso del coste de plataforma en función de la velocidad máxima.

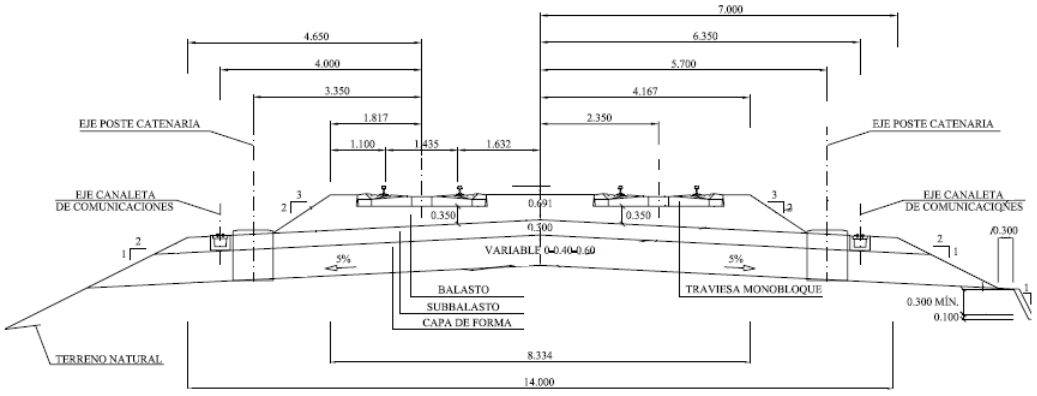


Figura 84. Sección trasversal de la vía.

Fuente: IGP 2008.

De acuerdo a los precios expuestos en la Tabla 72 y a los parámetros considerados (anchura de la capa de balasto y distancia entreeje), a partir de la siguiente expresión se puede calcular el coste por kilómetro:

$$C_{b_km} = \left(\frac{L_{bs} + L_{bi}}{2} \times e_b \times C_{m^3}\right) \times 1.000 \qquad (3.\ 50)$$

Donde:

- C_{b_km}: corresponde al coste del balasto por kilómetro *(€/km)*.
- L_{bs}: longitud de la base superior de la capa de balasto *(m)*.
- L_{bi}: longitud de la base inferior de la capa de balasto *(m)*.
- e_b: espesor de la capa de balasto *(m)*.
- C_{m^3}: coste del balasto por m³ *(€/m³)*.

Como puede observarse (véase Figura 85), el coste variará en función de la velocidad máxima de diseño, pues mayor velocidad, mayor distancia entre ejes, lo que implica que el ancho de la capa de balasto aumentará de tamaño. Es importante destacar que esta relación distancia de ejes-ancho de capa de balasto es cierta hasta una distancia de entreeje (aproximadamente de 5,1m), a partir de la cual se dispone una capa de balasto independiente para cada vía, como si de dos únicas vías se tratase. Lo que corresponde a un volumen de 3m³ de balasto por vía y metro lineal.

En cuanto al coste de inversión en traviesas, en la Tabla 72 se muestra el coste unitario, suponiendo que se colocan a una distancia entre ejes de 60cm, el número necesario de traviesas para una vía doble se obtiene dividiendo la longitud total de la línea entre la distancia entre traviesas.

$$C_{t_km} = \left(\frac{L_{línea} \times 1.000}{0{,}6} \times C_{trav}\right) \times 2 \qquad (3.\ 51)$$

Donde:

- C_{t_km}: coste total de inversión en traviesas (€).
- $L_{línea}$: longitud total de la línea (km).
- C_{trav}: coste unitario de la traviesa (€).

El coste medio por kilómetro del suministro y montaje de traviesas, aplicando la fórmula anterior, ronda los 236.000€, mientras que el coste medio por kilómetro atribuible al

suministro, transporte y montaje incluyendo también el montaje sobre la traviesa a través de las sujeciones, es aproximadamente 372.000€.

Efecto de la velocidad máxima de diseño en la vía

Obsérvese que el coste total de inversión de las traviesas y del carril sí que depende de la velocidad, a mayor velocidad, menor distancia entre dos puntos, lo que implica una reducción en costes de inversión.

Utilizando estos valores calculados para el montaje de traviesas y carril y los estimados para la capa de balasto en función de la velocidad máxima de diseño, puede calcularse el coste medio por kilómetro del montaje de vía sobre balasto en función de la velocidad (Figura 85).

	Velocidad Máxima										
	160	200	250	300	350	375	400	425	450	475	500
Distancia entre ejes *(m)*	3,5	3,8	4,2	4,5	4,70	5,10	5,58	6,00	6,57	7,10	7,68
Longitud de la base Superior *(m)*	7,13	7,43	7,83	8,13	8,33	8,73	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60
Longitud de la base inferior *(m)*	8,90	9,20	9,60	9,90	10,10	10,50	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40
Espesor Balasto *(cm)*	20	20	30	30	35	35	40	40	45	45	45
m^3 de Balasto	3,9	3,9	4,9	5,0	5,5	5,6	6,9	6,9	7,4	7,4	7,4
Coste balasto *(€/km)*	67.804	68.852	85.468	87.040	96.134	98.578	120.474	120.474	128.331	128.331	128.331
Coste traviesas *(€/km)*	236.600	236.600	236.600	236.600	236.600	236.600	236.600	236.600	236.600	236.600	236.600
Coste Carril *(€/km)*	372.616	372.616	372.616	372.616	372.616	372.616	372.616	372.616	372.616	372.616	372.616
Total *(€/km)*	677.020	678.068	694.684	696.256	705.350	707.794	729.690	729.690	737.547	737.547	737.547

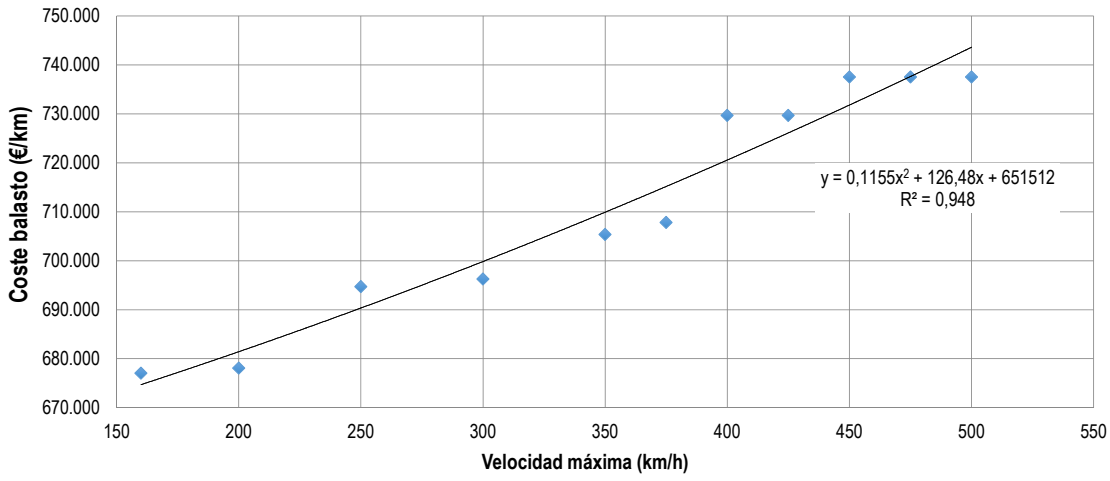


Figura 85. Coste por kilómetro de la capa de balasto en función de la velocidad máxima de diseño.

Fuente: Elaboración propia.

Vía en placa

La vía en placa es la vía en la que se ha sustituido el balasto por una losa de hormigón (construida *"in situ"* o prefabricada) de asfalto o por una base metálica. La vía en placa puede constituir una alternativa rentable en aquellas líneas con un elevado volumen de tráfico en las que las interrupciones asociadas a las labores de mantenimiento y renovación de la vía suponen costes elevados. Además, la vía en placa resulta una tecnología más económica para circulaciones de muy alta velocidad, pues elimina los problemas asociados a la vía en balasto (ej. vuelo de balasto).

Coste montaje de vía en placa

Una forma de abordar este apartado es centrándose, desde un punto de vista económico, en las diferencias encontradas en la literatura existente, pues para determinar el coste real medio sería necesario conocer el tipo de tecnología empleada

en el montaje de vía en placa, información que no disponible cuando se realiza una planificación o evaluación de la viabilidad de un proyecto ferroviario.

A continuación, se muestra la diferencia en costes (vía en placa & vía sobre balasto) encontrada en los diferentes estudios analizados:

- El coste estimado por Adif en "Principales ratios de coste/km" para el montaje de vía sobre balasto (contempla todos los elementos necesarios para su correcto acoplamiento, balasto, mano de obra, carril, traviesa, sujeciones, aparatos de vía…) es de 1,77M€/km. El coste estimado por Adif para el montaje de la vía en placa es de 2,5M€/km. Actualizando el coste a 2011 se obtiene un coste por kilómetro de 2,6M€/km.
- En el estudio "La vía en placa como la alternativa a la vía sobre balasto en línea de alta velocidad" (Miarnau Montserrat & López Pita, 1999), se realiza una comparativa del coste entre ambas tecnologías en líneas de alta velocidad en España, Francia, Alemania, y Reino Unido, proporcionando los valores económicos que muestra la siguiente tabla (Tabla 73).

Tabla 73. Comparación de costes de montaje de vía en cuatro países europeos.

País	Vía en balasto (M€/100 km)	Vía en placa (M€/100 km)
España	41,11	97,78
Alemania	45,20	
- Züblin		65,21
- Rheda		56,19
Francia	32,15	91,95
Inglaterra	73,74	0,00

Fuente: (CENIT, 2008).

- Según el estudio INFRACOST, el coste medio de construcción de la vía sobre balasto para alta velocidad (no contempla desvíos) supera los 580€/m (año 2007), mientras que el metro de vía en placa está alrededor de 1.514€/m. El ratio de coste vía en placa/balasto que proporciona este estudio es aproximadamente de 2,5, pero depende de la tecnología empleada, principalmente, en el caso de vía en placa (sistema Reda, Züblin).
- En el estudio "Track Competition" (Lichtberger, 2005) se cuantifica, también, el coste de vía sobre balasto en 350€/m y en el caso de vía en placa el valor económico indicado está recogido entre 750€/m y 1.100€/m. El ratio placa/balasto se sugiere que estaría dentro del rango que va desde 1,5 a 2.
- Por último, se destaca el estudio "International benchmarking of track cost" (Stalder, 2002), en el que se analizan los costes de la superestructura de 12 países europeos, se llega a la conclusión que el coste de vía sobre balasto es de 350€/m (no contempla desvíos) y para el caso de vía en placa muestra valores en torno a 1.700€/m.

Del análisis de estos estudios se deduce que el coste de vía en placa recoge valores dentro del intervalo 750€/m y 1700€/m mientras que, en el caso del balasto, se puede tomar un valor medio comprendido entre 350€/m y 580€/m. De la literatura analizada también puede destacarse las diferencias en el ratio coste placa/balasto, puede

resumirse que el ratio de coste placa/balasto se sitúa entre 1,3 y 2,6. Cualquier valor que se encuentre dentro de este rango puede ser empleado para estimar el coste de montaje de vía en placa una vez calculado el coste de montaje de vía sobre balasto.

Efecto de la velocidad máxima en el sistema de vía instalado

Conocido el coste por kilómetro relativos al montaje de vía y su relación con la velocidad máxima, la última cuestión que queda por resolver es en qué tramos y en qué líneas se montará vía en placa o sobre balasto. Esta problemática ha sido y es objeto de múltiples estudios y análisis, sin embargo, no se ha llegado todavía a un consenso que permita definir el lugar exacto y el momento preciso para montar una tecnología u otra, ambas tecnologías presentan unas ventajas sólidas, pero también importantes inconvenientes.

Generalmente, la decisión de montar un sistema u otro es tomada por el planificador, influido, entre otros muchos factores que afectan a su decisión, por el coste de inversión y el límite presupuestario que dispone para abordar el proyecto. Aunque en otros casos la decisión está supeditada a la velocidad máxima de circulación de los trenes. Una explicación plausible a esta segunda alternativa radica en que a altas velocidades el vuelo de balasto supone un gran inconveniente para la explotación, de ahí que a velocidades superiores a 350km/h se recomiende utilizar vía en placa.

En este estudio se aplicarán las recomendaciones realizadas en (Fröidh, 2012), en el que se afirma que dependiendo de la velocidad máxima y el tipo de obra se montará un tipo de tecnología u otra. Las recomendaciones propuestas en este artículo se muestran en la siguiente tabla (Tabla 74).

Tabla 74. Recomendaciones en cuanto al tipo de vía según la velocidad máxima de diseño.

Vel. Max Diseño	Mov. de tierras		Túneles y viaductos	
km/h	Balasto	Vía en placa	Balasto	Vía en placa
200-250	100%	0%	100%	0%
251-350	100%	0%	0%	100%
351-500	0%	100%	0%	100%

Fuente: (Fröidh, 2012).

Costes de desvíos

Mención especial dentro del apartado de costes atribuibles al montaje de vía es el coste asociado a los desvíos. Existe una gran diferencia en costes entre los desvíos empleados en líneas convencionales y aquellos utilizados en líneas de alta velocidad. Principalmente esta diferencia se debe a que las elevadas velocidades exigidas en este tipo de líneas implican elevados requerimientos técnicos, de seguridad y confort que encarecen este tipo de aparatos de vía.

En la tabla que se muestra a continuación (Tabla 75) se demuestra esta variabilidad, en ella se recoge el coste medio unitario de diferentes desvíos instalados en diferentes líneas de ferroviarias españolas (alta velocidad y convencionales).

Tabla 75. Coste de suministro y montaje de desvíos en líneas de alta velocidad (año 2011).

	Suministro (€/ud)	Montaje (€/ud)	Total (€/ud)
Desvío de alta velociadad tipo ADIF AV 17.000/7.300 (350/220) compuesto por: cambio carrilaje intermedio, cruzamiento de punta movil, traviesa de hormigon, placas y sujeciones, sistema de accionamiento, encerrojamineto y comprobación e incluso traviesas especiales para su alojamiento.	590.204,8	28.414,0	618.618,8
Desvío de alta velociadad tipo ADIF AV 10.000/4.000 (350/160) compuesto por: cambio carrilaje intermedio, cruzamiento de punta movil, traviesa de hormigon, placas y sujeciones, sistema de accionamiento, encerrojamineto y comprobación e incluso traviesas especiales para su alojamiento.	472.353,5	24.215,3	496.568,8
Desvío de alta velociadad tipo ADIF AV 3.000/1.500 (350/100) compuesto por: cambio carrilaje intermedio, cruzamiento de punta movil, traviesa de hormigon, placas y sujeciones, sistema de accionamiento, encerrojamineto y comprobación e incluso traviesas especiales para su alojamiento.	328.408,2	14.414,5	342.822,7
Desvío DSIH-GAV-60-1.500-0,042-CM-TC (300/100) compuesto por: cambio carrilaje intermedio, cruzamiento de punta movil, traviesa de hormigon, placas y sujeciones, sistema de accionamiento, encerrojamineto y comprobación e incluso traviesas especiales para su alojamiento.	347.598,5	7.849,4	355.447,9
Desvío DSIH-AV-60-10.000/4.000-0,026 (250/160) compuesto por: cambio carrilaje intermedio, cruzamiento de punta movil, traviesa de hormigon, placas y sujeciones, sistema de accionamiento, encerrojamineto y comprobación e incluso traviesas especiales para su alojamiento.	293.760,0	14.688,0	308.448,0
Desvío DSIH-AV-60-760-0,071 (250/80) compuesto por: cambio carrilaje intermedio, cruzamiento de punta movil, traviesa de hormigon, placas y sujeciones, sistema de accionamiento, encerrojamineto y comprobación e incluso traviesas especiales para su alojamiento.	163.200,0	24.000,0	187.200,0
Desvío DSIH-G-60-1.500-0,042 (200/100) compuesto por: cambio carrilaje intermedio, cruzamiento de punta fija, traviesa de hormigon, placas y sujeciones, sistema de accionamiento, encerrojamineto y comprobación e incluso traviesas especiales para su alojamiento.	215.658,5	10.782,9	226.441,4
Desvío DSI-C-54-318-(0,09 o 0,110)-(CR o CC)-(200/50 y 160/50) compuesto por: cambio carrilaje intermedio, cruzamiento de punta fija, traviesa de madera, placas resbaladeras y sujeciones y cerrojos.	70.733,4	3.536,7	74.270,1

Fuente: Elaboración propia con precios proporcionados por Adif y obtenidos de (CENIT, 2008).

La información mostrada corresponde a costes unitarios; sin embargo, el coste de montaje de vía corresponde a costes por kilómetro y, por lo tanto, es necesario transformar estos precios unitarios en costes por kilómetro. Esta no es una tarea sencilla, pues ¿Cuántos desvíos se montan en una vía? y ¿qué tipología de desvío se instala?

La respuesta a estas preguntas se revelaría en aquellas fases de construcción de una infraestructura ferroviaria que en tiempo son posteriores a la fase de evaluación *ex-ante* realizada en esta tesis. Sin embargo, una forma de abordar este tema es basándonos en casos reales con datos reales. Al igual que se ha hecho en otras secciones de esta tesis, a partir del análisis detallado de los parámetros de diseño y de las características básicas de la red ferroviaria española es posible obtener el número medio de desvíos que se montan y la tecnología empleada. Valores que servirán posteriormente para obtener un coste medio por kilómetro.

La manera de abordar el problema consiste en primer lugar, en estimar la distancia media entre “dependencias”, entendiéndose por “dependencia”, a efectos de circulación, como la parte de la infraestructura en la que pueden establecerse señales, puntos de bloqueo y en la que se permite el cambio de vía, adelantamiento, etc.

Se consideran como dependencias: Puestos de banalización (PB), Puestos de Adelantamiento y Estacionamiento de Trenes (PAET) y estaciones. Para ello se empleará de una serie de líneas de alta velocidad (véase Tabla 76).

Tabla 76. Distancia media entre dependencias de la red de alta velocidad española.

	Distancia entre dependencias (km)
Madrid-Barcelona	19,40
Madrid-Sevilla	23,52
Madrid-Toledo	18,64
Córdoba-Málaga	24,22
Madrid-Valencia	24,29
Bif Albacete-Alicante	22,34
Madrid-Valladolid	19,83
Promedio	**21,75**

Fuente: Elaboración propia.

Conocida la distancia media entre dependencias se procede al análisis del número de desvíos por dependencia y su tipología. Es importante destacar que el análisis realizado es para líneas de alta velocidad con velocidad máxima de diseño de 350km/h.

Tras el análisis de la red ferroviaria de alta velocidad española, se puede resumir que de media se montan 9 desvíos por dependencia con las siguientes características:

- Dos desvíos de tipología: AV 17.000/7.300 (350/220).
- Cuatro desvíos de tipología: AV 3.000/1.500 (350/100).
- Tres desvíos de tipología: DSI-C-54-318-0,09-CR (220/50).

Efecto de la velocidad máxima en el coste de desvíos

La velocidad juega un papel fundamental en el coste de desvíos, pues el número de dependencias será diferente en función de la velocidad y, como ya se mencionó anteriormente, la tipología del desvío es diferente también en función de la velocidad. Si se supone que la distancia entre dependencias obtenidas para las líneas de 350km/h (distancia de 21,75km) se fija para mantener una determinada capacidad en la línea, es posible relacionar velocidad máxima y número de dependencias necesarias para cada infraestructura.

Desde un punto de vista teórico y con independencia de otros factores, a medida que se reduce la velocidad máxima, el tiempo entre dos dependencias que están separadas a una determinada distancia, se incrementará, lo que supone una pérdida de capacidad, pues se necesita más tiempo para apartar, adelantar o cambiar de vía a un tren.

Utilizando como input el tiempo que necesita un tren con velocidad máxima de 350km/h en recorrer la distancia media obtenida entre dependencias (21,75km), se puede estimar la distancia media necesaria entre dos dependencias consecutivas en función de la velocidad máxima.

En la tabla que se muestra a continuación (Tabla 77) se recoge el efecto de la velocidad máxima sobre la distancia media entre dos dependencias consecutivas, teniendo como premisa mantener la capacidad considerada en las líneas de alta velocidad españolas.

Tabla 77. Distancia entre dos dependencias consecutivas, tipología y número de desvíos en función de la velocidad máxima y media de la línea.

			Tipología y numero de desvíos en función de la velocidad							
Veloc.Máxima (km/h)	Veloc. Media (km/h)	Disatancia entre dependencias	350/220	350/160	350/100	300/100	250/160	250/80	200/60	200/50
160	139,2	9,94	0	0	0	0	0	0	6	3
180	156,6	11,19	0	0	0	0	0	0	6	3
200	174	12,43	0	0	0	0	0	0	6	3
220	191,4	13,67	0	0	0	0	0	0	6	3
250	217,5	15,53	0	0	0	0	2	4	0	3
280	243,6	17,40	0	0	0	0	2	4	0	3
300	261	18,64	0	0	0	0	2	4	0	3
320	278,4	19,88	0	0	0	6	0	0	0	3
350	304,5	21,75	2	0	4	0	0	0	0	3
380	330,6	23,61	2	0	4	0	0	0	0	3
400	348	24,86	2	0	4	0	0	0	0	3
420	365,4	26,10	2	0	4	0	0	0	0	3
450	391,5	27,96	2	0	4	0	0	0	0	3
480	417,6	29,83	2	0	4	0	0	0	0	3
500	435	31,07	2	0	4	0	0	0	0	3

Fuente: Elaboración propia.

Se muestra claramente que si se reduce la velocidad máxima se incrementa el número de dependencias, ya que es necesario reducir la distancia entre dos dependencias consecutivas, lo que en principio puede llevar a pensar que el coste de montaje de desvíos se incrementará a medida que se reduce la velocidad máxima. Sin embargo, aunque el número de desvíos por dependencia no varíe (nueve desvíos por dependencia), la tipología de los mismos cambia, lo que se traduce en una reducción de los costes considerable. El tipo de desvíos utilizado en líneas convencionales tiene un coste considerablemente menor que el coste de desvío con punta móvil que se utiliza en vías de alta velocidad (como puede verse en la Tabla 75).

Suponiendo una tipología de desvíos diferente según el tipo de velocidad máxima considerada, como se muestra en la Tabla 77, y teniendo en cuenta el precio unitario por tipología de desvío (Tabla 75), el efecto de la velocidad máxima en el coste de montaje de desvío, se muestra en la gráfica que se dispone a continuación (Figura 86).

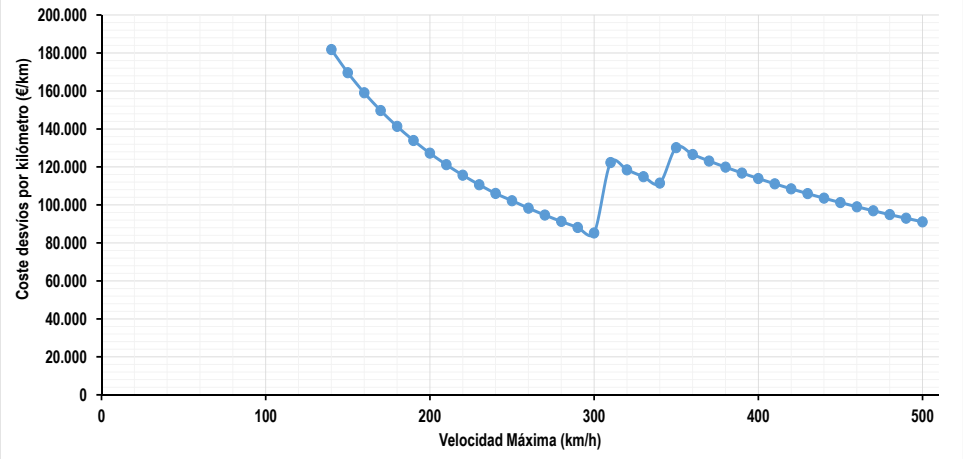


Figura 86. Relación entre velocidad máxima y costes de montaje de desvíos.

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la gráfica, existe una relación clara entre la velocidad máxima de diseño y el coste de suministro y montaje de desvíos. Se observa también que entre aquellas velocidades máximas para las cuales se emplea la misma tecnología de desvío el coste de montaje se reduce a medida que se incrementa la velocidad máxima, a causa de la mayor distancia necesaria entre dos dependencias consecutivas, lo que supone una reducción en el número total de desvíos necesarios en el total de la línea.

Los resultados también muestran que se produce incrementos elevados en costes de montaje cuando se alcanza determinada velocidad máxima (implica el montaje de desvíos con tecnología más avanzados), este efecto no permite afirmar que el aumento de la velocidad máxima supone reducciones en el montaje de desvíos.

Conclusiones: costes de montaje de vía en función de la velocidad máxima de diseño

En secciones anteriores de este apartado, se ha demostrado la influencia de la velocidad en el coste de aquellos elementos que componen la vía, lo que permite obtener órdenes de magnitud que pueden ser comparables con datos reales de otros proyectos, líneas o estudios.

El siguiente paso consiste en encontrar la relación entre el coste total de inversión en el montaje vía y la elasticidad que presenta éste a la variación de la velocidad máxima de diseño. Por ello, se agregan y recopila todos los resultados obtenidos, con el objetivo de obtener un coste medio relativo al montaje de vía. Por lo tanto, teniendo en cuenta la variación del costes de la capa de balasto en función de la velocidad, el coste por kilómetro de las traviesas y carril, el coste de los desvíos y su relación con la velocidad y, finalmente, la relación entre el tipo de montaje (vía en placa o sobre balasto) y la velocidad máxima (Tabla 74), se estima el coste total de inversión para diferentes tipos de líneas (llana, semillana, montañosa y muy montañosa).Obsérvese que la velocidad influye en el número de kilómetros de vía que se construye en túnel, en viaducto, y a cielo abierto por lo que será diferente según el tipo de terreno.

A continuación se muestra gráficamente el efecto de la velocidad máxima en los costes de montaje de vía (Figura 87).

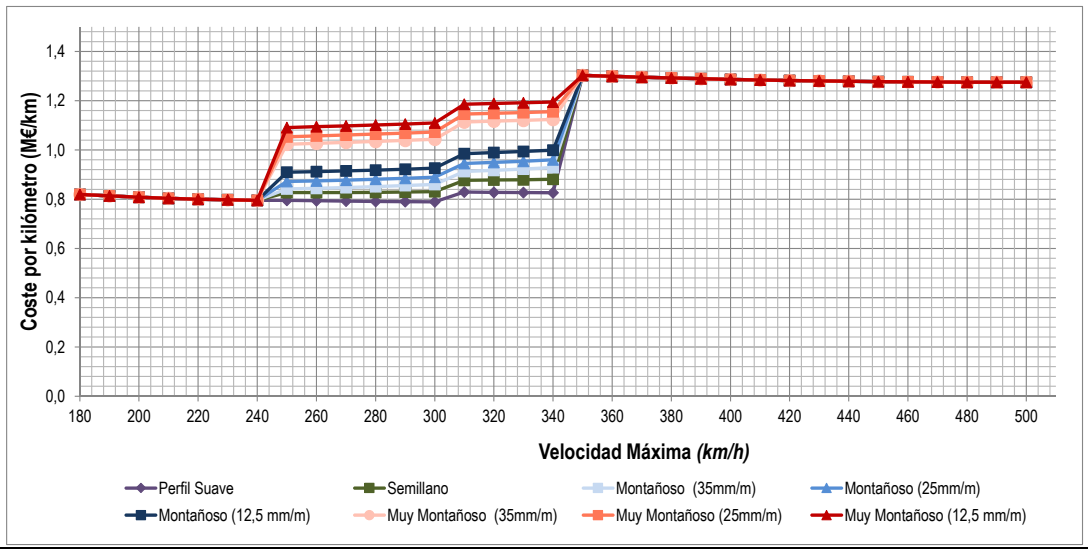


Figura 87. Coste total del montaje de vía en función de la velocidad máxima de diseño (año 2011).

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos (Figura 87) muestran que diseñar una infraestructura para velocidades superiores a 350km/h, implica casi duplicar el coste asociado al montaje y

suministro de vía, si la comparación se realiza con el coste acometido para velocidades por debajo de 200km/h (se pasa de un coste de aproximadamente de 0,8M€/km a un coste de 1,3M€/km para velocidades de 350km/h).

También se destaca de los resultados que el incremento en costes no es constante ni lineal, pues lo que se observa es que el incremento se produce a tramos, es decir, al alcanzar determinadas velocidades máximas el coste por kilómetro sufre un aumento considerable. Esto tiene sentido, ya que el coste de montaje y suministro de desvíos es función de la tecnología implantada y ésta, como se ha mostrada en la sección anterior, es función de la velocidad máxima de diseño.

Por último, si se deja a un lado la influencia de la tecnología de desvíos en el coste de montaje de vía, se observa que la influencia de la velocidad en el coste es pequeña, es decir, un incremento de la velocidad no supone un gran incremento del coste, ya que influye solamente en el ancho y en el espesor de la capa de balasto, características que varían poco con la velocidad máxima.

Costes de mantenimiento de la vía

El deterioro de la vía está claramente relacionado con los esfuerzos generados o producidos en la circulación de los trenes, estos esfuerzos o cargas son una combinación de cargas estáticas y dinámicas. Las cargas dinámicas están directamente relacionadas con la velocidad de circulación y, por lo tanto, en un primer análisis es posible afirmar que existe una relación directa entre la velocidad y el deterioro de la vía y, por ello, puede afirmarse que existe una causa-efecto en el coste de mantenimiento de la vía.

Otro efecto que permite establecer una relación entre la velocidad y el coste de mantenimiento es el número de intervenciones en vía. La experiencia demuestra que a medida que se aumenta la velocidad máxima de circulación la calidad geométrica de la vía se incrementa y, por lo tanto, las mayores exigencias, en términos de seguridad y calidad de vía, llevan a que la frecuencia de intervenciones en vía sea superior a las realizadas en líneas con menores velocidades de circulación (líneas convencionales).

Sin embargo, existen otros factores que evidencian lo contrario, es decir que el deterioro de la infraestructura se reduce al incrementar la velocidad máxima de diseño. Es claro que a mayor velocidad de diseño existe una mayor calidad de la vía y también una mayor supervisión, por lo que se reduce el número de imperfecciones, imperfecciones que influyen sustancialmente al coste de mantenimiento. Otro efecto característico de líneas ferroviarias con velocidades de diseño altas es la presencia de trazados con radios de curva más abiertos (líneas menos sinuosas), reduciendo el deterioro de vía producido por la interacción pestaña-carril. A este efecto se le añade la reducción de peso por eje que caracteriza los tráficos ferroviarios de alta velocidad. Todos estos efectos implicarían una reducción en el coste de mantenimiento y como se ha mencionado la reducción se produce al incrementar la velocidad.

La cuestión es compleja ya que existen opiniones contrapuestas, existes una serie de efectos, atribuibles al incremento de la velocidad, que influyen negativamente en el coste de mantenimiento, pero también existen otros que indican que el coste puede verse reducido. Aunque no existe una evidencia clara del efecto de la velocidad en los costes de mantenimiento, el análisis de los costes unitarios de mantenimiento en líneas en servicio (véase estudio (CENIT, 2008)) arroja que los costes de mantenimiento son superiores en líneas de alta velocidad, por lo que parece razonable afirmar que existe una relación positiva entre ambas cuestiones.

Aunque la influencia de la velocidad en los costes no es clara, pueden citarse dos estudios que abordan este tema y que claramente se posicionan en la teoría que afirma una relación causa-efecto positiva entre el coste de mantenimiento y la velocidad, estos estudios son:

- Estudio realizado por Tifsa (Tifsa, 1999), en este estudio se emplea una fórmula empírica obtenida a partir de datos reales en líneas ferroviarias francesas que permite estimar el sobrecoste producido por pasar de 270km/h a 350km/h. De acuerdo con lo obtenido afirman que el sobrecoste por circular a 350km/h es casi el doble (1,7) que circular a 270km/h.
- El estudio (Baumgartner. J.P, 2001), este estudio proporciona datos sobre los costes de mantenimiento de la vía como precios medios en 103€ por tonelada bruta kilómetro de vía principal y año o día. Estos precios están clasificados en función de la velocidad y de las toneladas brutas por kilómetro por día y por año (Tabla 78).

Tabla 78. Costes de mantenimiento de vía

	Tráfico neto (includa tracción) por vía (tonelada neta-kilómetro TNK)			
Velocidad máxima (km/h)	$10x10^3$ TNK/día 2.5 a 3.6 x 10^6 TNK/año	$30x10^3$ TNK/día 7.5 a 11 x 10^6 TNK/año	$100x10^3$ TNK/día 25 a 36 x 10^6 TNK/año	$300x10^3$ TNK/día 75 a 108 x 10^6 TNK/año
100	7 (5 a 10)	15 (10 a 20)	30 (20 a 40)	60 (40 a 80)
300	-	20 (10 a 30)	40 (20 a 60)	-

Fuente: (Baumgartner. J.P, 2001).

De acuerdo con lo expuesto en Baumgartner, se afirma que los costes de mantenimiento por circular a 300 km/h son un 33% superior a los atribuibles para velocidades de 100 km/h.

Los valores proporcionados por Baumgartner serán los empleados en esta tesis, ya que contempla todos aquellos elementos considerados en este apartado y se ajusta perfectamente al desglose de costes de inversión que se ha realizado en este estudio.

Es importante mencionar que estos costes se refieren a la vía con balasto, siendo muy superiores a los costes de mantenimiento de la vía en placa. Tras el análisis de los estudios citados anteriormente puede afirmarse que los costes de mantenimiento de la vía en placa son claramente inferiores a los de vía sobre balasto, entre el 15% y el 30% de los costes totales de vía sobre balasto.

3.3.2.4.2 Coste de electrificación

Este apartado tiene como objetivo cuantificar económicamente las instalaciones de electrificación, tanto la línea aérea de contacto como la alimentación de la misma mediante subestaciones de tracción eléctrica y centros de auto-transformación. Además, tiene por objetivo relacionar este coste con la velocidad máxima a la que circulará el material rodante.

Se limita el alcance del estudio debido a la variabilidad de los sistemas existentes. Por tanto, la electrificación considerada será 2x25kV en corriente alterna y frecuencia industrial de 50Hz, también llamado sistema dual, por ser hoy en día el sistema mayoritariamente empleado en líneas de alta velocidad.

Este sistema funciona generalmente con un transformador A:T:/50kV monofásico cuyo arrollamiento secundario consta de una toma intermedia, de forma que entre esta toma intermedia y las tomas extremas hay una tensión de 25kV.

A continuación, se muestra el esquema del sistema eléctrico considerado (Figura 88):

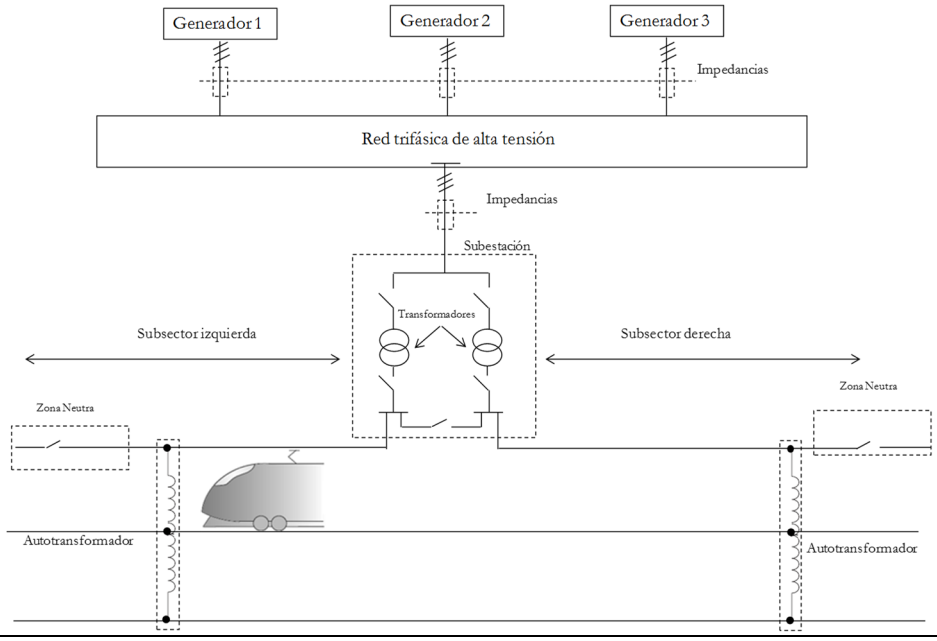


Figura 88. Estructura de la electrificación considerada.

Fuente: Elaboración propia con información de (Pilo de la Fuente, E., 2003).

Una de las diferencias que presenta este sistema con el sistema 1x25kV, entre otras muchas, es que aproximadamente cada 12 kilómetros de vía se incluyen unas instalaciones conocidas como centros de auto-transformación. Los centros de auto-transformación son instalaciones cuya principal función consiste en reducir la tensión de transporte para adecuarla al rango de valores admisibles correspondientes al material rodante. Otra función consiste en evitar el retorno de corriente por la vía en tramos donde no circula el tren, obligando así a la corriente a retornar por el feeder negativo en el resto de los tramos.

Una de las grandes ventajas de este sistema con respecto al sistema de 1x25kV reside en la posibilidad de situar las subestaciones a mayor distancia (en torno a 70km). Desde el punto de vista económico, este hecho supone un gran ahorro, ya que se reduce casi a la mitad el número de subestaciones (el sistema 1x25kV precisa de una subestación aproximadamente cada 35 kilómetros). Sin embargo, el sistema 2x25kV necesita mayor inversión en equipos que el resto de sistemas, pues al coste de las subestaciones hay que añadirle el de los centros de auto-transformación.

Elegir entre un sistema u otro en función del coste económico es una tarea complicada, la diferencia entre ambos sistemas es muy pequeña. El hecho de tener menos instalaciones (mayor distancia entre ellas) supone una reducción en el coste, pero si el coste de cada una de ellas es mayor, puede llegar a no compensar este sistema. En el proyecto *"Cálculo mecánico de la catenaria de la línea de alta velocidad Madrid-Galicia"* (Barcenilla Torres, 2010), se relaciona el coste económico de los sistemas 1x25kV y 2x25kV en función de la distancia del recorrido, obteniendo la siguiente figura (Figura 89).

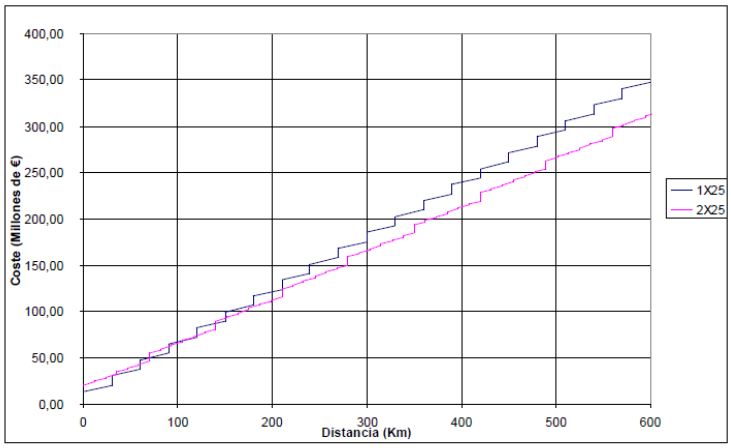


Figura 89. Comparativa económica entre la electrificación a 1x25 kV y a 2x25 kV.

Fuente: (Barcenilla Torres, 2010).

Esta gráfica demuestra que, a partir de 100 kilómetros de línea, el sistema 2x25kV es más económico que el sistema 1x25kV, diferencia que se va incrementando a medida que aumenta la longitud del recorrido.

A continuación, se definirá los diferentes elementos que componen el sistema 2x25kV y el coste asociado a ellos.

Efecto de la velocidad máxima en el coste de las subestaciones eléctricas de tracción y centros de auto-transformación

Las subestaciones son las instalaciones encargadas de realizar la conexión de la red trifásica de transporte con los tramos de electrificación ferroviaria. Estas instalaciones se componen, además de todos los elementos de protección, de 2 transformadores monofásicos iguales, cuyo primario se conecta entre dos fases diferentes de la red eléctrica de alta tensión (220kV o 400kV), mientras que el secundario tiene una tensión de 55kV. Además, presentan una toma intermedia de 27,5kV.

El estudio del dimensionamiento eléctrico determina el emplazamiento y la potencia de las subestaciones en función de una serie de criterios que tienen como objetivo mantener unos valores de tensión determinados, marcados en la norma UIC-600[25].

Tabla 79. Rango de tensiones admisibles según la norma UIC-600

	Tensión (V)				
	Nominal	Mínima Instantánea	Mínima Mantenida	Máxima Mantenida	Máxima Instantánea
Corriente continua	600	-	400	720	770
	750	-	500	900	950
	1.500	-	1.000	1.800	1.950
	3.000	-	2.000	3.600	3.900
Corriente alterna	15.000	11.000	12.000	17.250	18.000
	25.000	17.500	19.000	27.500	29.000

Fuente: Elaboración Propia a partir de la norma UIC-600.

[25] UIC-600: Electric traction with aerial contact line.

Debido a que las subestaciones, como ya se comentó anteriormente, suelen estar distribuidas cada 70 kilómetros, para una línea dada y a falta de otra serie de datos (como es el caso de la localización de la red pública de alimentación de energía eléctrica), se puede estimar el número de subestaciones dividiendo la longitud total de la línea entre 70 kilómetros. A la hora de determinar los costes de los elementos que alimentan la catenaria es importante considerar también los centros de auto-transformación.

Puede afirmarse que el coste del sistema de alimentación (subestaciones y centros de auto-transformación) es el resultado de sumar un coste fijo *($C_{s_CAT_f}$)*, un coste variable *($C_{s_CAT_v}$)* y un coste adicional relacionado con las acometidas a la red de transporte *(C_{s_acom})*.

$$C_{alim} = C_{s_CAT_f} + C_{s_CAT_v} + C_{s_acom} \quad (3.\ 52)$$

Coste fijo de la subestación y centros de auto-transformación ($C_{s_CAT_f}$)

Corresponde a todos aquellos elementos o subsistemas que son independientes de la velocidad máxima a la que se diseñe la línea. Se tratan, por ejemplo, de seccionadores, autoválvulas, transformadores de medida, protecciones, explanaciones y canalizaciones, comunicaciones, así como la mano de obra y los materiales necesarios para la construcción.

El cuadro de precios de los elementos que componen el coste fijo de una subestación se muestra a continuación (Tabla 80):

Tabla 80. Coste fijo de una subestación de tracción en euros (año 2011).

Subestación eléctrica de tracción	€/(S/E) año 2002	€/(S/E) Acualizados Oct 2011
Ingeniería de diseño	100.000	126.570
Interruptores y seccionadores de A.T	700.000	885.990
Transformadores de medida y equipos de A.T	410.000	518.937
Estructuras metálicas y embarrados de parque de A.T	380.000	480.966
Comunicaciones, protecciones y cuadros de parque de A.T	460.000	582.222
Montaje y puesta en marcha del parque de A.T	205.000	259.469
Interruptores, seccionadores y celdas de 25 kV	390.000	493.623
Material de instalación de 25 kV	205.000	259.469
Cuadros y protecciones de 25 kV	360.000	455.652
Montaje y puesta en marcha de instalación de 25 kV	150.000	189.855
Explanaciones y canalizaciones para la ejecución de las subestaciones	310.000	392.367
Edificio Técnico	100.000	126.570
	Total	4.771.691

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los costes fijos de un centro de auto-transformación, no se diferencian mucho a los atribuibles a los que una subestación presenta, teniendo en cuenta que son instalaciones más pequeñas y con menos elementos (protecciones…). Estos costes fijos pueden resumirse como aquellos que se muestran en la siguiente tabla (Tabla 81).

Tabla 81. Coste fijo de una subestación de tracción (año 2011).

Autotrafo	Coste año 2002 (€)	Acualizados Oct 2011 (€)
Ingeniería de diseño	10.000	12.670
Material de instalación	120.000	152.040
Cuadros y protecciones	300.000	380.100
Montaje y puesta en marcha de la instalación	90.000	114.030
	Total	658.840

Fuente: Elaboración propia.

Coste variable de la subestación y centros de auto-transformación ($C_{s_CAT_v}$)

Como se ha demostrado en capítulos anteriores, la longitud de una línea es función de su velocidad máxima (una mayor velocidad conlleva a una línea menos sinuosa) y, por lo tanto, indirectamente esta velocidad está determinando el número de instalaciones que son necesarias para la explotación.

Aunque la relación longitud de línea y velocidad máxima es clara, no es la única, la potencia de los transformadores es un parámetro que también presenta una relación directa con la velocidad máxima de diseño. La potencia necesaria que debe tener la subestación es función de la potencia que va demandar el material motor y ésta, a su vez, depende de la velocidad máxima de los trenes. Por lo tanto, para una velocidad máxima considerada se precisará una determinada potencia que deberá ser suministrada desde la subestación.

En la tabla que se presenta a continuación (Tabla 82) se muestra la relación entre la potencia de un tren y velocidad máxima.

Tabla 82. Relación entre la velocidad máxima y la potencia de determinados trenes.

Serie de Tren	Velocidad Máxima	Potencia	Serie de Tren	Velocidad Máxima	Potencia
s100 y s101	300	8.800	s440	140	1.160
TGV Duplex	320	8.800	s450	140	2.960
s103	350	8.800	s449	160	2.400
AGV	300	8.640	s446	100	2.400
s102 y s112.1 (G3)	330	8.000	s447	120	2.400
Avril	330	8.000	s465 (Civia)	120	2.200
s130	250	4.800	s464 (Civia)	120	2.100
s104	250	4.400	s463 (Civia)	120	1.400
s120	250	4.000	s592	160	1.352
s121	250	4.000	s594	160	1.200
s130H Régimen diésel	250	3.600	s470	160	1.160
130H Régimen electrico	250	2.400	s448	160	1.160
s490	220	1.950	s596	120	320

Fuente: Elaboración propia con datos de Renfe.

Una subestación alimenta a una parte de la línea, el llamado cantón eléctrico. Si dentro de este cantón eléctrico circula un mayor número de trenes, la subestación necesitará mayor potencia para alimentar a todos ellos y, por lo tanto, conocer el intervalo entre trenes es un input necesario para el dimensionamiento de estas instalaciones. Si nos ceñimos a la normativa vigente que especifica la manera de dimensionar una subestación, se considera un intervalo de un tren cada 3 minutos (ambos sentidos).

Además, en cuanto a potencia, también debe considerarse el caso más desfavorable de entre todos los trenes que circularán en esta infraestructura. Por ejemplo, si circulan trenes de alta velocidad a 350km/h y trenes a una velocidad de 250km/h, siempre se dimensionará para trenes de velocidades máximas 350km/h. Adicionalmente, será necesario considerar unas tolerancias o coeficientes de seguridad bastante amplios para asegurar la alimentación de la subestación en situaciones degradadas o para asegurar la alimentación en el caso, por ejemplo, de la circulación de trenes en doble composición.

Conociendo la tipología de los trenes que van a circular por la infraestructura, se conoce también la potencia necesaria para dimensionar la subestación, pero si el tren no es conocido, es posible calcular la potencia del mismo sabiendo de antemano la velocidad máxima a la que circulará. El cálculo de esta potencia de un tren se realiza mediante la siguiente expresión (García Álvarez, 2011b):

$$P = \left(A + B \times V_{max} + C \times V_{max}^2 + \frac{M}{10} \times g \times \alpha\right) \times \frac{V_{max}}{360} \qquad (3.\ 53)$$

Donde:

- P: potencia del tren (kW).
- V_{max}: velocidad máxima del tren (km/h).
- A: componente de la resistencia al avance debida a las resistencias mecánicas (daN).
- B: componente de la resistencia al avance debida a la resistencia a la entrada de aire (daN/(km/h).
- C: componente de la resistencia al avance debida a la resistencia aerodinámica (daN/(km/h)^2).
- M: masa del tren cargado (t); g: gravedad (m/s^2).
- □: rampa (mm/m).

Cada subestación dispone de dos transformadores de potencia y cada uno de ellos alimenta alrededor de 35 kilómetros de línea, incluyendo ambos sentidos de vía, ya que en condiciones normales las dos catenarias están alimentadas en paralelo. Con estas premisas y conocido el intervalo (tren cada tres minutos) y la potencia de los trenes (se aplica la metodología ecuación (3. 53)), es posible determinar la potencia necesaria de cada transformador y, por lo tanto, también la potencia de la subestación.

En la tabla que se muestra a continuación (Tabla 83) se indica la potencia de la subestación necesaria para alimentar a los trenes que circulan por el cantón eléctrico en función de su velocidad máxima.

Tabla 83. Potencia de la subestación en función de la velocidad máxima del tren.

Velocida máxima (km/h)	Potencia (kW)	Nº Trenes en cantón	Potencia Tranformador (ambos sentidos) (kVA)	Potencia Subestación (MVA)
500	20.590,9	1	98.274,8	197
480	18.328,4	1	91.121,3	182
460	16.239,3	2	84.245,4	168
440	14.316,6	2	77.647,1	155
420	12.553,5	2	71.326,4	143
400	10.942,7	2	65.283,4	131
380	9.477,5	2	59.517,9	119
360	8.150,8	2	54.030,1	108
340	6.955,7	2	48.819,8	98
320	5.885,1	2	43.887,2	88
300	4.932,1	2	39.232,2	78
280	4.089,6	3	34.854,8	70
260	3.350,8	3	30.755,1	62
240	2.708,7	3	26.932,9	54
220	2.156,2	3	23.388,4	47
200	1.686,4	4	20.121,4	40

Fuente: Elaboración propia.

Aunque esta justificación de cálculo de potencias sea simplista, está considerada por la práctica como válida, independientemente de que posteriormente se compruebe mediante simulación la exactitud de los resultados.

Conocida la potencia necesaria para el dimensionamiento de las subestaciones, sólo queda por conocer el coste de los transformadores en función de su potencia.

No existe una gran variabilidad de subestaciones instaladas (ni dimensionadas) hoy en día en la red ferroviaria española con tecnología igual que la considerada en esta sección (véase Figura 90).

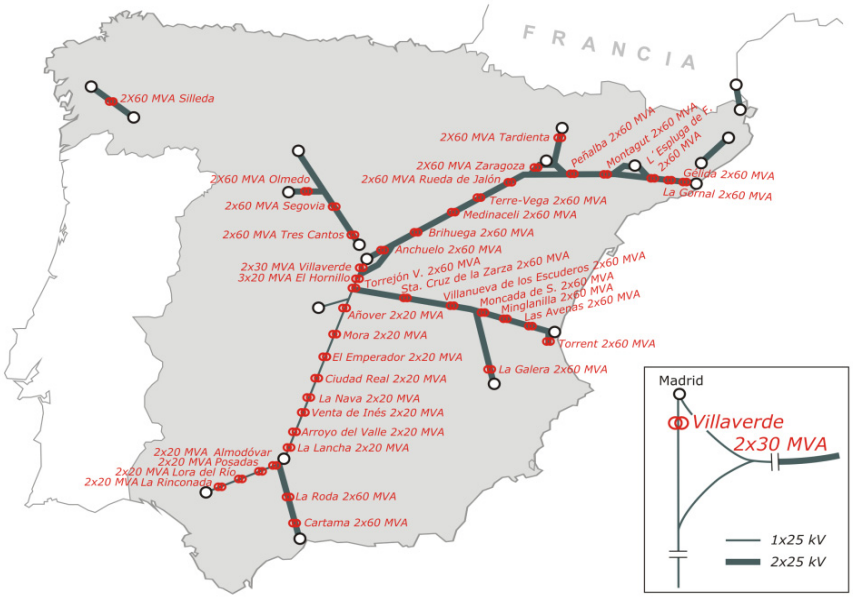


Figura 90. Subestaciones y potencia de la red ferroviaria de alta velocidad española

Fuente: Luis E. Mesa Santos.

Es claro que, a mayor potencia del transformador, mayor coste. Puede afirmarse que el coste de un transformador depende de la cantidad de hierro y cobre con el que esté fabricado y es conocido que, a mayor potencia, el transformador precisa de una mayor cantidad de cobre y de hierro y, por lo tanto, mayor precio unitario.

Existen otros factores que también afectan al coste, como a cualquier otro producto, el precio no se fija en función del coste de fabricación, sino en función de cuánto esté dispuesto a pagar el cliente. También es necesario cuantificar el coste de oportunidad que asume el fabricante que, en este caso, depende principalmente del número de transformadores que tiene que fabricar y de la disponibilidad de la factoría para fabricarlos. Ambos factores que afectan al coste son difícilmente cuantificables, de ahí que este estudio se centre solamente en la relación entre precio y potencia.

Para ello, se han analizado diferentes estudios informativos en busca de la relación precio-potencia de aquellos transformadores que han sido seleccionados para la construcción de las líneas de alta velocidad en servicio. De este análisis se han obtenido una serie de precios unitarios que han sido representados en la gráfica que se muestra a continuación (Figura 91).

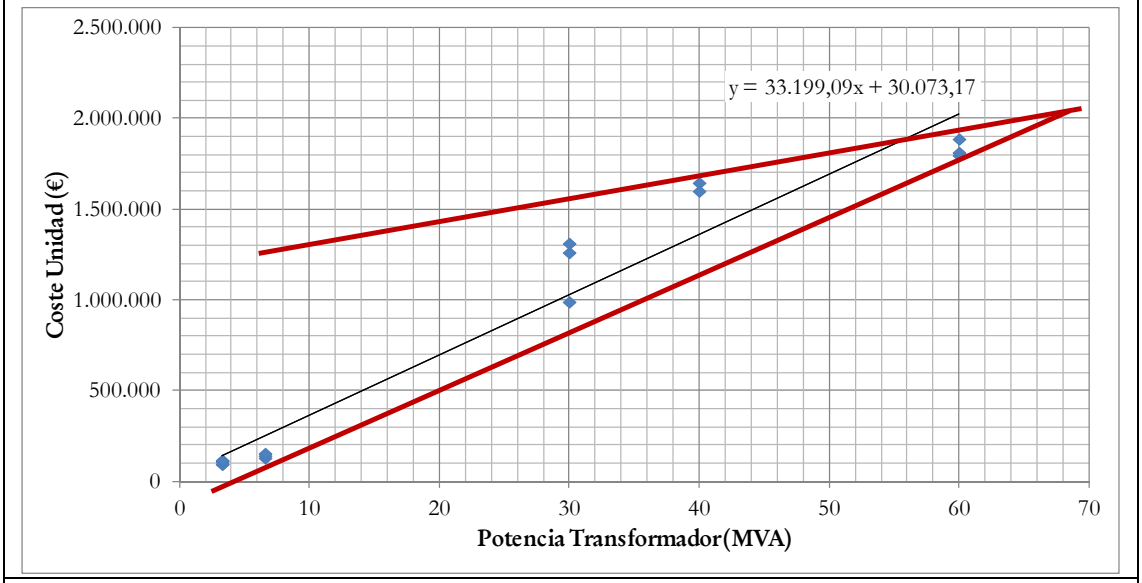


Figura 91. Relación entre el coste y la potencia de una serie de transformadores de tracción

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el precio del transformador aumenta a medida que aumenta la potencia. Los datos obtenidos se pueden agrupar en un rango de precios (envolvente de precios) que se enmarcan gráficamente entre dos rectas, indicando los límites máximos y mínimos. Si se utilizan estos costes máximos y mínimos, se obtiene el rango de precios de los transformadores de la subestación (véase Tabla 84).

Tabla 84. Coste de una subestación en función de la velocidad máxima de diseño.

Velocida máxima *(km/h)*	Potencia Subestación (MVA)	Coste de la Subestación máximo (M€/ud)	Coste de la Subestación minimo (M€/ud)
500	197	6,017	3,767
480	182	5,570	3,577
460	168	5,140	3,393
440	155	4,728	3,217
420	143	4,333	3,049
400	131	3,955	2,888
380	119	3,595	2,734
360	108	3,252	2,587
340	98	2,926	2,449
320	88	2,618	2,317
300	78	2,327	2,193
280	70	2,076	2,053
260	62	1,967	1,797
240	54	1,865	1,558
220	47	1,770	1,337
200	40	1,683	1,133

Fuente: Elaboración propia.

Se ha calculado un rango de coste para cada velocidad máxima y, además, se estima el efecto de la velocidad en el coste medio. En definitiva, se puede asumir que el coste medio variable de una subestación puede calcularse con la siguiente expresión (3. 54):

$$C_{s,v} = 33.199 \times P_t + 30.073 \quad (3.\ 54)$$

Donde:

- $C_{s,v}$: Coste variable de la subestación (€).
- P_t: Potencia del transformador (MVA).

En cuanto a los centros de auto-transformación su dimensionamiento es similar al de las subestaciones, pues depende del horario de circulación de los trenes, potencia del material motor, velocidades máximas de circulación, perfil de la línea…

Por norma se asume que la potencia necesaria será la mitad de la potencia máxima de los trenes que puedan encontrarse en el cantón y, por lo tanto, al igual que se hizo en el caso de las subestaciones, es preciso determinar el número de trenes que circularán en la "zona" que atiende cada centro de auto-transformación para después calcular la potencia necesaria.

En la tabla que se muestra a continuación (Tabla 85), se exponen los resultados obtenidos.

Tabla 85. Potencia necesaria del autotransformador en función de la velocidad máxima del tren.

Velocida máxima *(km/h)*	Potencia Tren *(kW)*	Nº Trenes en cantón	Potencia Tranformador *(MVA)*
500	20.590,9	1	14,0
480	18.328,4	1	12,5
460	16.239,3	1	11,1
440	14.316,6	1	9,8
420	12.553,5	1	8,6
400	10.942,7	1	7,5
380	9.477,5	1	6,5
360	8.150,8	1	5,6
340	6.955,7	1	4,7
320	5.885,1	1	4,0
300	4.932,1	1	3,4
280	4.089,6	1	2,8
260	3.350,8	1	2,3
240	2.708,7	1	1,8
220	2.156,2	1	1,5
200	1.686,4	1	1,1

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en las subestaciones, a medida que la velocidad aumenta, la potencia necesaria tiene que ser mayor y, por lo tanto, el precio también se incrementa. Las potencias empleadas en el dimensionamiento de los transformadores en la red ferroviaria española de alta velocidad son de 10MVA y de 15MVA con unos precios medios de:

- 10MVA 100.000€
- 15MVA 180.000€

Como se observa en la Tabla 85, hasta 440km/h podrían emplearse transformadores de potencia de 10MVA, a partir de esta velocidad hasta 500km/h potencias de 15MVA. De esta forma quedaría perfectamente dimensionada la instalación eléctrica.

Coste de acometida a la red de alta tensión (C_{s_acom})

La conexión de la red trifásica de alta tensión con el sistema ferroviario se realiza con una línea que en definitiva conecta la subestación de tracción (red ferroviaria) con una subestación de transporte o distribución (red eléctrica que puede ser de 220kV o 400kV).

Uno de los factores que incrementa el coste de electrificación de forma considerable es la distancia que existe entre las subestaciones de tracción y las subestaciones pertenecientes a la red de transporte. La distancia media de estas redes en España es de 10 kilómetros según (Pilo de la Fuente, E., 2003).

Esta conexión se realiza a través de la instalación de 2 acometidas trifásicas (una de las tres fases de cada acometida no alimentará a la subestación por ser ésta bifásica), constituidas por cables aéreos. El coste depende del tipo de tensión de alimentación y recoge estos valores por kilómetro (Pilo de la Fuente, E., 2003):

- Líneas 400 kV, DC= 91.000 €/km.
- Líneas 220 kV, DC = 69.000 €/km.

Por lo tanto, el coste medio de las acometidas es de:

- $C_{Líneas\ 400\ kV,\ DC}$= 91.000 €/km x 10 km = 910.000 €/Subestación.

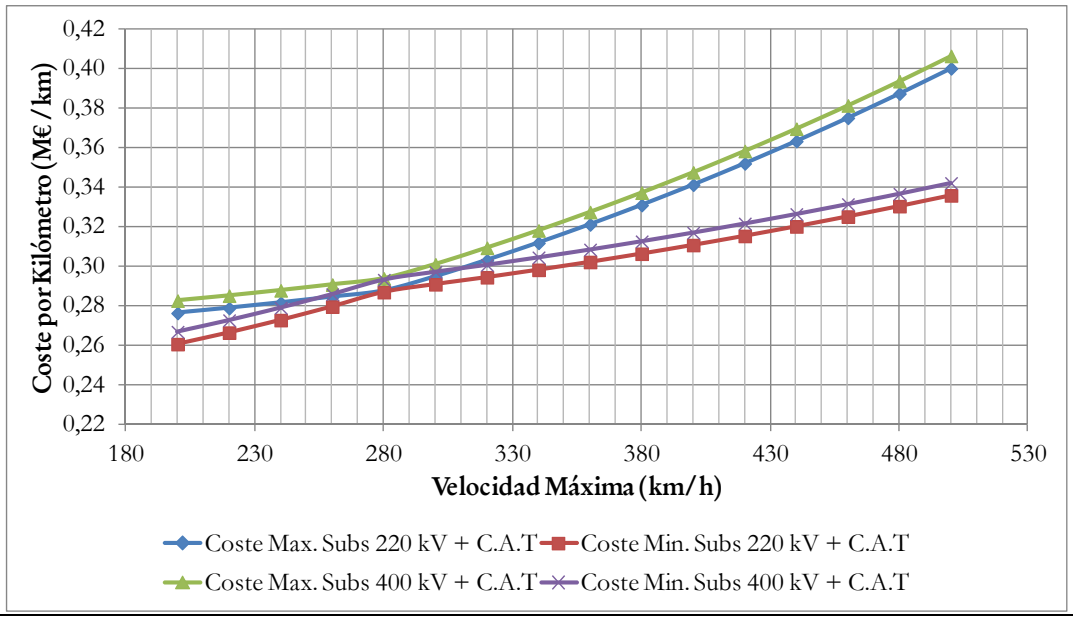
- $C_{Líneas\ 220\ kV,\ DC}$ = 69.000 €/km x 10 km = 690.000 €/Subestación.

Tras el análisis realizado puede afirmarse que el coste que engloba todos los sistemas de alimentación de la catenaria (subestación, acometida a la red y los centros de auto-transformación), tiene una componente fija, independiente de la velocidad, y otra componente variable, claramente relacionada con la velocidad máxima.

A continuación y como resumen de este subcapítulo, se muestra una tabla (Tabla 86) y una gráfica en las que se exponen los costes por kilómetro obtenidos en función de la velocidad.

Tabla 86.Costes en M€ de la subestación más la acometida a la red y de los centros de auto-transformación por kilómetro (año 2011).

Velocida máxima (km/h)	Coste total por kilómetro Coste Variable+Fijo+C.A.T+Acometida			
	Subs 220 kV + C.A.T		Subs 400 kV+ C.A.T	
	Máximo (M€/km)	Mínimo (M€/km)	Máximo (M€/km)	Mínimo (M€/km)
500	0,40	0,34	0,41	0,34
480	0,39	0,33	0,39	0,34
460	0,37	0,32	0,38	0,33
440	0,36	0,32	0,37	0,33
420	0,35	0,32	0,36	0,32
400	0,34	0,31	0,35	0,32
380	0,33	0,31	0,34	0,31
360	0,32	0,30	0,33	0,31
340	0,31	0,30	0,32	0,30
320	0,30	0,29	0,31	0,30
300	0,29	0,29	0,30	0,30
280	0,29	0,29	0,29	0,29
260	0,28	0,28	0,29	0,29
240	0,28	0,27	0,29	0,28
220	0,28	0,27	0,28	0,27
200	0,28	0,26	0,28	0,27



Fuente: Elaboración propia.

Los costes aquí obtenidos están en línea con los costes por kilómetro soportados por el administrador de la infraestructura español en diferentes proyectos ferroviarios dimensionados para 350km/h (0,32-0,437 M€/km)[26].

Como resumen, puede afirmarse que los costes medios del sistema de alimentación eléctrica de una infraestructura ferroviaria son función dependiente de la velocidad y pueden estimarse a partir de la siguiente expresión (3. 55):

$$C_{alim} = 0{,}0003 \times V_{max} + 0{,}1988 \qquad (3.\ 55)$$

Donde:

- C_{alim}: costes medios del sistema de alimentación eléctrica *(M€/km)*.
- V_{max}: velocidad máxima de diseño *(km/h)*.

Efecto de la velocidad máxima en el coste de la línea aérea de contacto (catenaria)

La catenaria corresponde a la línea aérea (conjunto de conectores) que permite el transporte de la energía eléctrica para alimentar el material móvil. El sistema de alimentación adoptado, como se ha expuesto anteriormente es de 2x25kV, hecho que no influye en las características constructivas de la catenaria, pero sí en la sección de los cables (no se empleará el mismo hilo de contacto para alimentar a 3.000V que para alimentar a 25.000V).

La catenaria está formada por: hilo de contacto, sustentador, feeder positivo, raíles (conductores de neutro), cables de retorno y en el caso de los sistemas duales, el feeder negativo (Figura 92).

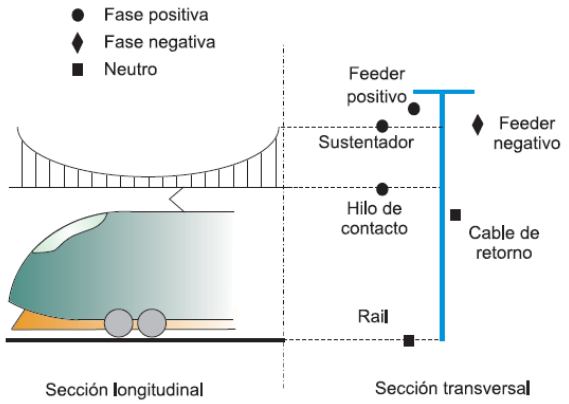


Figura 92. Configuración trasversal de la catenaria

Fuente: (Pilo de la Fuente, E., 2003).

En este tipo de catenaria la corriente circula por los conductores positivos y retorna por los conductores de neutro (además de una parte retorna por tierra). La diferencia del sistema 2x25kV en relación a los demás sistemas es que la mayor parte de la corriente retorna por el feeder negativo y esto hace que se incremente el coste.

La diferencia en coste entre el sistema 2x25kV y el sistema 1x25kV no es tan grande como puede parecer en un primer momento, pues en el sistema 1x25kV el número de

[26] Véase resumen de costes en:

http://www.ferropedia.es/wiki/Costos_de_construcci%C3%B3n_de_infraestructura#Resumen_de_costos_en_v.C3.ADa_doble_para_220_a_350_km.2Fh

zonas neutras es mayor y, por lo tanto, el número de seccionadores necesarios aumenta, encareciéndose así el coste por kilómetro.

La catenaria empleada será aquella capaz de soportar el flujo de potencias que demandan los trenes y como la potencia depende de la velocidad máxima del material rodante, indirectamente el coste de la misma variará con la velocidad. Se puede considerar que el coste total de la catenaria está formado por dos costes, uno fijo y otro variable:

$$C_{cat} = C_{c,fijo} + C_{c,variable} \quad (3.\ 56)$$

Coste fijo de la línea aérea de contacto ($C_{c,fijo}$)

El coste fijo corresponde a los costes asociados a la construcción, instalación y a los equipos necesarios para el funcionamiento de la misma. Se suponen una serie de elementos necesarios para construir una línea aérea ferroviaria, comunes sea cual sea la potencia, frecuencia y tensión de alimentación, por ejemplo, los postes, apoyos ménsulas… Estos elementos se consideran comunes sea cual sea la tecnología con la que se electrificará la infraestructura y, sobretodo, se consideran fijos sea cual sea la velocidad de los trenes.
La tabla que se muestra a continuación (Tabla 87) refleja el coste de los diferentes elementos que son fijos e independientes de la velocidad máxima. Al igual que en el caso de las subestaciones y de los centros de auto-transformación, han sido obtenidos de diferentes estudios informativos de líneas ferroviarias de alta velocidad españolas:

Tabla 87. Costes fijos asociados a la construcción de la catenaria (año 2011).

Catenaria a cielo Abierto				
	Año 2002			ActualizadoOct-2011
	Coste por Unidad (€)	Costes fijos por kilómetro (€/km) 1 sentido	Costes fijos por kilómetro (€/km) 2 sentidos	Costes fijos por kilómetro (€/km) 2 sentidos
Cimentaciones	800	14.400	28.800	36.288 (*)
Postes	950	17.100	34.200	43.092 (*)
Mensulas y accesorios	1.350	24.300	48.600	61.236 (*)
Feeder de acompañamiento y de retorno	-	15.000	30.000	37.800
Cable de tierra	-	4.500	9.000	11.340
Porcentaje de elementos de compensación	-	8.500	17.000	21.420
Porcentaje de pórticos, anclajes seccionadore, etc	-	4.500	9.000	11.340
Protecciones (Pararrayos, señales, toma de tierra, aisladores)	-	10.500	21.000	26.460
Total		**98.800**	**197.600**	**248.976**
Catenaria en túnel				
	Coste por Unidad (€)	Costes fijos por kilómetro (€/km) 1 sentido	Costes fijos por kilómetro (€/km) 2 sentidos	Costes fijos por kilómetro (€/km) 2 sentidos
Elementos de sujeción a paramenta en túnel	850	15.300	30.600	38.556 (*)
Elementos de atirantados y accesorios	600	10.800	21.600	27.216 (*)
Feeder de acompañamiento y de retorno	-	15.000	30.000	37.800
Porcentaje de elementos de compensación	-	8.500	17.000	21.420
Protecciones (Pararrayos, señales, toma de tierra, aisladores)	-	9.000	18.000	22.680
Total		**58.600**	**117.200**	**147.672**

**Cada 65 metros*

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo es necesario distinguir entre los kilómetros que discurren a cielo abierto y los que discurren en túnel, debido a que el número de elementos empleados no es el mismo y, por lo tanto, el coste es diferente, como puede observarse en la tabla (Tabla 87).

Coste variable de la línea aérea de contacto ($C_{c,variable}$)

Una de las dificultades que presenta el diseño de la electrificación ferroviaria es que los consumos de potencia no se reparten uniformemente a lo largo de la línea. En el caso que se está analizando en esta tesis, se considerará un tráfico determinado (el caso más restrictivo; un tren cada 3 minutos) y se dimensionará la catenaria, al igual que se ha hecho con las subestaciones, que sea capaz de alimentar a las potencias demandadas, potencias que dependen de la velocidad.

Como la tensión de alimentación es la misma y tiene que mantenerse dentro de un rango de valores (Ficha UIC-600), al variar la potencia demandada (debido a las diferentes velocidades consideradas en un cantón eléctrico), la intensidad tiene que variar. Por ejemplo, si se incrementa la velocidad máxima, la potencia de los trenes que circularán es mayor y, por tanto, la potencia de la subestación también será mayor incrementándose la corriente (intensidad) que circula por el cable. Al incrementarse la corriente, es necesario emplear cables con mayor sección (los conductores están diseñados de modo que son capaces de conducir las corrientes que se originan al paso de los trenes en las condiciones más desfavorables sin un calentamiento excesivo).

El principal material empleado para la fabricación de los cables de contacto es el cobre, que puede ser aleado dependiendo de las características eléctricas, con plata, magnesio, etc. Por lo tanto, el precio del cable aumenta al aumentar su sección, siendo las principales secciones utilizadas para los hilos de contacto 170, 150, 110, 107, 100 y 80 mm^2.

Una forma de afrontar este apartado es suponiendo unas características diferentes de los hilos de contacto y demás elementos que conforman la catenaria, en función de la velocidad máxima de diseño, para posteriormente asignar un coste medio por metro a cada uno de ellos.

A continuación se muestra el tipo de catenaria seleccionada para cada rango de velocidades (Tabla 88):

Tabla 88. Tipos de catenaria y de los diferentes elementos que la componen) según velocidad máxima

Velocida máxima	Hilo de Contacto (mm^2)	Sustentador (mm^2)	Péndolas (mm^2)	Cable de retorno (mm^2)	Feeder positivo (mm^2)	Feeder negativo (mm^2)
V<100 km/h	107	95	25	L110	L110	-
100 km/h ≤ V≤ 200 km/h	107	95	25	L110	LA110	LA110
200km/h < V≤ 300 km/h	120	95	25	LA110	LA110	LA280
300 km/h < V≤ 380 km/h	150	95	25	LA110	LA110	LA280
V>380 km/h	170	95	25	LA110	LA110	LA380

Fuente: Elaboración propia.

Se entiende que la elección de una determinada catenaria con un hilo sustentador, hilo de contacto, feeder… es una decisión del planificador. Existen múltiples combinaciones que permitirían dimensionar una catenaria determinada en función de la velocidad, pero todas ellas reflejarían que a medida que se aumenta la velocidad máxima, la sección de los diferentes elementos (cables) debe ir aumentando. Aquí se ha seleccionado un tipo de catenaria diferente para cada una de las velocidades consideradas teniendo en cuenta los diferentes estudios informativos analizados, pero cabe destacar que, pueden encontrarse proyectos que empleen una combinación de elementos diferente para el dimensionamiento de la catenaria.

Conocidos los costes por kilómetro de los diferentes elementos seleccionados para el dimensionamiento de la catenaria en función de las diferentes velocidades, se puede determinar el precio de la misma por kilómetro (Tabla 89).

Tabla 89. Velocidad máxima y costes de catenaria.

Velocida máxima	Hilo de Contacto (mm^2)	Precio (€/m)	Sustentador (mm^2)	Precio (€/m)	Péndolas (mm^2)	Precio (€/m)	Cable de retorno (mm^2)	Precio (€/m)	Feeder positivo (mm^2)	Precio (€/m)	Feeder negativo (mm^2)	Precio (€/m)	Precio Total (€/km)
V<100 km/h	107	9,06	95	6,78	25	2,95	L110	1,59	L110	1,59	-	0	**21.970**
100 km/h ≤ V ≤ 200 km/h	107	9,06	95	6,78	25	2,95	L110	1,59	LA110	1,69	LA110	1,69	**23.760**
200km/h < V ≤ 300 km/h	120	10,19	95	6,78	25	2,95	LA110	1,69	LA110	1,69	LA280	3,82	**27.120**
300 km/h < V ≤ 380 km/h	150	12,83	95	6,78	25	2,95	LA110	1,69	LA110	1,69	LA280	3,82	**29.760**
V>380 km/h	170	13,73	95	6,78	25	2,95	LA110	1,69	LA110	1,69	LA380	5,95	**32.790**

Fuente: Elaboración propia.

Conocidos el coste fijo y el variable por kilómetro, puede resumirse que:

- Velocidad < 100km/h el coste por kilómetro es de 0,271 M€/km.
- 100km/h<Velocidad<200km/h el coste por kilómetro es 0,273 M€/km.
- 200km/h<Velocidad<300km/h el coste por kilómetro es de 0,276 M€/km.
- 300km/h<Velocidad<380km/h el coste por kilómetro es de 0,279 M€/km.
- Velocidad > 380km/h el coste por kilómetro es de 0,282 M€/km.

Conclusiones: costes de electrificación en función de la velocidad máxima de diseño

Si se recopila y se agregan los resultados obtenidos en el sistema de alimentación (subestaciones, centros de autotransformación…) y los obtenidos en el caso de la instalación de la línea aérea de contacto, se obtiene los costes atribuibles a la electrificación en función de la velocidad (Figura 93).

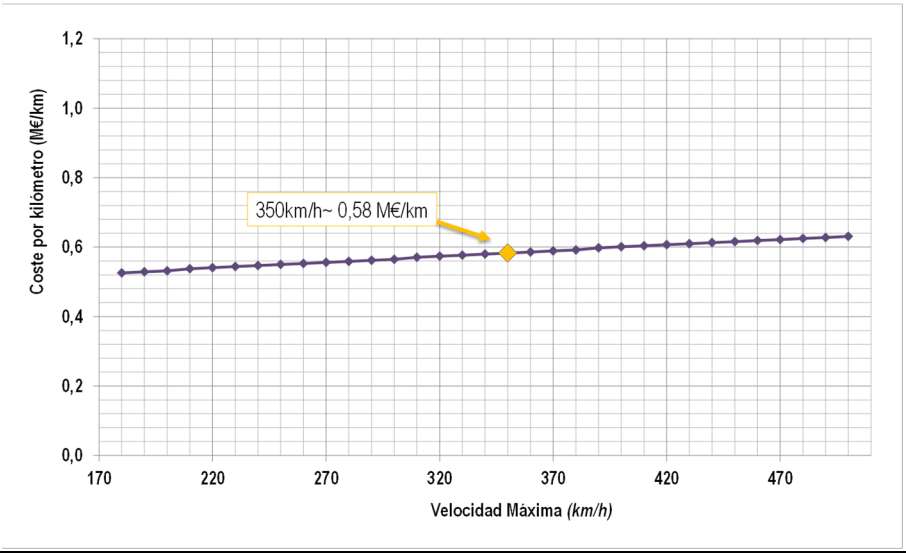


Figura 93. Costes totales de electrificación en función de la velocidad máxima de diseño (año 2011).

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el coste se incrementa linealmente con la velocidad máxima de diseño, los valores están dentro de un rango con límite inferior de 0,5M€/km para 200km/h y límite superior de 0,63M€/km para 500km/h, destacándose también que el coste de electrificación para velocidades máximas de 350km/h es de aproximadamente de 0,6 M€/km.

La ecuación que permite la cuantificación del coste de electrificación en función de la velocidad máxima de diseño, obtenida a partir de los resultados alcanzados, es la que se muestra a continuación:

$$C_{elect} = 0{,}0003 \times V_{max} + 0{,}4672 \quad (3.\ 57)$$

Donde:

- C_{elect}: coste por kilómetro de montaje e instalación del sistema de alimentación eléctrico y línea aérea de contacto (electrificación) (M€/km).
- V_{max}: velocidad máxima de diseño (km/h).

Los valores alcanzados, obtenidos a través de la metodología propuesta, están en línea con los resultados obtenidos por otros autores como (Fröidh, 2012), en él se estiman, al igual que se ha realizado en este estudio, los costes de catenaria en función de la velocidad máxima de diseño, como muestra la siguiente figura (Figura 94).

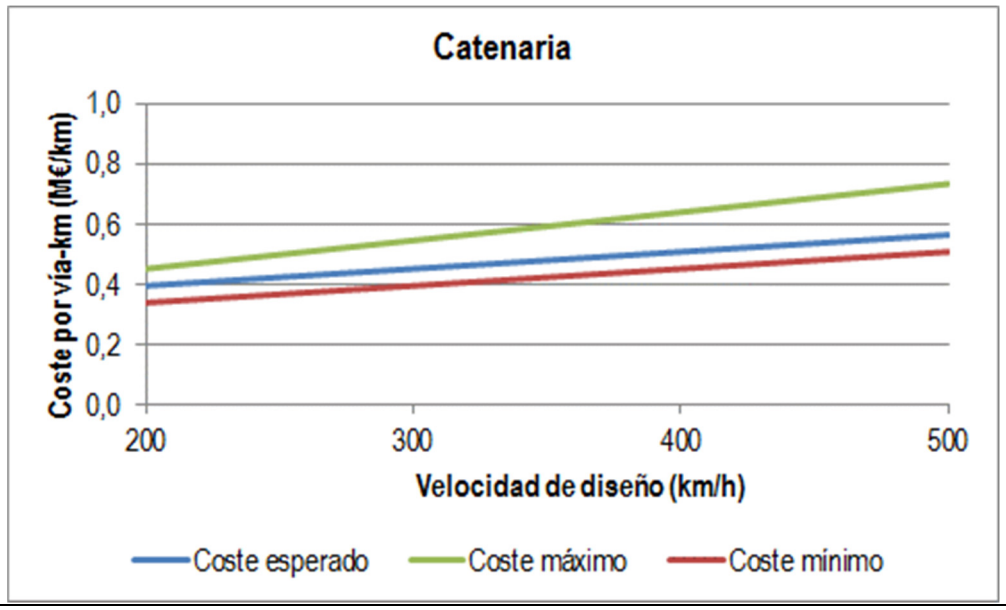


Figura 94. Costes de catenaria que dependen de la velocidad

Nota: los datos para la realización de estas gráficas están extraídos de (Fröidh, 2012) transformados a € con la conversión vigente el 5 de marzo de 2014.

Fuente:(Fröidh, 2012).

Al igual que lo obtenido en esta tesis, se observa que los costes de electrificación se incrementan linealmente con la velocidad máxima y el rango de costes está dentro de lo alcanzado en este estudio (0,4M€/km para 200km/h y 0,6M€/km para velocidades máximas de diseño de 500km/h).

Costes de mantenimiento de la electrificación

El coste de mantenimiento del sistema de electrificación se fija en (Baumgartner. J.P, 2001), al igual que el resto de partidas, como porcentaje de los costes de inversión estableciendo un valor del 2% para el mantenimiento de subestaciones y catenaria, aunque podrían tomarse valores comprendidos entre el 1% y el 3%.

3.3.2.4.3 Costes de las instalaciones: señalización y comunicaciones

Dentro de este apartado se explicarán y cuantificarán económicamente los elementos o subsistemas que forman parte de las instalaciones de seguridad y de las comunicaciones. Se tendrán en cuenta los siguientes subsistemas:

- Sistema de señalización: la línea se dotará de las instalaciones necesarias para posibilitar la operación eficiente de trenes.
- Comunicaciones: se emplearán los elementos necesarios para la gestión y la explotación, así como los medios de transmisión necesarios para la televigilancia y telemando de la señalización y electrificación desde los Centros de Control.

Elementos y componentes del sistema de señalización

El sistema de señalización (con sus elementos e instalaciones) tiene por objeto garantizar la seguridad en el movimiento de los trenes, ya sea en las estaciones o en el propio trayecto entre ellas. En esta tesis, entre los diferentes sistemas de señalización existentes, se ha elegido una determinada tecnología que variará según la velocidad máxima de diseño considerada. Por lo tanto, puede afirmarse que el coste de implantar la señalización variará con la velocidad máxima de diseño, pues a mayor velocidad, sistemas con mayores requerimientos técnicos (generalmente suelen ser más caros).

Este apartado comenzará con la definición de los diferentes elementos que componen el sistema de señalización para acabar con la estimación del coste.

Enclavamientos

El enclavamiento es una instalación esencial para el ferrocarril. Existen zonas en estaciones o terminales donde es necesario realizar operaciones con los trenes, pero para ello, es necesario una disposición de vías, aparatos de vías y elementos de señalización que permitan este movimiento o enrutamiento. Todos los equipos de señalización que controlan estas zonas se denominan enclavamientos y tienen por función establecer de forma segura una ruta dentro de una estación o terminal garantizando la no ocupación, asegurando todos los aparatos de vía e impidiendo el acceso de otros trenes a esa ruta.

En definitiva, el enclavamiento es una instalación que incluye un conjunto de equipos hardware y software, que se dedican a la supervisión y telemando de los elementos de campo (aparatos de vía…) garantizando, de forma segura, un itinerario o ruta.

Los enclavamientos se instalan tanto en las estaciones principales como en los Puestos de Adelantamiento y Estacionamiento de Trenes (PAET). La seguridad exigida es alta y, por lo tanto, se obtiene por medio de un procesamiento doble, gracias a dos sistemas de microprocesadores independientes entre sí que se supervisan mutuamente de forma continua.

En estas instalaciones se dispone de monitores video-gráficos de detalle en los que se representa la topografía de las vías. Los enclavamientos proporcionarán, también, la información necesaria del sistema de protección al tren ATP[27].

Circuitos de vía

Los circuitos de vía son elementos que se utilizan para la detección del tren en un determinado cantón y se basan, fundamentalmente, en la alimentación eléctrica de los carriles (mediante un dispositivo llamado emisor). Existen diferentes tecnologías empleadas en la red ferroviaria española, aquí se considerarán circuitos de vía de audiofrecuencia con juntas de separación, por ser la más empleada en líneas de alta velocidad.

Cables

La conexión eléctrica de los elementos de campo con los enclavamientos y las casetas técnicas, se realiza mediante cables de cobre armados y apantallados. Además, se

[27] Los sistemas ATP supervisan la marcha segura del mismo basándose en la información que reciben de los enclavamientos y las condiciones propias del trazado de la línea.

introduce una red de cables para las señales y accionamientos de aguja de los aparatos de vía, así como en las estaciones y en los PAET, completándose con otra red redundada para la emisión y recepción de los circuitos de vía. Estos cables están dotados de los materiales necesarios para evitar las inducciones provenientes de la catenaria (tensiones inducidas).

Zanjas y canalizaciones

La mayoría de los cables anteriormente mencionados transcurren por las canaletas instaladas a lo largo de la vía y construidas con un criterio común: realizar el mínimo número de cruces.

Edificios técnicos y caseta de señalización

Los edificios técnicos y las casetas de señalización están destinados para contener los equipos necesarios. Los edificios técnicos contienen los elementos de gobierno de los enclavamientos en estaciones y PAET. Estos edificios estarán dotados de equipos de aire, iluminación, sistema de protección y detección contra incendios, mientras que las casetas de señalización son prefabricadas de hormigón armado con aislamiento térmico, apoyadas sobre losa de hormigón.

Sistema de señalización

La tecnología de señalización empleada dependerá, como se ha mencionado anteriormente, de la velocidad máxima, ya que los requerimientos técnicos y de seguridad se incrementan a medida que se incrementa la velocidad máxima de los trenes. Para este estudio se considera dos tipos de sistemas de señalización diferentes según velocidad:

- Para velocidades máximas menores de 200km/h (Vmax<200km/h) el sistema de señalización considerado es el A.S.F.A. El sistema de Anuncio de Señales y Frenado Automático (A.S.F.A) es un sistema de transmisión puntual de información vía-máquina.
- Para velocidades máximas mayores de 200km/h (Vmax>200km/h) se instalará el sistema de señalización ERTMS nivel 2. Este sistema de señalización (ERTMS nivel 2) se basa en un sistema de supervisión continuo de velocidad, donde la autorización de movimientos es enviada vía radio, la detección del tren se realiza mediante circuitos de vía (audiofrecuencia) o contadores de ejes y las funciones de control del tren se realizan en el equipo embarcado del propio tren. Los elementos de este sistema son los siguientes:
  - Eurobalizas: balizas de localización del tren que permiten eliminar los errores del odómetro.
  - Sistemas de radio GSM-R: red de radiotelefonía móvil que permite las comunicaciones.
  - RBC (Radio Block Center): equipo que controla el movimiento de los trenes (transmite la información vía radio) y, además, realiza funciones de seguridad y control.

Señales

En los trenes equipados con el sistema ERTMS, la información sobre señalización (indicaciones luminosas) se realiza mediante equipos embarcados permitiendo así que los maquinistas puedan ver en el DMI las señales luminosas referentes a las condiciones de circulación.

El sistema de señalización en cabina del ERTMS/ETCS nivel 2 prevalecerá siempre sobre la señalización lateral, por lo que no son necesarias las señales fijas absolutas, no obstante se instalarán señales en las estaciones y en los PAET:

- Señales de salida: señales de cuatro aspectos (verde, rojo, blanco e indicación de ERTMS/ETCS).
- Señales de entrada: señales de cinco aspectos (verde, rojo, amarillo, blanco e indicación ERTMS/ETCS).

- Señales avanzadas de entrada: serán de dos aspectos (verde y amarillo) y estarán situadas a 2.000 metros de la señal absoluta.

Control a distancia de la explotación (Telemando)

El control de las Instalaciones de Seguridad, tanto en las estaciones como en los PAET, así como la información de la situación puntual de los trenes, es posible realizarlo a distancia (telemando). Para ello se dispone de puestos de control central, desde los cuales se monitorizan y gobiernan todas las funciones del telemando. Estos puestos poseen todos los equipos que posibilitan la comunicación entre los sistemas y los operadores de explotación, asegurando y garantizando en todo momento el servicio, aún en caso de que falle algún sistema. El telemando se encarga de gobernar a distancia las subestaciones eléctricas, los seccionadores de mástil, la calefacción de agujas y los equipos de iluminación.

Cuando se habla de telemando, también se tienen en cuenta las estaciones remotas, que son estaciones situadas junto a las instalaciones a telemandar y que permiten el intercambio de información en campo.

Instalaciones de suministro de energía

Todas las instalaciones (enclavamientos, telemando, sistemas de detección de objetos en la vía…) precisan de suministro de energía. Para ello, se instala un centro de transformación de potencia que permite alimentar la potencia demandada por cada una de estas instalaciones. Estos centros de transformación disponen de un transformador, aparatos de medida y adecuados elementos de protección. Asimismo, en estas instalaciones, se instalan grupos generadores capaces de producir la demanda de energía eléctrica para la alimentación de los elementos anteriormente mencionados. Igualmente, los enclavamientos, comunicaciones, telemando, etc. deberán ser alimentados mediante un Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI) conectada al centro de transformación y a un grupo generador y que posea una autonomía de al menos de dos horas.

Coste del sistema de señalización

El coste medio que se utilizará en este estudio será el coste medio por kilómetro que contempla todos aquellos elementos definidos en el apartado anterior coincidiendo con las tecnologías seleccionadas. A continuación, se muestra una tabla resumen del coste por kilómetro de los diferentes elementos que componen el sistema de señalización.

Tabla 90. Costes por kilómetro del sistema de señalización (año 2011).

		Tecnología	Ratios (M€/km)
Sistema de Señalización. *Incluye edificios técnicos, suministro de energía, CTC y Circuitos de Vía*	Vía Unica	BAU[1] con ASFA	0,47
		BAU con ASFA + ERTMS N2+ Detectores	0,56
	Vía Doble	BAB[2] con ASFA	0,67
		BAB con ASFA + ERTMS N2+ Detectores	0,8
Kilómetros de cable 25 cuadrantes y fibra óptica en canaleta			0,066
kilómetros de canaleta para cables			0,047

[1]BAU-Bloqueo Automático Vía Única

[2]BAB-Bloqueo Automático de Vía Doble Banalizada

Fuente: Datos proporcionados por Adif.

Comunicaciones Fijas y Móviles

Comunicaciones Móviles

El sistema utilizado para las comunicaciones entre tren y vía es el sistema GSM-R que consiste en una red de radiotelefonía móvil para uso exclusivo del ferrocarril, permitiendo las comunicaciones de datos y voz, así como los servicios asociados a la operación y explotación de la línea.

Este sistema GSM-R está totalmente redundado, formando una estructura jerárquica que permite dar cobertura a la totalidad de la línea evitando la suspensión del servicio cuando una de las dos redes no funcione correctamente. Esta red estará formada por estaciones base de GSM-R distribuidas a lo largo de la línea, separadas aproximadamente cada 4 kilómetros. Dentro de túneles, para no perder la cobertura, se introducen repetidores de fibra óptica y cable radiante alimentados desde la boca del túnel.

Comunicaciones Fijas

Tienen por objeto interconectar los nodos principales del trayecto (estaciones, PAET), proporcionando servicio de conexiones de corta o larga distancia. Este sistema de telecomunicaciones fijas constará de una red de cables de fibra óptica que se distribuirá a lo largo de la infraestructura, en canaletas a ambos lados de la vía, y que se distribuirán a todas las casetas, edificios técnicos y estaciones. El sistema de comunicaciones también dispondrá de un sistema de telefonía automática que permite la comunicación entre las diferentes instalaciones conectadas a esta red fija.

Costes de las comunicaciones Fijas y Móviles

A continuación se muestra (Tabla 91) el coste estimado para las comunicaciones fijas y móviles (GSM-R), según tipo de tecnología.

Tabla 91. Costes por kilómetro atribuible a las comunicaciones (año 2011).

	Tecnología	Ratios (M€/km)
Telecomunicaciones	GSM-R una Capa	0,22
	GSM-R dos Capas	0,25

Fuente: Datos proporcionados por Adif.

Efecto de la velocidad máxima de diseño en el coste de inversión en la señalización y las comunicaciones

Conocidos los diferentes elementos que componen el sistema de señalización y de comunicaciones y conocido también el coste por kilómetro, es posible determinar el coste total en función de la velocidad. Como se ha expuesto anteriormente, se puede asignar una tecnología determinada a cada rango de velocidades y a partir de ahí estimar el coste total.

En la tabla que se incluye a continuación (Tabla 92) se muestra la tecnología seleccionada para cada rango de velocidad y el coste por kilómetro atribuible a esta tecnología.

Tabla 92. Costes por kilómetro del sistema de señalización y comunicaciones en función de la velocidad máxima (año 2011).

Velocidad (*km/h*)	Tecnología	Ratios (M€/km)
Vmax<=200	BAB con ASFA+ GSMR una Capa	1,004
200<Vmax<300	BAB con ASFA + ERTMS N2+ Detectores + GSMR una Capa	1,134
Vmax=>300	BAB con ASFA + ERTMS N2+ Detectores +GSMR dos Capas	1,164

Fuente: Elaboración propia.

Costes de mantenimiento de la señalización y comunicaciones

Al igual que en las secciones anteriores, para estimar el coste de mantenimiento del sistema de señalización y comunicaciones se empleará los valores proporcionados en el estudio (Baumgartner. J.P, 2001), que estima este coste en valores que están entre un 3% y un 6% de su coste de inversión, siendo el porcentaje más comúnmente utilizado del 4%, porcentaje que será empleado en esta tesis doctoral.

3.3.2.4.4 Resumen costes superestructura

Si se agrega el coste del montaje de vía en función de la velocidad, el coste de la electrificación en función de la velocidad y el coste de señalización y comunicaciones obtenido en función también de la velocidad máxima de diseño, se obtiene el coste de inversión atribuible a la subestructura.

Al igual que en el caso del coste de inversión en la subestructura, la intención es recoger y sumar el efecto de la velocidad máxima de diseño en todos y cada uno de los elementos que componen la superestructura y que han sido expuestos en los apartados anteriores. La gráfica que se muestra a continuación (Figura 95) representa este efecto.

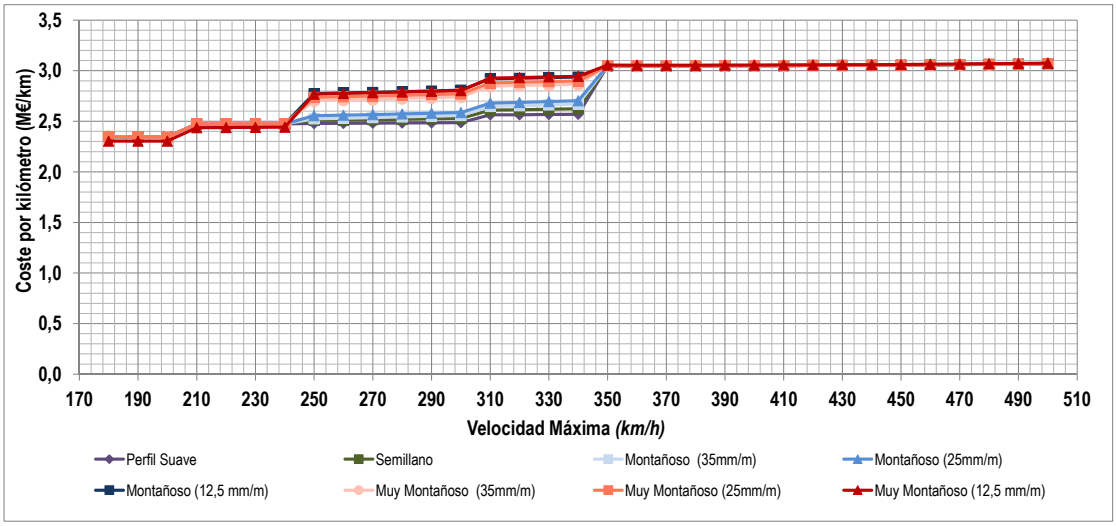


Figura 95. Coste de inversión en superestructura por kilómetro (M€/km) en función de la velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

Puede observarse como a medida que se incrementa la velocidad se incrementa el coste de inversión en la subestructura (valores que van desde los 2,3M€/km para velocidades de 180km/h a los 3M€/km para velocidades superiores a 350km/h), pero este incremento no es lineal, debido a que el coste de montaje y suministro de desvíos tiene una gran influencia en el coste total de la superestructura, influyendo claramente en la forma de la gráfica obtenida. Obsérvese que el coste de los desvíos depende claramente de la tecnología instalada y esta depende de la velocidad máxima, lo que supone que a determinadas velocidades el incremento en costes es muy elevado, pues el desvío instalado debe tener unos requerimientos tecnológicos superiores.

En la siguiente sección se procede a estimar los costes asociados a la expropiación, costes que no deben incluirse en un análisis socio-económico del conjunto (administrador de la infraestructura y operador ferroviario) de acuerdo con los manuales analizados, sin embargo, si debe contemplarse en el análisis financiero del proyecto.

3.3.3 Coste de expropiación

Este apartado tiene por objeto la cuantificación de las superficies a expropiar para la construcción de una línea ferroviaria, así como la valoración de las mismas. De acuerdo a la normativa vigente *"se expropia el pleno dominio de las superficies que ocupen la explanación de la línea férrea, sus elementos funcionales y las instalaciones permanentes que tengan por objeto una correcta explotación, así como todos los elementos y obras anexas o complementarias definidas en el proyecto que coincidan con la rasante del terreno o sobresalgan de él, y en todo caso las superficies que sean imprescindibles para cumplimentar la normativa legal vigente para este tipo de obras, en especial las contenidas en el título II de la Ley 39/2003, de 17 de noviembre, del Sector Ferroviario, relativa a las limitaciones a la propiedad y que se concretan con el Real Decreto 2387/2004, de 30 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento del Sector Ferroviario".*

3.3.3.1 Terrenos ferroviarios a expropiar

La aprobación de un proyecto (línea ferroviaria), así como la mejora de proyectos existentes, supone la ocupación (o la afección) de nuevos terrenos. De acuerdo con el texto actualizado (Marzo 2011) de la Ley de Ordenación de los Transportes Terrestres de 30 de Julio de 1987, así como el Reglamento de 28 de Septiembre de 1990 y finalmente con la Ley 39/2003 de 17 de Septiembre del sector ferroviario, se consideran zonas de dominio público los terrenos ocupados por las líneas ferroviarias que formen parte de la Red Ferroviaria de Interés General y una franja de terreno de ocho metros a cada lado de la plataforma, medida en horizontal y perpendicularmente al eje de la misma desde la arista exterior[28] de la explanación. En casos especiales como puentes, viaductos u otras obras similares se podrán fijar como aristas exteriores de la explanación las líneas de proyección vertical sobre el terreno. En túneles será precisa la expropiación de los 100 primeros metros (boquillas), no expropiando el resto.

Teniendo en cuenta esta normativa, las anchuras medias de expropiación que se han considerado para una infraestructura ferroviaria, son las siguientes:

- Plataforma a cielo abierto: se estima una anchura media de 70 metros, correspondientes a un terraplén de 8 metros de altura, lo que supone una ocupación de 46 metros de ancho a los que se añaden 16 metros de las franjas laterales (8 metros de cada lado) y 8 metros a mayores por los incrementos que pueden suponer la reposición de caminos.
- Puentes y viaductos: se estima una anchura media de 35 metros, correspondientes a los 14 metros de la estructura más los 16 metros de las franjas laterales y 4 metros (a cada lado) por el incremento de caminos.
- Túneles: sólo se consideran expropiación los 100 metros de las boquillas, que se consideran tramos normales a cielo abierto, más unos 500 metros (por cada boquilla), para caminos complementarios (carreteras de acceso) y reposición de estos.
- Subestaciones y centros de auto-transformación: se estima una superficie media de 5.000m^2 en el caso de las subestaciones y de 10.400m^2 para los caminos de acceso (carretera de 400 metros). Para el caso de los centros de auto-transformación se considera una superficie media de 300m^2.

[28] La arista exterior de la explanación es la intersección del talud del desmonte, del terraplén o, en su caso, de los muros de sostenimiento colindantes con el terreno natural.

Conocida la anchura de la plataforma y la longitud de la línea (longitud que depende de la velocidad como se ha visto anteriormente), es posible calcular la superficie que es necesario expropiar para construir una línea ferroviaria.

$$S_{exp} = L_{movTierras} \times 70 + L_{estructura} \times 35 + n^{o}_{tunel} \times 1.200 \times 70 + n^{o}_{sub} \times 15.400 + n^{o}_{C.A.T} \times 300 \quad (3.\ 58)$$

Donde:

- *S_{exp}: superficie a expropiar para la construcción de una línea ferroviaria (m^2);*
- $L_{movTierras}$: longitud de la línea a cielo abierto *(m)*;
- $L_{estructuras}$: longitud de la línea que transcurre por viaductos o puentes *(m)*;
- $n^{o}_{túneles}$, n^{o}_{sub}, $n^{o}_{C.A.T}$: número de túneles, subestaciones y centros de auto-transformación.

En un caso ejemplo, tanto la longitud de movimiento de tierras como la longitud de las estructuras son datos conocidos del apartado de cálculo de la plataforma. Además, el número de subestaciones y de centros de auto-transformación también es un dato conocido que se obtiene en el apartado de superestructura, electrificación, subestaciones y líneas aéreas. El número de túneles se conoce a partir de la longitud del total de la línea que transcurre en túnel (apartado costes de la superestructura). Calculando la longitud media de estas estructuras en la red ferroviaria española, es posible determinar un parámetro medio que permita calcular el número de túneles necesario para una línea concreta y, para ello, se utiliza la siguiente expresión (3. 59):

$$n^{o}_{tunel} = \frac{L_{TotalTúnel}}{L_{MediaTúnel}} \quad (3.\ 59)$$

La longitud media de túneles es posible calcularla en función del tipo de velocidad y del tipo de terreno. Por ello, caracterizando la red ferroviaria española, se obtiene la longitud total y el número de túneles que se han construido para cada una de las líneas y, clasificándose según tipo de terreno y velocidad, se obtiene la longitud media de túnel. En la siguiente tabla se muestra esta clasificación:

Tabla 93. Longitud media de los túneles españoles según relieve del tramo y velocidad máxima.

	Velocidades > 250 km/h		Velocidades < 250 km/h	
	Zona Muy Montañosa	Zona Montañosa	Zona Muy Montañosa	Zona Montañosa
	Velocidades > 350 km/h	Velocidades > 250 km/h	Velocidades < 120 km/h	Velocidades < 250 km/h
Longitud media (m)	**10.127**	**1.435**	**557**	**377**
	Velocidades > 200 km/h		Velocidades < 200 km/h	
	Zona Semillana	Zona Llana	Zona Semillana	Zona Llana
Longitud media (m)	**1.291**	**1.190**	**381**	**75**

Fuente: Elaboración propia.

Lo que se pretende en este apartado es determinar el coste que supone la expropiación del terreno. Una vez determinada la superficie que es necesario expropiar, multiplicándola por el precio medio del suelo, se obtiene el coste de expropiación.

El problema reside en que no existe un valor medio único de suelo debido a que hay múltiples clasificaciones y, cada una de ellas tiene un coste diferente. Por ejemplo, el valor económico de un suelo urbano es mucho mayor que el valor económico de un

pastizal o de los arrozales… De ahí que el siguiente apartado trate de clasificar y cuantificar económicamente los diferentes tipos de terreno.

3.3.3.2 Tipos de suelo y precio

De acuerdo a la Ley del suelo 8/2007 de 28 de mayo y el Real Decreto 1492/2011 de 24 de octubre, todo suelo se encuentra en dos situaciones básicas:

- En situación de suelo rural. Es un suelo preservado para su transformación mediante la urbanización, así como los terrenos excluidos de esta transformación, suelos ecológicos, agrícolas, ganaderos, forestales, paisajísticos y aquellos con riesgos naturales o tecnológicos. También entran dentro de esta clasificación aquellos suelos que permitan su paso a situación de suelo urbanizado, hasta que termine la correspondiente actuación de urbanización.
- En situación de suelo urbanizado. Cuando las parcelas estén, o no, edificadas y que cuenten, o puedan llegar a contar, con los servicios propios de los núcleos de población y las dotaciones requeridas por la legislación urbanística.

Como se observa en esta Ley, dentro de la clasificación de suelo rural se engloban los diferentes tipos de suelo y que se diferencian según su naturaleza (agrícola, forestal…). Una clasificación más específica y detallada es la elaborada por el proyecto europeo Corine Land Cover (CLC), que tiene como objetivo principal la recopilación, la coordinación y la homogenización de la información sobre el estado del medio ambiente y de los recursos naturales en la Comunidad Europea. Este proyecto cartografió la superficie europea mediante satélite, para la creación de una base de datos europea a escala 1:100.000 en la que se determinan, por primera vez, los usos del suelo y sus cambios.

La última actualización disponible es la correspondiente al año 2006 y en ella se distinguen 44 tipos diferentes de suelo. Mediante la utilización de un programa GIS (Sistemas de Información Geográfica), es posible mostrar esta información para un país concreto. En la figura que se muestra a continuación (Figura 96), se recoge esta información (44 tipos de suelo) para el caso español que es el analizado en este estudio.

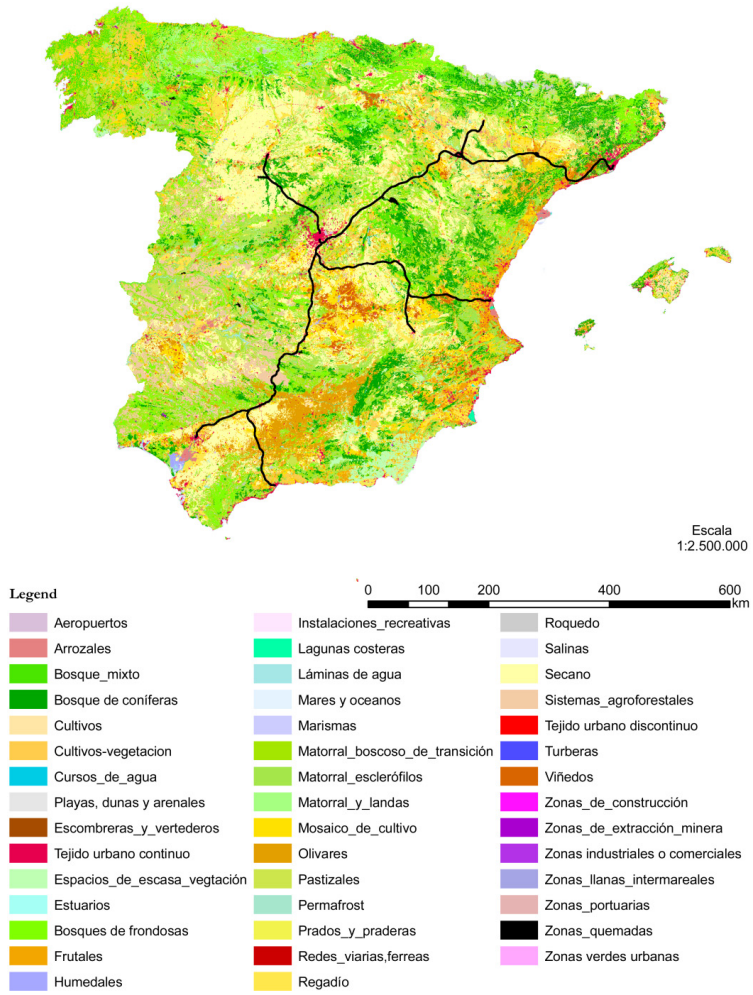


Figura 96. Diferentes tipos de suelo para el caso Español según información del CLC

Fuente: Elaboración propia con datos de Corine Land Cover (CLC).

Estos 44 tipos diferentes de suelo, se pueden clasificar aunando aquellos que tengan un uso o naturaleza similar y/o que tengan un aprovechamiento parecido. Tras esta clasificación, se detectan cinco tipos diferentes:

- Erial: comprende los terrenos improductivos, montes bajos o matorrales, eriales propiamente dichos y pastos, pastizales…
- Cereal: comprende los cultivos de secano de cereal, los definidos como labor, simplemente secanos y viñas.
- Monte alto: comprende los montes maderables, ornamentales y frutales (no de regadío).
- Regadío: comprende los cultivos de cereal, leguminosos o frutales de regadío.
- Suelo urbanizado: comprende los suelos calificados como urbanos o urbanizados.

Por lo tanto, con esta nueva clasificación de usos del suelo es posible crear un mapa de usos del suelo de España, pero ahora con solo 5 tipos de terrenos diferentes. Se distribuyen los 44 tipos diferentes de suelos, que determina el proyecto Corine Land Cover, en estos cinco grandes grupos: erial, cereal, monte alto, regadío y suelo urbanizado, obteniéndose así, para el caso español, la siguiente distribución (Figura 97):

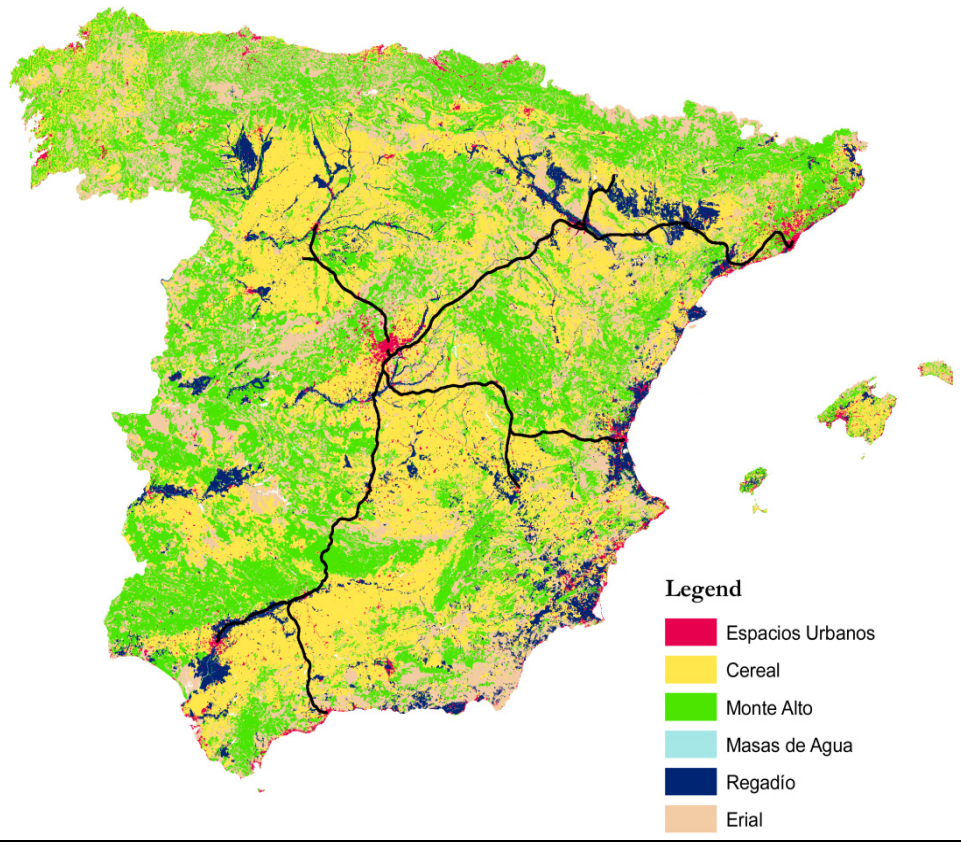


Figura 97. Cinco tipos de suelo diferentes para el caso Español

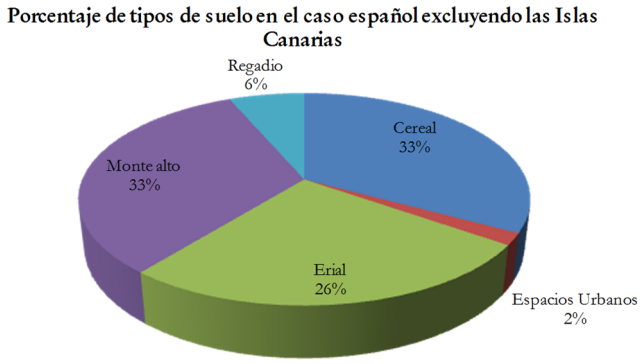
Fuente: Elaboración propia.

Se observa como predominan suelos de cereal y monte alto, pero en cambio zonas de regadío y espacios urbanos representan una proporción muy pequeña del suelo de España.

Se obtiene, también, el número de hectáreas que constituye cada uno de estos grandes grupos. A partir de esta información, es posible determinar valores medios de los diferentes tipos de suelo que puede atravesar una infraestructura ferroviaria en España. A falta de datos sobre el terreno, con estos valores medios se pueden determinar, de forma genérica, los porcentajes de los diferentes tipos de suelo en los que se va a construir una línea para después asignarle un coste.

Tabla 94. Número de hectáreas y porcentajes de los diferentes tipos de suelo para el caso español.

	Hectareas	Km^2
Cereal	16.384.374,5	163.843,7
Espacios Urbanos	889.657,0	8.896,6
Erial	13.003.215,8	130.032,2
Monte alto	16.271.370,6	162.713,7
Regadio	3.214.994,0	32.149,9
Total	49.763.611,9	497.636,1



Fuente: Elaboración propia.

Se puede decir que el 6% del territorio español es destinado al regadío, el 33% al cereal, el 2% a zonas urbanas o urbanizables, otro 33% a monte alto y un 26% a erial. A falta de datos reales del suelo en el que se va a construir la infraestructura ferroviaria, es posible utilizar estos porcentajes como valores medios para el cálculo económico de la expropiación.

Una vez clasificados los diferentes suelos que una línea ferroviaria puede atravesar, es necesario conocer el coste o el valor económico de cada uno de ellos para poder determinar el coste que supondrá expropiar los terrenos afectados por una determinada línea.

3.3.3.2.1 Precio del suelo

En cuanto a los suelos "rurales", el ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente publica anualmente un informe en el que se estima el precio medio de la tierra y su evolución histórica (Informe Encuesta de Precios de la Tierra 2012). Gracias a este informe, es posible conocer el precio, para el año 2011, de cada uno de los terrenos catalogados anteriormente y que han sido recogidos en la Tabla 95.

En relación a los precios del suelo "urbano" o "urbanizable", el Ministerio de Fomento, al igual que el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, determina el precio medio del metro cuadrado del suelo urbano en el total nacional o por comunidades. También distingue por municipio, diferenciándolos por número de habitantes. Estos precios ofrecidos por ambos Ministerios se recogen en la tabla que se muestra a continuación (Tabla 95):

Tabla 95. Tabla Precios medios por m2 de los diferentes tipos de suelo.

		Cuarto trimestre de 2011	
Clases de Tierra		Precio €/Ha	Precio €/m^2
Erial		2838	0,2838
Cereal		7.591	0,7591
Monte alto		8898	0,8898
Regadio		18.272	1,8272
Suelo Urbanizado (media España)		1.825.000	182,5
	Municipios con menos de 1.000 habitantes	537.000	53,7
	Municipios entre 1.000-5.000 habitantes	1.069.000	106,9
	Municipios entre 5.000-10.000 habitantes	1.624.000	162
	Municipios entre 10.000-50.000 habitantes	2.065.000	207
	Municipios con más de 50.000 habitantes	3.760.000	376

Fuente: Elaboración propia con datos del Ministerio de Fomento y Ministerio de Agricultura (datos de precios 2011).

Se observa claramente cómo el metro cuadrado en una zona urbana es mucho más caro incluso que el precio más caro del suelo rural (regadío), aproximadamente 100 veces más caro. También existe gran diferencia dentro de los suelos rurales pues los suelos de regadío son 6,5 veces más caros que los suelos improductivos o los pastizales (erial). La tabla muestra también, cómo a medida que los municipios son más grandes (mayor número de habitantes), el precio del metro cuadrado aumenta, llegándose a precios de 376 €/m^2 en municipios de más de 50.000 habitantes, lo que supone duplicar el precio de la media nacional.

A estos precios mostrados es necesario añadirles el coste de los bienes indemnizables, como cerramientos, que deben de ser abonados independientemente del suelo, así como también la parte del terreno que no ha sido expropiada y cuya explotación no sea rentable para el propietario. La valoración económica de estos bienes queda bajo el amparo del Art. 23 de la Ley de Expropiación Forzosa y que en este estudio será considerada, al igual que los diferentes estudios informativos disponibles (Burgos-Victoria, Valladolid-Burgos…), como un 5% del valor económico total de la expropiación.

A continuación, y para terminar este capítulo se definen, se especifica el coste de otras partidas que son difícilmente cuantificables pero que son partidas a tener en cuenta dentro del coste global de un proyecto ferroviario.

3.3.4 Coste de estaciones

El caso de las estaciones es un caso extraordinario pues generalmente se trata de inversiones injustificadas para el funcionamiento real. Algunos estudios consideran que no tienen una relación con el proyecto, por lo que no deben ser atribuidas al total de costes de inversión.

En este tipo de obra, a menudo se inflan los costes del proyecto de manera desproporcionada por ser consideradas obras de arte, en las que priman principalmente los aspectos estéticos y de adaptación al medio.

Sin embargo, se han analizado una serie de proyectos y estudios informativos en busca de costes que permitan tener un orden de magnitud:

- En el SRA (Strategic Rail Authority) se concluyó que este coste está en torno a un 8-10 % del coste de inversión de una línea de alta velocidad. También se señala que este coste aumenta como mínimo un 20% cuando se construye una estación monumental y con excesivos adornos arquitectónicos, frente a una estación adecuada y funcional.
- Otro estudio que es interesante en este campo y que se ha ido citando a lo largo de este capítulo es (Baumgartner. J.P, 2001), en el que se realiza una clasificación de las estaciones y estima un coste:

Tabla 96: Costes asociados a la construcción de las estaciones

	[10^6 EUR/unidad]	
a) Estación intermedia en línea de vía única, sin señalización ni otros equipos	1	(0,5a 2)
b) Estación intermedia en línea de vía única con enclavamiento y señalización, pero sin ningún otro equipo	3	(2 a 6)
c) Dos conexiones (4 desvíos) entre las dos vías de una línea de víadoble con señalización, telemando (CTC, etc)	10	(5 a 15)
d) Estación con vía doble (2 pares de conexiones y 2 vías principales) con señalización, etc	30	(20 a 40)
e) Paso elevado	15	(10 a 30)
f) Estación de pasajeros grande	200	(50 a 500)
g) Estación de clasificación con lomo de asno (vías de recepción, vías de clasificación, vías de expedición y vías de apartado, etc)	300	(100 a 500)
h) Terminal de transporte combinado internacional o continental	100	(50 a 200)

Fuente: Baumgartner. J.P., 2001.

3.3.5 Costes totales de inversión en función de la velocidad máxima

A modo de resumen se estima el coste total de inversión en función de la velocidad, como suma del coste de inversión en la subestructura, superestructura, el coste de expropiación y el coste en estaciones.

De la misma forma que se ha realizado para presentar los resultados del coste de inversión en la subestructura, se muestra gráficamente el coste de inversión total en función de la velocidad máxima de diseño para cada tipo de terreno considerado Figura 98 y Figura 99.

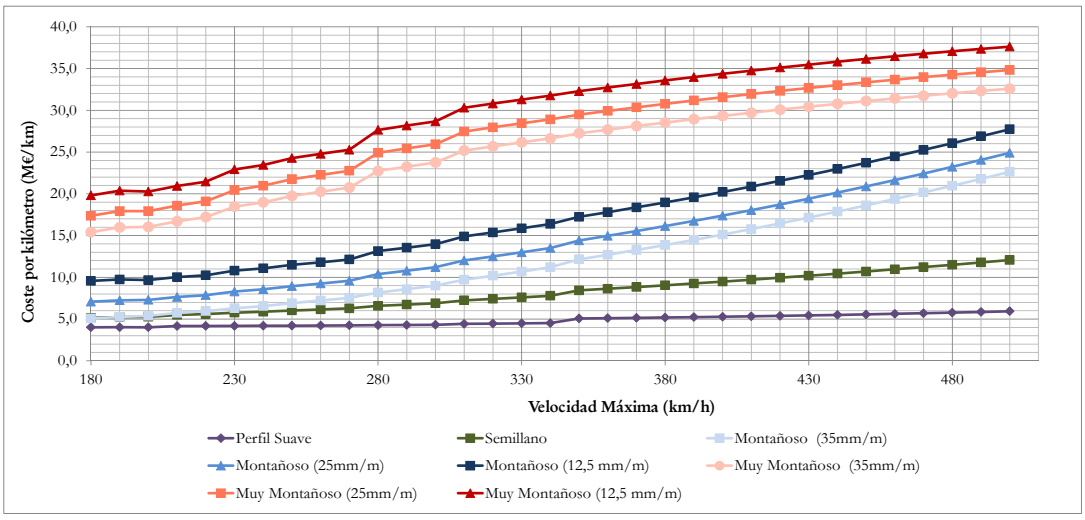


Figura 98. Costes totales de inversión por kilómetro en función de la velocidad máxima en los diferentes tipos de terreno considerando sección de túnel para vía doble.

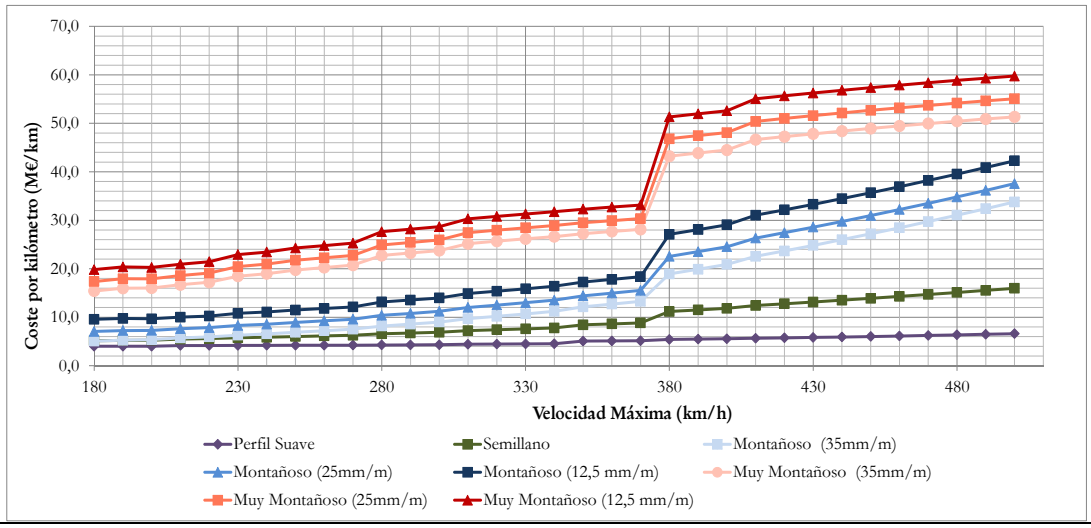


Figura 99. Costes totales de inversión por kilómetro en función de la velocidad máxima en los diferentes tipos de terreno considerando túnel bitubo a partir de 370km/h.

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados obtenidos se destaca que, sea cual sea el tipo de terreno, a medida que se incrementa la velocidad máxima, el coste de inversión aumenta. Puede afirmarse que este incremento es aproximadamente linear en todos los casos analizados.

Los mayores incrementos en costes producidos por incrementos en la velocidad máxima se producen en terrenos semillanos y montañosos. Esto es normal, pues es en este tipo de terrenos dónde un incremento de la velocidad implica un mayor porcentaje de túneles. En terrenos muy montañosos el porcentaje de túnel es tan elevado que incrementos en la velocidad no supone incrementos sustanciales en kilómetros de línea construida bajo túnel.

Se observa también que el coste por kilómetro atribuible a la construcción de una infraestructura ferroviaria en un terreno montañoso puede llegar a ser diez veces mayor que construirla en un terreno llano. Incluso puede llegar a ser casi cinco veces mayor que el coste por kilómetro en un terreno semillano. En cuanto a la diferencia entre el coste por kilómetro entre construir una infraestructura en un terreno montañoso y

hacerlo en un terreno muy montañoso de media se obtiene que es aproximadamente 2,5 veces más caro construirla en un terreno muy montañoso.

Se resume que el rango de costes totales de inversión que se obtienen para cada tipo de terrenos es el que muestra la siguiente tabla (Tabla 97):

Tabla 97: Rango de costes por kilómetro para cada tipo de terreno y en función de la velocidad.

	Costes por kilómetro *(M€/km)*		
	Vmax<200km/h	200km/h<Vmax<350km/h	Vmax>350
Terreno Llano	4	4,2 - 5	5 - 6
Terreno Semillano	5,3	5,3 - 8,5	8,5 -16
Terreno Montañoso	5,5 - 9,5	6 -17	12 - 42
Terreno Muy Montañoso	15,5 - 20,5	16 - 32	27- 60

Fuente: Elaboración propia.

Otro punto importante que se extrae de los resultados es que la construcción de túnel bitubo incrementa los costes considerablemente (aproximadamente los duplica).

Es importante destacar que una infraestructura ferroviaria que une dos núcleos, generalmente atraviesa diferentes tramos con relieves diferentes, por lo que es difícil encontrarse que una determinada línea sea, en todo su trayecto, por ejemplo totalmente llana o montañosa. Por lo tanto, el coste total de inversión de una infraestructura está claramente condicionado por el número de kilómetros que una infraestructura atraviesa en cada uno de relieves anteriormente identificados y se estimaría (el coste de inversión total) simplemente multiplicando el porcentaje de kilómetros de la línea de cada uno de los tipos de terreno por su coste por kilómetro (Figura 98 y Figura 99).

Conocido el coste por kilómetro en función de la velocidad para cada tipo de orografía, se procede a evaluar el modelo en casos reales de líneas ferroviarias ya construidas de las que se dispone datos, con el objetivo de validar la metodología desarrollada.

Se han elegido cuatro líneas de alta velocidad de las que se dispone su coste total de inversión y el coste por kilómetro (véase Tabla 56), para cada una de ellas se determina el porcentaje de tipo de relieve que atraviesan sobre el total de la línea, por lo que se estima el número de kilómetros correspondientes a cada uno de los trazados identificados (véase Tabla 98).

Tabla 98: Porcentaje del total de la línea según el tipo de relieve que atraviesan (llana, semillana, montañosa y muy montañosa).

	Madrid-Sevilla	Madrid-Valencia	Madrid-Valladolid	Madrid-Barcelona
Muy Montañoso	0%	0%	38%	0%
Montañoso	25,1%	58%	0%	58,1%
Semillano	5,19%	42%	0%	40,4%
Llano	69,69%	0%	62%	1,4%

Fuente: Elaboración propia.

Conocidos los diferentes subtramos de cada una de las líneas, es decir conocidas las diferentes orografías que presenta cada una de las líneas se procede a calcular el coste total por kilómetro en función de la velocidad basándonos en el coste por kilómetro atribuible a cada tipo de terreno.

A continuación se representa gráficamente el coste por kilómetro de cada una de las líneas de alta velocidad analizadas (Figura 100).

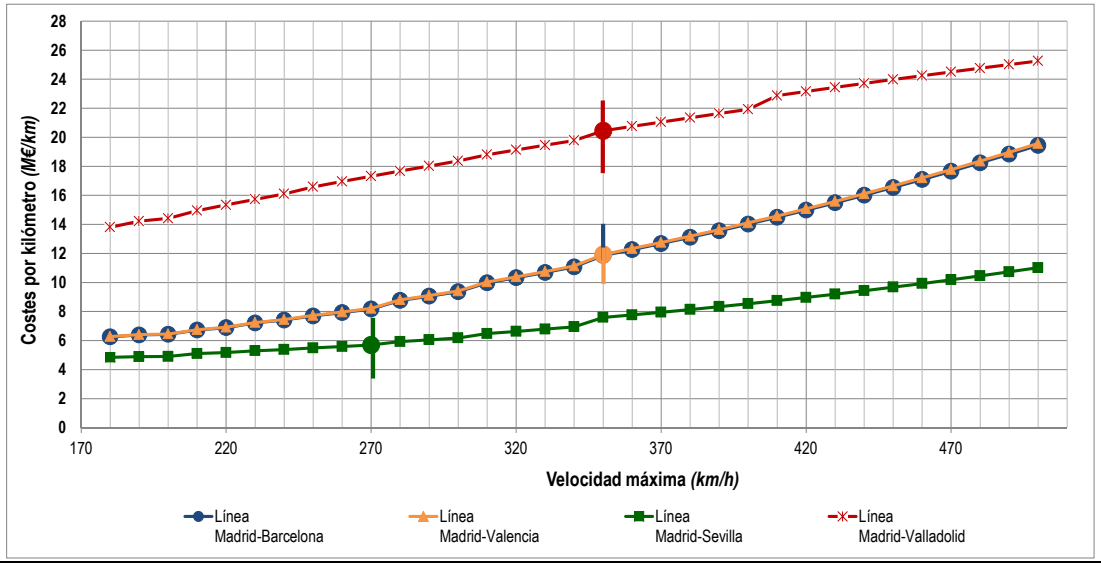


Figura 100. Costes de inversión por kilómetro estimado en diferentes líneas de alta velocidad española y en función de la velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se destacan para cada línea las velocidades máximas de diseño a las que han sido construidas las líneas analizadas. Si se comprueba lo estimado con los valores de coste expuestos en la Tabla 56 es posible evaluar el ajuste del modelo.

Tabla 99: Diferencia en coste total de inversión por kilómetro entre los valores estimados y los valores reales

	Madrid-Sevilla	Madrid-Valencia	Madrid-Valladolid	Madrid-Barcelona
Costes Reales Actualizados a 2014	6,2	12,5	22,9	13,6
Costes Reales Actualizados a 2011	6,1	12,2	22,4	13,3
Costes totales Estimados 2011	5,7	11,9	20,4	11,9
Diferencia	**-6,3%**	**2,5%**	**-8,8%**	**-10,9%**

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que los costes totales de inversión estimados están por debajo de los costes reales (entre un 6,3% y un 11%). Esta pequeña diferencia se debe a que en el modelo no se está incluyendo otros costes de menor cuantía pero que influyen claramente en el coste total final. Estos son:

- Coste relativo a los estudios de impacto ambiental: Los costes de este concepto son cada vez mayores en relación al coste global del proyecto de una línea de alta velocidad. Este coste incluye todas aquellas medidas correctivas en términos de impacto ambiental, tanto durante los trabajos como una vez puesta en servicio la línea. Entre muchos otros, se consideran dentro de este apartado las correcciones o minimizaciones de cruces con otras infraestructuras, la reducción del impacto visual de las obras de fábrica o la reducción del uso del suelo.
- Según (CENIT, 2008), que ha analizado este coste en una serie de proyectos de alta velocidad, el porcentaje de inversión en este concepto está entre un 7% y un 22% de la inversión total del proyecto, en aquellos proyectos que han sido analizados.
- Coste atribuible a la planificación y evaluación de un proyecto ferroviario. Toda evaluación de un proyecto lleva asociado unos costes, principalmente atribuibles

al personal que de acuerdo a lo publicado por (CENIT, 2008) sobre la línea Madrid-Lleida puede llegar a ser entre 2-3% del coste total de la línea

Si se incluye el porcentaje más bajo de ambas partidas de coste al coste total estimado, se observa que la diferencia se reduce considerablemente (véase Tabla 100).

Tabla 100: Diferencia en costes totales incluyendo los costes de impacto ambiental y los atribuibles a los estudios de planificación y evaluación de proyectos

	Madrid-Sevilla	Madrid-Valencia	Madrid-Valladolid	Madrid-Barcelona
Costes Reales Actualizados a 2014	6,2	12,5	22,9	13,6
Costes Reales Actualizados a 2011	6,1	12,2	22,4	13,3
Costes totales Estimados 2011	6,2	13,0	22,3	12,9
Diferencia	**2,17%**	**6,27%**	**-0,58%**	**-2,89%**

Fuente: Elaboración propia.

Tras observar los resultados obtenidos puede afirmarse que el modelo se ajusta bastante bien a los casos reales, las diferencias no llegan al 6,5% en el peor de los casos (Madrid-Valencia).

3.3.6 Costes totales de mantenimiento en función de la velocidad

Al igual que para el caso de los costes de inversión, se recopila y se agrupan los valores proporcionados en cada uno de las secciones anteriores en relación al coste de mantenimiento de los diferentes elementos que componen una infraestructura (plataforma, túneles, viaductos, …), con el objetivo de determinar el coste de mantenimiento total para cada uno de los tipos de terreno definidos.

A continuación se muestra gráficamente los resultados obtenidos (Figura 101):

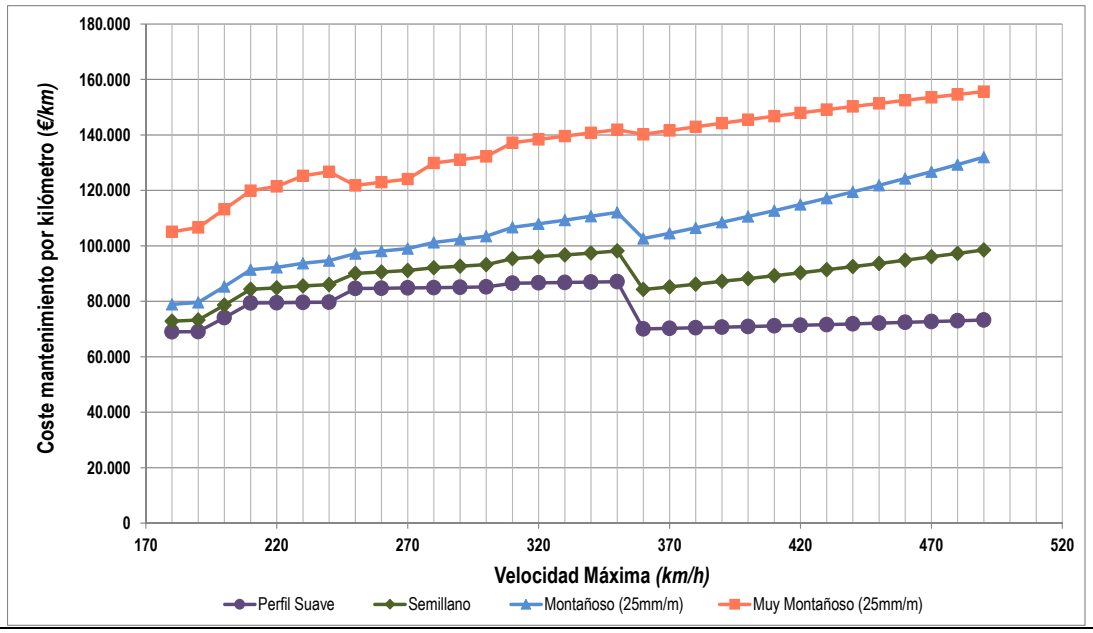


Figura 101. Costes totales de mantenimiento por kilómetro y año en función de la velocidad máxima para los diferentes tipos de terreno identificados

De los resultados obtenidos se destaca que, sea cual sea el tipo de terreno, a medida que se incrementa la velocidad máxima, el coste de mantenimiento aumenta. Este efecto de la velocidad sobre los costes de mantenimiento se produce hasta que se alcanzan los 350km/h, a esta velocidad se produce una caída drástica de los costes.

Esta reducción de los costes tan acentuada se explica a partir de las consideraciones realizadas en términos de montaje de vía. A partir de 350km/h se considera que en total de la línea se monta vía en placa (véase Tabla 74) y, como se ha expuesto anteriormente, los costes de mantenimiento se reducen considerablemente en comparación con los costes de mantenimiento atribuibles a la vía sobre balasto. Lo que se observa también es que, a partir de la caída en costes producida por el montaje de vía en placa, se vuelve a producir un incremento del coste de mantenimiento al incrementarse la velocidad.

Obsérvese que la gráfica correspondiente al coste de mantenimiento en perfiles muy montañosos tiene una forma ligeramente diferente al resto. La diferencia se produce debido a que en terrenos muy montañosos el porcentaje de túnel es tan elevado que prácticamente toda la línea se contribuye bajo túnel. Si se observa la hipótesis realizada para el montaje de vía (Tabla 74) se explica la pequeña caída producida a los 250km/h, pues es a partir de esta velocidad cuando en túneles y en viaductos se monta vía en placa y, por lo tanto, en una línea que mayoritariamente se construye bajo túnel, el coste de mantenimiento de vía se reduce. En líneas donde el porcentaje de vía en placa sobre el total es muy elevado, tiende a reducirse el coste de mantenimiento total, ya que, aunque el coste de manteniendo del resto de partidas (electrificación, señalización) se incremente con la velocidad, el coste de mantenimiento de vía se reduce sustancialmente.

A modo de resumen se incluye una tabla que muestra el rango de costes totales de mantenimiento que se obtienen para cada tipo de terreno y en función de la velocidad máxima:

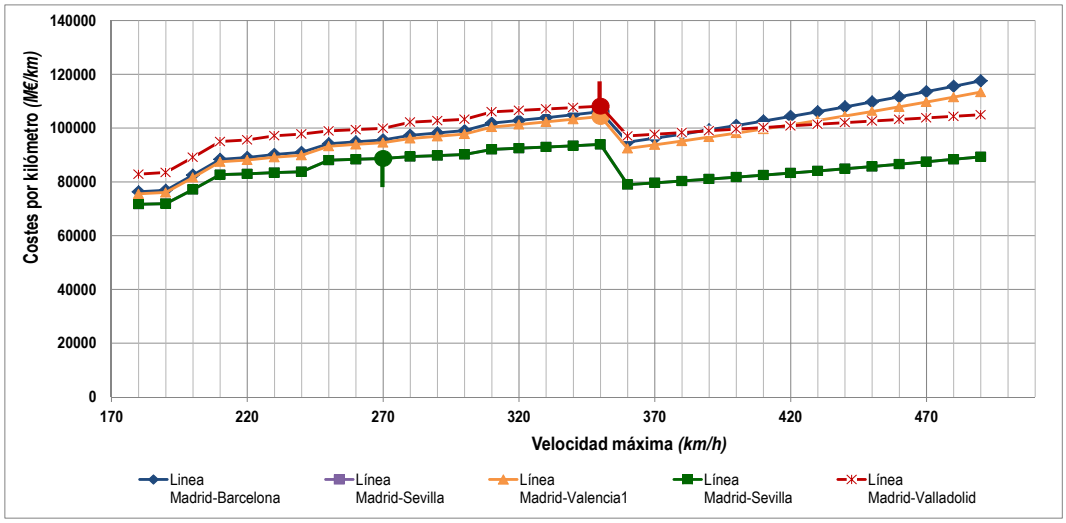
Tabla 101: Rango de costes por kilómetro para cada tipo de terreno y en función de la velocidad.

	Costes mantenimiento por kilómetro *(€/km_año)*		
	Vmax<200km/h	**200km/h<Vmax<350km/h**	**Vmax>350**
Terreno Llano	69.000-74.000	79.000-87.000	70.000-73.000
Terreno Semillano	73.000-78.500	84.000-98.000	84.000-98.500
Terreno Montañoso	79.000-85.000	91.000-112.000	102.500-132.000
Terreno Muy Montañoso	105.000-113.000	120.000-142.000	140.000-155.000

Fuente: Elaboración propia.

Como se menciona en el apartado resumen de costes de inversión, es muy difícil encontrar una línea real en la que todos los subtramos que la forman son de las mismas características, es decir que sea una línea complemente llana, semillana o montañosa, generalmente están formadas por diferentes subtramos con diferentes relieves. En definitiva, se afirma que el coste total de mantenimiento es una combinación del coste atribuible a cada tipo de terreno ponderado por el número de kilómetros que se recorre en cada uno de ellos.

A modo de ejemplo, se estima el coste total para cuatro líneas reales (en servicio actualmente) con el objetivo de evaluar los resultados obtenidos. Las líneas elegidas son las mismas que las empleadas en el cálculo de los costes de inversión (Madrid-Sevilla, Madrid-Valencia, Madrid-Valladolid y Madrid-Barcelona) ya que es conocido el tipo de terreno de cada uno de los subtramos que las forman (Tabla 98). A continuación se representa gráficamente el coste total de mantenimiento por kilómetro de cada una de las líneas de alta velocidad analizadas (Figura 100).



		Madrid-Sevilla	Madrid-Valencia	Madrid-Valladolid	Madrid-Barcelona
Velocidad máxima diseño	*km/h*	**270**	**350**	**350**	**350**
Coste Mantenimiento	*€/km_año*	88.712	104.328	108.170	106.086

Figura 102. Costes de mantenimiento por kilómetro y año estimado en diferentes líneas de alta velocidad española y en función de la velocidad

Fuente: Elaboración propia.

Puede afirmarse que los resultados obtenidos están en línea con los valores declarados por el gestor de la infraestructura español. Esta entidad declara que los costes de mantenimiento incurridos en líneas de alta velocidad diseñadas para 350km/h están entro los 100.000€/km-año y 110.000 €/km-año, si se observa los resultados obtenidos, puede afirmase que el modelo se ajusta muy bien a los valores reales.

3.3.6.1 Otros costes de mantenimiento

Además de los costes de mantenimiento existen otros que también debe asumir el administrador de la infraestructura y que no dependen de la velocidad, pero deben ser incluidos en el análisis económico y financiero.

Es decir, a la hora de estimar los costes de operación del gestor de la infraestructura es imprescindible incluir los costes que se detallan a continuación:

- Costes de gestión del tráfico. Dentro de estos costes se incluyen los relacionados con el personal y equipos necesarios para la gestión de la circulación. Se considera que existe un Centro de Regulación y Control (CRC) en cada línea y un Puesto Regional de Operación (PRO) cada 200 km. También en esta partida se incluyen los que están relacionados con el mantenimiento de los equipos de los CRC, no considerándose los de los PRO, pues estos están incluidos en el de la señalización. Estos costes están estimados en 4,700 €-año/km.
- Costes de seguridad en la vía e instalaciones. Estos costes incluyen al personal y vehículos que son necesarios para vigilar la vía e instalaciones del administrador de la infraestructura, a excepción de las estaciones, que se incluyen en otra partida. Aproximadamente son 5,750 € año por km de línea.
- Costes generales y de estructura. Son todos aquellos costes indirectos que no se pueden imputar a ninguna línea en concreto y se estiman en un 5% del total de costes.

3.4 VALOR RESIDUAL DE LA INFRAESTRUCTURA

Si la vida útil del proyecto coincide con el periodo considerado por el evaluador, es decir con el horizonte temporal de la evaluación, puede asumirse que el proyecto deja de "existir" al final de la evaluación y, por lo tanto, no es necesario ningún cálculo adicional. Sin embargo, en la mayoría de los proyectos de infraestructuras ferroviarias, esto no sucede así, pues el proyecto tiene una vida real económicamente útil superior a la considerada en la evaluación. En estos supuestos debe tenerse también en cuenta un valor residual o valor terminal de los diferentes elementos o subsistemas que componen el proyecto ámbito de análisis.

Por lo tanto, puede afirmarse que el valor residual refleja la capacidad de los activos, cuya vida económica no está completamente agotada, para generar potenciales servicios. En Figura 103 se muestra gráficamente las diferentes fases dentro del horizonte temporal de un proyecto de transporte.



Figura 103. Valor residual (V_T) de un proyecto de transporte.

Fuente: Manual: "Evaluación socioeconómica y financiera de proyectos de transporte"[29]

Es importante destacar que el horizonte de evaluación (periodo representado en la figura anterior entre 0 y T) es un parámetro fijado por el evaluador y que está claramente relacionado con la vida útil de los activos del proyecto y debe ser lo suficientemente largo para abarcar los efectos probables del proyecto a más largo plazo para que el análisis coste-beneficio ofrezca pronósticos razonables.

La duración depende del tipo de proyecto evaluado y de la naturaleza de la inversión. En la mayoría de las obras de infraestructura, una evaluación a 30 años puede resultar razonable, aunque este plazo debe extenderse o reducirse de nuevo según la vida útil de la mayoría de los activos implicados. A continuación, se muestra el horizonte temporal de referencia por sector basado en la práctica aceptada internacionalmente y recomendado por la UE:

[29] Este manual: "Evaluación socioeconómica y financiera de proyectos de transporte (PT2007-001-IAPP)" es el resultado del proyecto de investigación financiado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento dentro de la convocatoria para el año 2007 de la concesión de ayudas para la realización de proyectos de investigación científica, desarrollo e innovación tecnológica, ligadas al Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte, en el marco del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004-2007 (BOE 16 de abril de 2007).

Tabla 102: Horizonte temporal de referencia en años por sector.

Sector	Horizonte temporal de referencia (años)
Energía	15-25
Agua y medio ambiente	30
Ferrocarriles	30
Puertos y Aeropuertos	25

Sector	Horizonte temporal de referencia (años)
Carreteras	25-30
Industria	10
Otros servicios	15

Fuente: Manual de inversiones Adif, (Adif, 2011).

La estimación del valor residual o valor terminal implica el cálculo del valor de los activos para un periodo de tiempo muy lejano en relación al momento en el que se está realizando la evaluación, esto genera una notable dosis de incertidumbre, pues muchas variables pueden afectar al valor a lo largo de la vida del proyecto.

La manera de estimar este valor puede resumirse en tres métodos principales:

1. A partir de la inversión inicial. En este supuesto el valor residual se puede obtener como un porcentaje de la inversión inicial. Puede utilizarse un porcentaje sobre la inversión inicial para uno de los elementos que componen la infraestructura, como aconseja el Manual para la evaluación de inversiones de ferrocarril elaborado por Adif (véase Tabla 103).

Tabla 103: Vida útil y valor residual como porcentaje del valor inicial (inversión) de cada uno de los elementos de una infraestructura ferroviaria.

CONCEPTO	VIDA ÚTIL (AÑOS)	%R. Final vida útil
INFRAESTRUCTURA	75	17%
SUPERESTRUCTURA	30	0%
ELECTRIFICACION	50	25%
INST. DE SEGURIDAD	25	75%
EXPROPIACIONES	99	100%
ESTACIONES	50	12%

Fuente: Manual para la evaluación de inversiones de ferrocarril, (Adif, 2011).

Aunque también, en determinados proyectos, se contemple el uso de un valor (porcentaje) mínimo que corresponde al valor de reciclaje o achatarramiento. Se suele adoptar un valor del 5% sobre la inversión total.

2. A partir del valor actualizado de beneficios y costes posteriores al horizonte de evaluación. De acuerdo con el Artículo 18 del Reglamento Delegado (UE) Nº 480/2014 de la Comisión[30] "…el valor residual se determinará calculando el valor neto actual de los flujos de efectivo en los años de vida restantes de la operación". En este caso es necesario considerar el flujo de beneficios y costes sociales que el proyecto aporta entre T y T ◘.
   A pesar de su mayor consistencia, este método exige un mayor volumen de cálculo, pues es necesario prolongar el horizonte de evaluación hasta hacerlo coincidir con la vida del proyecto y estimar el flujo de efectivo hasta el final de vida de la infraestructura.

[30] REGLAMENTO DELEGADO (UE) No 480/2014 DE LA COMISIÓN de 3 de marzo de 2014 por el que se establecen disposiciones comunes relativas al Fondo Europeo de Desarrollo Regional, al Fondo Social Europeo, al Fondo de Cohesión, al Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural y al Fondo Europeo Marítimo y de la Pesca, y por el que se establecen disposiciones generales relativas al Fondo Europeo de Desarrollo Regional, al Fondo Social Europeo, al Fondo de Cohesión y al Fondo Europeo Marítimo y de la Pesca

3. Por último, basándose en el uso de fórmulas estándar relativas a la depreciación de los activos. De acuerdo con la Guía elaborada por la Comisión Europea para la evaluación de proyectos de inversión[31], el uso de metodologías para la estimación del valor residual basadas en la depreciación de activos es posible en aquellos proyectos con tiempos de vida de diseño muy largos, como es el caso de los proyectos de transporte, cuyo valor residual será una cuantía tan importante que puede llegar a distorsionar el análisis si se utiliza el valor neto actual de los flujos (el modelo anterior).

Si se basa el estudio en el último modelo expuesto, pues es el apropiado para proyectos de transporte, es necesario conocer la depreciación de los activos. En términos cualitativos, se trata de la pérdida de valor de un bien debido a su uso, también puede asociarse a su desgaste. Ésta puede estimarse a partir de la siguiente expresión:

$$Depreciación = \sum_{m=i}^{n} \frac{Coste\ de\ inversión_i - Valor\ Residual_i}{Vida\ Útil_i} \qquad (3.\ 60)$$

La depreciación de los distintos bienes que forman la infraestructura se ha establecido en función de su vida útil y de su valor residual, atendiendo a la depreciación que normalmente sufran por su funcionamiento, uso y disfrute; sin perjuicio de considerar también la obsolescencia técnica o comercial que pudiera afectarlos.
En cuanto a la vida útil de los activos suele estimarse sobre la base de estudios técnicos realizados al efecto, y en cuya fijación se tiene en cuenta las causas que intervienen en el desgaste y la ventana tecnológica de los diferentes elementos. Existen múltiples estudios que aportan valores para cada uno de los elementos de la infraestructura, e incluso las propias Guías o Manuales elaborados por la UE o por los diferentes Estados Miembros proporcionan una serie de valores atribuibles a la vida útil de los diferentes elementos. En la presente tesis se emplearán los valores que muestra (Fernández Arévalo & Vázquez, 2012) y que se basan en el documento Memoria Económica de Adif, 2010. A continuación, se incluye un cuadro resumen con las vidas útiles aplicables a las infraestructuras ferroviarias de alta velocidad.

Tabla 104: Vida útil de los distintos sistemas de la infraestructura

Sistema	Vida útil (años)
Plataforma	
Movimientos en tierras	100
Túneles, puentes y obras de fábrica	100
Drenaje	25
Cerramientos	50
Superestructura de vía	30-60
Instalaciones eléctricas	
Línea aérea de contacto	20
Elementos de soporte de la línea aérea	60
Subestaciones eléctricas	60
Instalaciones de Señalización,seguridad y comunicaciones	25
Material Móvil	10-20
Edificios y otras construcciones	50

Fuente: (Fernández Arévalo & Vázquez, 2012).

[31] Guide to Cost-benefit Analysis of Investment Projects. Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020

Conocida la vida útil de cada elemento que conforma una infraestructura ferroviaria, el valor residual se puede estimar a partir de la siguiente expresión (3. 61):

$$Valor\ Residual = \sum_{i=n}^{m} (Coste\ de\ inversión_i - Depreciación_i \times n^{o}_{años}) \quad (3.\ 61)$$

Donde:

- $n^{o}_{años}$: corresponde al periodo (años) que pasan desde que se hace la inversión hasta el año en el que finaliza la evaluación (recuérdese que en las evaluaciones de proyectos europeos el evaluador suele considerar un horizonte de 30 años).

Con esta sección se finaliza el capítulo de costes en un proyecto de infraestructura ferroviaria y su relación con la velocidad. En él se ha definido, expuesto y cuantificado tanto los costes de operación como los costes de inversión para el operador de transporte, así como también para el gestor de la infraestructura.

En esta fase, ya son conocidos todos los parámetros (ingresos y costes) que alimentan un análisis financiero, pero no todos los necesarios para realizar una evaluación socio-económica. Para ello, es necesario determinar los beneficios sociales que aporta un proyecto de estas características, tarea que se desarrolla en el siguiente capítulo.

4. EFECTO DE LA VELOCIDAD EN LAS EXTERNALIDADES

4.1 INTRODUCCIÓN

Un análisis económico de un determinado proyecto evalúa la contribución de ese proyecto al bienestar económico de la región analizada, es decir, analiza la contribución que supone el proyecto a la sociedad.

Para ello, es necesario medir el aporte neto en términos monetarios, lo que se traduce en la necesidad de incluir en el análisis los beneficios netos actualizados del operador ferroviario y del administrador de la infraestructura, así como todas las externalidades monetizables del proyecto. Pero ¿cómo se cuantifica el aporte social de una infraestructura? La manera más habitual de incluir el beneficio social que aporta una infraestructura ferroviaria en un ACB, es mediante la incorporación de *precios sombra* y la estimación de las externalidades en términos monetarios (monetización de las externalidades).

Por lo tanto, dos cuestiones son básicas en esta fase del análisis: (i) ya no se calculan los ingresos, sino que lo que realmente se estiman son beneficios que aporta el proyecto, estimando los ahorros netos en costes externos que se generan y (ii) los costes del proyecto (inversión, costes de explotación…) deben de equilibrarse mediante la introducción de *precios sombra.*

A continuación, se expondrán ambos conceptos, con el objetivo de proporcionar órdenes de magnitud que pueda servir en futuros análisis.

4.2 PRECIOS SOMBRA

Uno de conceptos claves en todo análisis socio-económico es el llamado *precio sombra*. La consideración del bienestar en el análisis de un proyecto, en este caso de una infraestructura ferroviaria, contrasta con la del beneficio empresarial que se adopta en las evaluaciones financieras. Por ello, aunque los inputs básicos de entrada en los modelos (demanda, costes de inversión, mantenimiento…) sean exactamente los mismos, hay importantes diferencias.

Una de las principales diferencias radica en la necesidad de incorporar en todo análisis económico social valores corregidos por precios (*precios sombra*) que permitan corregir las ineficiencias en los mercados. Los precios corrientes de los consumos y de los bienes producidos, incluidos en la estimación de ingresos y costes, pueden no reflejar el valor social, ya que se pueden producir distorsiones del mercado (por ejemplo, caso de régimen de monopolio, de barreras comerciales, etc.)

Se entiende pues que los mercados “ineficientes” socialmente son aquellos que no reflejan el coste de oportunidad de los recursos utilizados en el proyecto, ni tampoco reflejan la disposición de los consumidores a pagar, ya sea porque los precios no reflejan el coste marginal o bien porque crean barreras de entrada a otros posibles competidores.

Un ejemplo de distorsión en el mercado puede darse en el caso de mercado de trabajo. Los salarios corrientes pueden desviarse a lo que realmente es el coste de oportunidad de la mano de obra (prestaciones por desempleo). En tales casos, el planificador del proyecto puede disponer de determinadas herramientas para corregir los salarios nominales.

En definitiva, la finalidad de utilizar *precios sombra* es la de reflejar el verdadero coste de utilizar los recursos empleados en el proyecto. La forma más eficiente de transformar los precios de mercado y las distorsiones en los mercados que los alejan de mercados eficientes, consiste en utilizar coeficientes que ponderan estos precios.

Teniendo en cuenta, por tanto, que es necesario ponderar o corregir los precios de mercado, el gestor de la infraestructura español en (Adif, 2011) asigna a cada una de las partidas de ingresos y gastos de un proyecto ferroviario un factor de conversión diferente (véase Figura 104).

	CONCEPTO/COSTE	PRECIOS SOMBRA: RATIOS S/PRECIO DE MERCADO
Costes de ADIF	Inversión en Infraestructura	0,72
	Costes de Mantenimiento Infraestructura	0,70
	Costes Generales y de Estructura	0,88
Costes de la EE.FF.	Inversión en Material Móvil	0,70
	Ligados a Ventas	0,70
	Catering y servicios a bordo (Ligados al Viajero)	0,88
	Personal (Ligados al Tiempo)	0,70
	Energía (Ligados a Circulación)	0,82
	Mantenimiento y Limpieza (Ligados a los Trenes)	0,88
	Generales y de Estructura	0,88

Figura 104. Factores de corrección que transforma los precios de mercado en precios sombra.

Fuente: Manual para la evaluación de inversiones en ferrocarril (Adif).

Mediante la aplicación de estos coeficientes a cada una de las partidas, se equilibra el análisis y permite al planificador de la infraestructura dejar al margen los desequilibrios que se generan en el mercado.

Es importante decir también que, en ausencia de distorsiones significativas, lo que ocurre cuando los mercados son competitivos, el precio de mercado es una buena aproximación al coste de oportunidad o a la valoración marginal del bien, por lo que en este tipo de situaciones no es necesaria la aplicación de coeficientes para corregir los precios.

4.3 VALUACIÓN ECONÓMICA EN TÉRMINOS MONETARIOS

Una externalidad se origina cuando la producción o el consumo de un bien, en este caso la propia actividad de transporte, afecta directamente a otras empresas, entidades y/o consumidores que no participan directamente y, además, estos efectos no se reflejan en el precio. Debido a su naturaleza, las externalidades son, en la mayoría de los casos, difíciles de evaluar (particularmente aquellas relacionadas con los impactos ambientales), aunque sí que son muy identificables.

La evaluación del impacto del proyecto en la sociedad debe incluir la cuantificación de los beneficios y/o costes externos que supone la realización de la nueva infraestructura. La manera de proceder consiste en determinar las externalidades en dos escenarios: (i) suponiendo que no se construye el proyecto, (“escenario base”) y (ii) considerando que se construye la línea férrea de alta velocidad (“con actuación”) y, por lo tanto, supone un cambio en la movilidad para la región analizada.

Por tanto, no debe olvidarse que ambos análisis de rentabilidad tanto financiera como social son contrafactuales, es decir, se toma como escenario base lo que habría

sucedido en caso de no acometer estas inversiones y, por lo tanto, los beneficios de construir una infraestructura deben calcularse como diferencia.

A modo de resumen, los ahorros (beneficios) que se derivan de la construcción de una nueva línea férrea de alta velocidad proceden de diferentes fuentes:

- Excedente neto del consumidor de nuevos viajes (tráfico inducido).
- Ahorros netos de tiempos de viaje.
- Ahorros netos de coste de operación de otros modos.
- Ahorros netos de los costes de accidente.
- Ahorros netos en costes ambientales.

La cuantificación de estos efectos y su integración en el análisis económico conjunto, es una tarea complicada que ha sido ampliamente estudiada en los últimos años. Como trabajo relevante se puede citar el estudio de (INFRAS/IWW., 2004), el cual ofrece para el año 2006 los costes externos asociados a los diferentes modos de transporte.

Los valores que ofrece este informe, representan un valor medio europeo que se utilizará como base en este estudio para el cálculo de las externalidades. Estos costes externos medios que han sido actualizados (precios constantes), se expresan en euros por cada 1.000 viajeros-kilómetro a excepción del coste de operación que se expresa en euros por cada viajero-kilómetro.

Para determinar los ahorros de un proyecto ferroviario es necesario obtener el número de viajeros transvasados de cada modo al ferrocarril de alta velocidad. Este cálculo se realiza obteniendo la diferencia entre los viajeros que utilizaban cada modo antes de la construcción de la nueva infraestructura y aquellos que siguen utilizando dichos modos después de la construcción de la nueva infraestructura (datos obtenidos del estudio de demanda). Además, es necesario conocer los viajeros inducidos por la construcción de la nueva infraestructura, la longitud del recorrido y el tiempo de recorrido en cada modo.

4.3.1 Excedente neto del consumidor de nuevos viajeros (tráfico inducido)

Uno de los beneficios propios del proyecto corresponde al excedente neto del consumidor, entendiendo como excedente del consumidor a la cantidad adicional que el consumidor está dispuesto a pagar por una reducción en el coste del viaje.

El excedente del consumidor se representa como el área (CS_0) delimitada por las curvas de demanda y coste generalizado (véase Figura 105). Obsérvese que una reducción del coste generalizado, gracias a la reducción que supone para el viajero el nuevo proyecto, implica un incremento en el beneficio del consumidor, si se analiza en relación al coste generalizado sin proyecto (área GC^1GC^0ba).

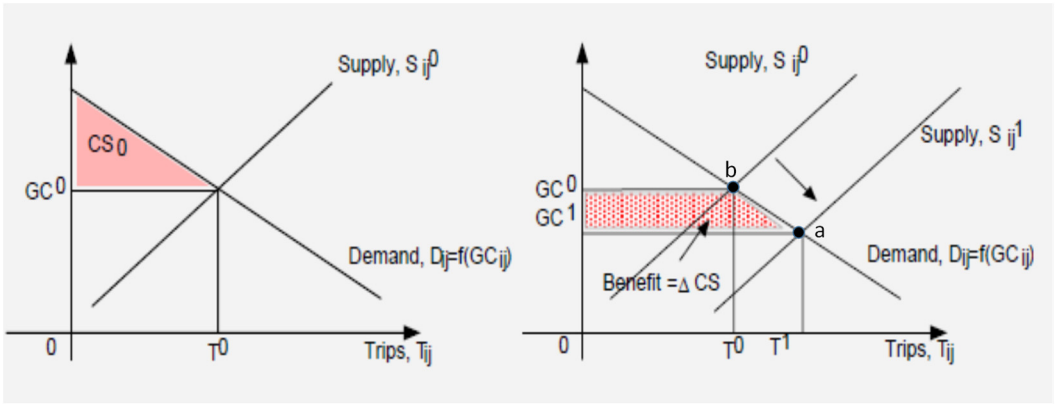


Figura 105. Excedente neto del consumidor asociado a la construcción de una nueva infraestructura

Fuente: (European Commision, 2008).

Generalmente la curva real de la demanda (D_{ij}) es desconocida, aunque puede asumirse que es una línea recta, lo que permite emplear la formulación correspondiente a la regla de la mitad (ecuación (4. 1)).

$$ACS = \int_{GC_1}^{GC_0} D(GC)dGC = \frac{1}{2}(GC_0 - GC_1) \cdot (T_0 + T_1) \quad (4.\ 1)$$

Donde:

- GC_0-GC_1: representa la diferencia en coste generalizado sin proyecto (GC0) y con proyecto (GC_1),
- T_0: viajes entre origen y destino sin proyecto,
- T_1: viajes entre origen y destino con proyecto.

Obsérvese que si lo que realmente se estima es el excedente neto de los nuevos viajeros que se incorporan al mercado como resultado de la construcción de la nueva infraestructura, el beneficio ahora corresponde solamente al área B de la Figura 105, resultado la siguiente expresión (4. 2).

$$EC = \frac{1}{2}(GC_0 - GC_1)(T_1 - T_0) = \frac{1}{2}(GC_0 - GC_1) \cdot T_{Ind} \quad (4.\ 2)$$

Donde:

- EC: excedente neto de los nuevos viajeros (€) y
- T_{ind}: demanda inducida.

Puede afirmarse que la relación de este beneficio (excedente neto del consumidor) con la velocidad es clara y doble: la velocidad afecta tanto al coste generalizado como al tráfico inducido. Como se ha expuesto en el apartado 0, un incremento de la velocidad reduce el coste generalizado, lo que a su vez incrementará el número de nuevos viajeros.

4.3.1.1 Aplicación caso ejemplo Madrid-Valencia

Conocida la metodología que permite la cuantificación del excedente neto del consumidor de los nuevos viajeros, se aplica al caso ejemplo Madrid-Valencia, para diferentes velocidades y diferentes precios de billete. Los resultados que se obtiene son relativos a millones de euros al año, es decir, corresponden al beneficio anual que se obtiene por construir la infraestructura.

Para cada uno de los escenarios (definidos por la velocidad media y el precio) se obtendrán un coste generalizado (con actuación) y una demanda inducida diferente, como se ha mostrado en el capítulo de estimación de la demanda, tanto la velocidad como el precio influyen en la decisión de viajar.

El caso ejemplo se ha realizado teniendo en cuenta el escenario base y, por lo tanto, se estima la diferencia en costes externos entre el escenario base y aquel en el que se presentan servicios ferroviarios de alta velocidad (con actuación), por lo que el coste generalizado estimado para el caso sin actuación es el mismo en todos los supuestos. Los resultados obtenidos tras aplicar la ecuación (4. 2), en cada uno de los escenarios propuestos, son los que se muestran en la Figura 106.

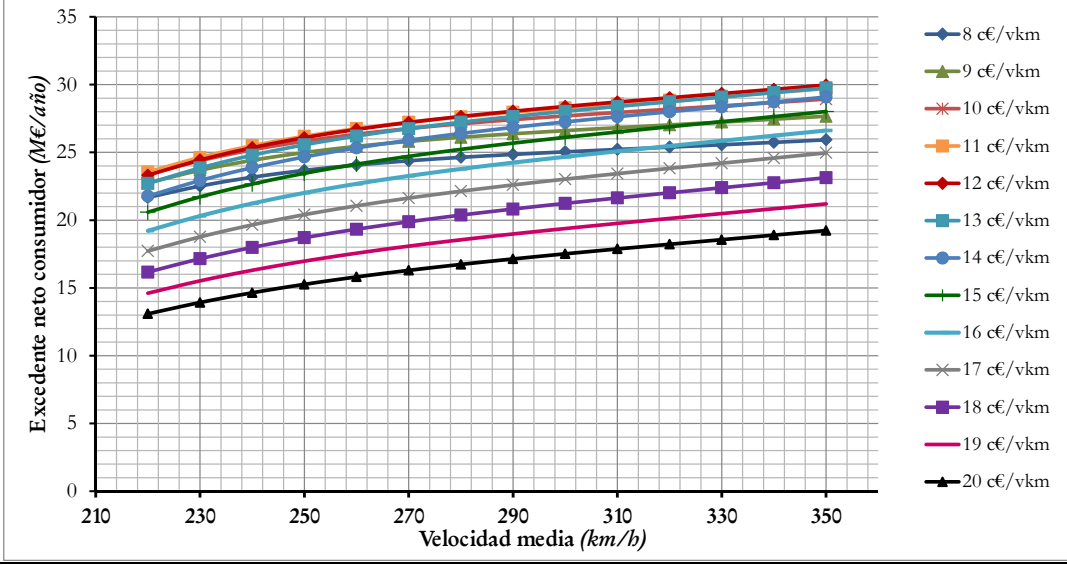


Figura 106. Excedente neto del consumidor (M€/año) en función de la velocidad media

Fuente: Elaboración propia.

La gráfica muestra como la velocidad influye claramente en el beneficio, ya que reduce el coste generalizado (menor tiempo de viaje, menor coste asumido por el viajero). Se observa cómo el ahorro máximo se consigue para precios de billete entre 11 c€/vkm y 12 c€/vkm, esto es, básicamente, lo mismo que sucedía con los ingresos del operador (Tabla 31) en el apartado 2.5.1.

De los resultados se deriva que un incremento en la tarifa implica un incremento en el coste generalizado, como el análisis se realiza como diferencia entre el coste generalizado con proyecto y coste generalizado sin proyecto, al incrementar el coste generalizado con proyecto (por incrementar el precio de billete) se reduce el beneficio que supone para el viajero.

En definitiva, para el caso ejemplo analizado se producen unos beneficios atribuibles al tráfico inducido que van desde los 13M€/año hasta los 30M€/año dependiendo de la tarifa fijada por el operador y de la velocidad media.

4.3.2 Ahorros netos de tiempo de viaje

El ahorro neto de tiempo de viaje se deriva de la diferencia en euros que supone viajar en tren de alta velocidad frente a otros modos de transporte (coche, autobús, avión, tren convencional).

Este ahorro se obtiene para cada uno de los viajeros que han sido captados por el ferrocarril de alta velocidad, como la diferencia en tiempo de viaje de cada modo entre la situación base (situación sin actuación) y el tren alta velocidad (situación con actuación), multiplicando este resultado por el valor monetario (valor del tiempo de viaje) que los viajeros asignan al tiempo.

La expresión que permite su estimación se muestra a continuación:

$$A_{T.viaj} = \sum_{i=n}^{m} ((T_i - T_{AVE}) \times V.monet_{T.viaj} \times V.transv_{i-AVE}) - T_{ind} \times T_{AVE} \quad (4.3)$$

Donde:

- $A_{T.viaj}$: Ahorro netos de tiempo de viaje (€).

- T_i: tiempo de viaje total (corresponde la suma del tiempo de todas las fases de viaje) de cada modo i (coche, autobús, avión, tren convencional) (h).
- T_{AVE}: tiempo de viaje total (corresponde la suma del tiempo de todas las fases de viaje) del tren de alta velocidad (h).
- V. monet $_{T.viaj}$: es el valor monetario del tiempo a bordo de cada uno de los modos i (€/h).
- V. $transv_{i\text{-}AVE}$: viajeros que han dejado de viajar en el modo i para viajar en tren de alta velocidad y
- T_{ind}: demanda inducida.

Se ha tomado 15€/h como valor del tiempo para todos los modos de transporte, mismo valor que el utilizado para estimar la demanda (véase capítulo 2.2.1), pues en el manual elaborado por Adif (Adif, 2011) se recomienda emplear el mismo valor utilizado en el estudio de demanda, en el caso que en el estudio de demanda se emplee esté parámetro.

4.3.2.1 Aplicación caso ejemplo Madrid-Valencia

La figura que se muestra a continuación (Figura 107), muestra los resultados obtenidos, relativos al ahorro neto en tiempo de viaje, tras aplicar la ecuación (4. 3) en el caso ejemplo de la línea de alta velocidad Madrid-Valencia para diferentes velocidades comerciales y diferentes precios de billete.

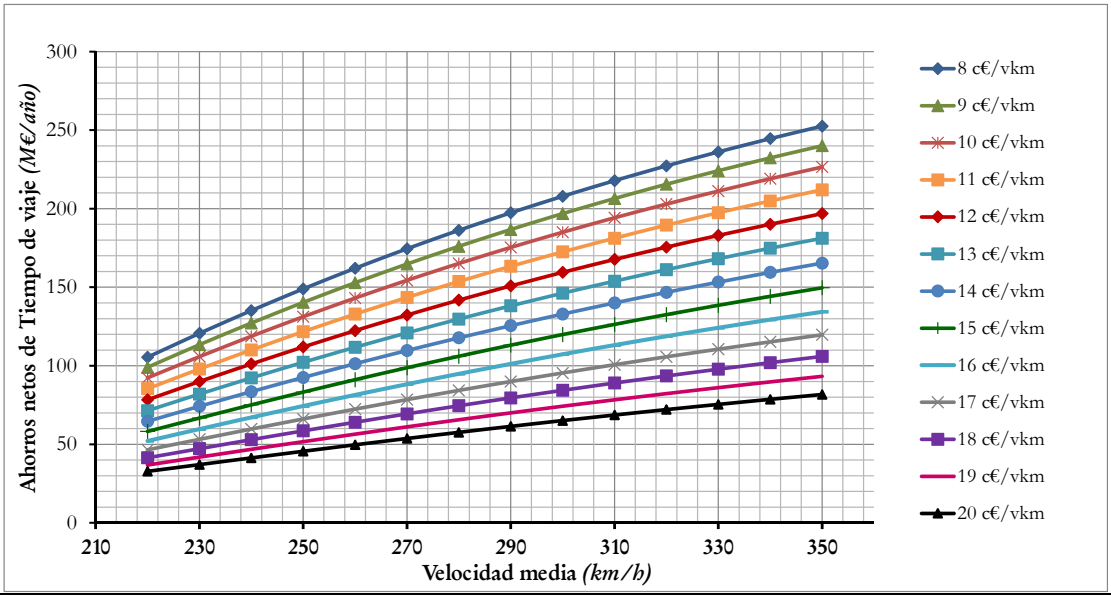


Figura 107. Ahorros netos de tiempo de viaje (M€/año) en función de la velocidad media

Fuente: Elaboración propia.

La velocidad influye claramente en el ahorro de tiempo. Generalmente, dos son las causas que producen este incremento en los ahorros de tiempo:

- Un incremento en la velocidad reduce el coste generalizado y, por lo tanto, incrementa el número de viajeros transvasados de otros modos de transporte al tren de alta velocidad.
- Un incremento en la velocidad comercial del tren de alta velocidad incrementa la diferencia de tiempo de viaje entre el resto de modos y el tren de alta velocidad.

Puede observarse cómo, a medida que la velocidad media aumenta (reducción del tiempo de viaje del tren de alta velocidad), se incrementa el beneficio aportado por el parámetro tiempo. Puede afirmarse que el ahorro en tiempo de viaje es una de los parámetros que mayor influencia tiene sobre el beneficio que aporta una infraestructura de alta velocidad a la sociedad.

Si se centra el análisis de los resultados en un escenario posible, por ejemplo, para una velocidad media de 220km/h y un precio de 18c€/vkm, el ingreso neto por ahorro de tiempo ronda los 41,5M€ al año, lo que aproximadamente corresponde al 33% del total de los beneficios sociales que aporta el proyecto.

4.3.3 Ahorros netos de costes de operación de otros modos

La siguiente partida a calcular corresponde a los ahorros netos de coste de operación, es decir, los costes de operación "ahorrados" por los viajeros que pasan a viajar en alta velocidad y que antes viajaban en coche, autobús y/o avión. Se calculan a partir de la ecuación que se muestra a continuación:

$$A_{C.Oper} = \sum_{i=n}^{m} \left(V.transv_{i-AVE} * km_i \times V.monet_{C.Oper_i} \right) \quad (4.\ 4)$$

Donde:

- $A_{C.Oper}$: ahorros netos de costes de operación (€).
- V. transv $_{i\text{-}AVE}$: viajeros que han dejado de viajar en el modo i para viajar en tren de alta velocidad.
- i: cada uno de los modos de transporte (coche, autobús, avión y ferrocarril convencional).
- km_i: longitud del recorrido en coche, autobús, avión y tren convencional.
- km_{AVE}: longitud del recorrido en tren de alta velocidad y
- V. monet.$_{C.Oper}$: valor monetario del coste de operación (€/viaj-km).

Como puede observarse de la formulación anterior, a los ahorros conseguidos por el transvase de viajeros de los diferentes modos al tren de alta velocidad no se descuenta el coste incurrido por viajar en alta velocidad, pues si se incluyera esta cuantía se estaría contabilizado doblemente, ya que los costes operacionales atribuibles al tren de alta velocidad ya se están incorporando cuando estimamos los costes de explotación (apartado 3.2.2).

La tabla que se muestra a continuación (Tabla 105) resume el valor monetario referente al coste de operación de cada uno de los modos de transporte considerado. Los valores aquí resumidos han sido extraídos del informe (Adif, 2011). Este informe propone una metodología de cálculo que se basa en la extrapolación de costes unitarios medios de servicios existentes, lo que constituye una referencia de los diferentes costes asociados a cada uno de los modos y, a falta de información más detallada, proporciona un orden de magnitud que actualmente se derivan de la actividad de transporte.

Tabla 105. Costes de operación asociados a los diferentes modos de transporte de viajeros.

	Valor monetario. Coste de operación *(€/pasajero.km)*
Coche	0,103
Autobús	0,035
Tren convencional	0,029
Avión	0,094
Tren alta velocidad	0,035

Fuente: (Adif, 2011).

4.3.3.1 Aplicación caso ejemplo Madrid-Valencia

Aplicando la ecuación (4. 4) en el caso ejemplo Madrid-Valencia y para todos los escenarios de velocidad y precios supuestos se obtiene los resultados mostrados en la Figura 108.

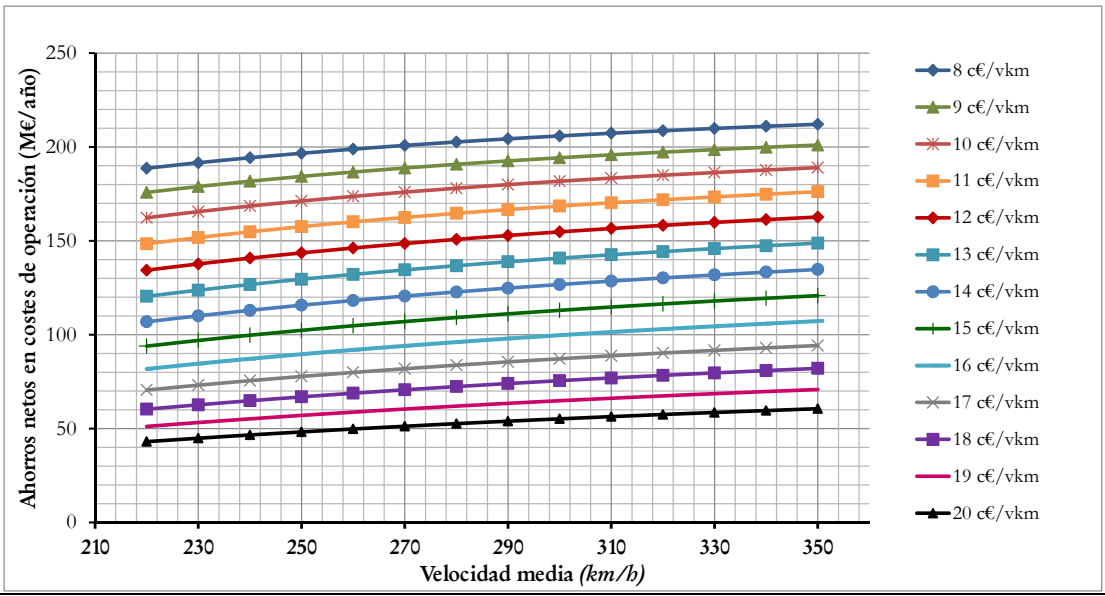


Figura 108. Ahorros netos en costes de operación (M€/año) en función de la velocidad media.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos muestran que los beneficios atribuibles a la construcción de una infraestructura de alta velocidad y a la operación de servicios ferroviarios de alta velocidad entre estas dos ciudades son elevados y muy similares, en volumen, a los ahorros netos en tiempos de viaje.

También se puede observar que la velocidad media tiene una influencia clara en los beneficios, pues un incremento en la velocidad media supone un incremento en los beneficios que aporta el proyecto. Puede afirmarse también que la influencia de la velocidad es menor que en el caso anterior (ahorros netos de tiempo de viaje), pues en este caso la velocidad solo influye en los viajeros transvasados de los diferentes modos al tren de alta velocidad.

4.3.4 Ahorros netos de costes de accidentes

Los accidentes suponen uno de los más visibles e importantes impactos negativos asociados al transporte. La reducción del número de accidentes y, por supuesto, de los daños asociados, es una de los parámetros más importantes dentro de una evaluación de una infraestructura.

La metodología aplicada que cuantifica económicamente esta externalidad, se basa en determinar el número de muertes o lesiones por viajero transportado y por modo de transporte. Posteriormente, se estima el coste que supone para la sociedad las consecuencias producidas por los accidentes. No solo consiste en cuantificar económicamente las muertes, lesiones graves y lesiones leves producidas en los accidentes, sino que también el coste soportado por las administraciones y el coste debido a la reducción o pérdida de producción para la economía de un país, debido a esta falta de capital humano.

El manual para evaluación de inversiones del ferrocarril elaborado por Adif estima este coste externo y atribuye para cada modo de transporte un valor monetario. A continuación se muestran (Tabla 106) el coste medio de accidentes según modo de

transporte determinado por (Adif, 2011), resultado de multiplicar la "accidentabilidad" o el índice de peligrosidad de cada modo de transporte por el valor monetario que supone para la sociedad las consecuencias producidas por los accidentes (muertes, heridos,…).

Tabla 106: Costes medio de accidentes según modo de transporte.

	Valor monetario Coste accidentes (€/1000 viajeros.km)
Coche	16,9
Autobús	2,6
Tren convencional	0,9
Avión	0,4
Tren alta velocidad	0,9

Fuente: (Adif, 2011).

Una vez cuantificado económicamente el coste para cada uno de los modos de transporte, el ahorro en costes neto se determina como la diferencia entre el coste de cada modo y el coste incurrido por el nuevo modo de transporte; es decir el ahorro en coste que supone reducir el número de accidentes por el hecho de que un determinado número de viajeros deciden dejar de viajar en modos con un mayor índice de accidentabilidad para viajar en el ferrocarril de alta velocidad, con un menor índice de accidentabilidad y peligrosidad.

El cálculo de estos ahorros se puede estimar aplicando la siguiente expresión (4. 5):

$$A_{C.accid} = \left(\sum_{i=n}^{m} \left[(V.transv_{i-AVE}) \times \left(km_i \times V.monet_{C.accid_i} - km_{AVE} \times V\ monet_{C.accid\ AVE} \right) \right] - T_{ind} \times V\ monet_{C.accid\ AVE} \right) / 1000 \quad (4.\ 5)$$

Donde:

- $A_{C.accid}$: ahorro neto de costes de accidentes (€).
- V. $transv_{i\text{-}AVE}$: viajeros que han dejado de viajar en el modo i para viajar en tren de alta velocidad.
- i: cada uno de los modos de transporte (coche, autobús, avión y ferrocarril convencional).
- km_i: longitud del recorrido en coche, autobús, avión y tren convencional;
- km_{AVE}: longitud del recorrido en tren de alta velocidad.
- V. $monet_{C.accid\ i}$: precio de los accidentes en coche, autobús, avión y tren convencional (€/1.000 viajeros-km).
- V. $monet_{C.accid\ AVE}$: precio de los accidentes en alta velocidad (€/1.000 viajeros-km).

4.3.4.1 Aplicación caso ejemplo Madrid-Valencia

Conocido el coste medio por modo y la ecuación que permite la estimación del ahorro neto de costes de accidentes, al igual que en el resto de externalidades, se aplica la metodología expuesta en la línea de alta velocidad Madrid-Valencia. Los resultados obtenidos se muestran en la figura que se incluye a continuación (Figura 109).

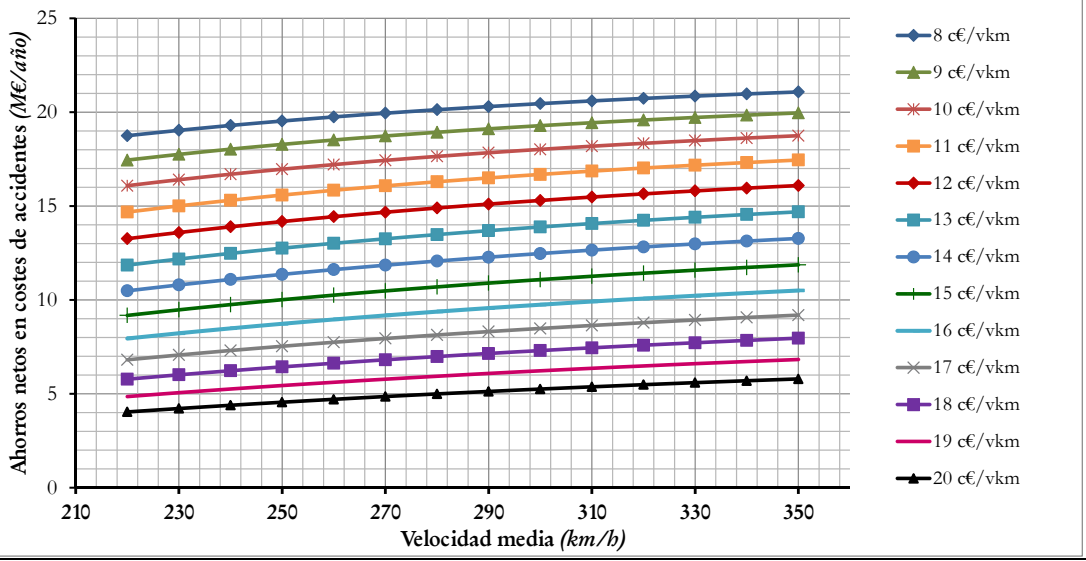


Figura 109. Ahorros netos en costes de accidentes (M€/año) en función de la velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

El ahorro neto de costes de accidentes para el caso ejemplo analizado, toma valores entre los 4M€/año y los 21M€/año. Al igual que en los casos anteriores, la velocidad influye en los beneficios, pues mayor velocidad comercial mayor ahorro neto en coses de accidentes, ya que a mayor velocidad mayor número de viajeros transvasados al tren de alta velocidad.

Recuérdese que la velocidad media (tiempo de viaje) también influye en la demanda inducida (mayor velocidad implica mayor número de viajeros nuevos), por lo que el ahorro en accidentes se ve afectado negativamente por este incremento. Obsérvese que la demanda inducida tiene en cuenta un tráfico que antes no viajaba y que ahora viaja en el tren de alta velocidad y, por lo tanto, por baja que sea la accidentabilidad del tren de alta velocidad, existe una influencia negativa en el ahorro total.

4.3.5 Ahorro neto en costes medioambientales

Los proyectos relativos a la construcción de infraestructuras destinadas a actividades de transporte suelen conducir a grandes cambios en el medioambiente, generando efectos nocivos o daños al entorno. Efectos como el empeoramiento de la salud en la población, ya sea por la emisión de gases (CO_2, NO_x, SO_2, …) o por la contaminación acústica, repercuten en un incremento del coste en servicios públicos. Por ello, es imprescindible cuantificar el impacto social a la hora de valorar un determinado proyecto, pues no tenerlos en cuenta reduciría el alcance del análisis.

La construcción de una infraestructura ferroviaria de alta velocidad puede ayudar a reducir el impacto medioambiental de la actividad transporte, por ejemplo, un transvase de viajeros a modos de transporte menos contaminantes, se traduce en ahorros netos en el coste social por impacto en el cambio climático. Pero también puede existir la posibilidad que la infraestructura afecte negativamente al medioambiente en términos, por ejemplo, de contaminación acústica o efectos urbanos.

Por lo tanto, el análisis del impacto medioambiental de infraestructuras de transporte debe realizarse como suma del ahorro neto de todos aquellos impactos que afectan negativamente al medioambiente. Según (HEATCO, 2004) los principales impactos medioambientales que deben estimarse en un ACB son: polución atmosférica, calentamiento global y ruido. Se afirma también que existen otros impactos

(externalidades) que son raramente cubiertos por un ACB, debido a la dificultad para asignarles un valor monetario.

Sin embargo, impactos tales como el efecto barrera (impacto en la naturaleza y paisaje) o pérdida de espacio en las ciudades que supone la construcción de una infraestructura (efectos urbanos) que según HEATCO son difícilmente cuantificables, son abordadas en el (INFRAS/IWW., 2004), el cual ofrece una serie de valores (económicos) para cada modo, lo que permite su cuantificación e incorporación en el ACB.

Basándonos en ambos informes (HEATCO e INFRAS) se estudiarán los costes externos y el ahorro neto que supone construir una línea de alta velocidad, en las externalidades que se disponen a continuación:

- Ahorro en costes netos por impacto en el cambio climático.
- Ahorro en costes netos por impacto en el ruido o contaminación acústica.
- Ahorro en costes por impacto en la polución atmosférica.
- Ahorro en costes netos por impacto en la naturaleza y paisaje.
- Ahorro en costes netos por efectos urbanos.

En los siguientes apartados se expondrá de manera detallada la metodología de cálculo que permitirá cuantificar cada uno de las externalidades medioambientales definidas, determinando el ahorro que supone para la sociedad la construcción de una infraestructura ferroviaria de alta velocidad.

4.3.5.1 Ahorros en costes netos por impacto en el cambio climático

La incidencia de los proyectos de transporte (por ejemplo, infraestructuras ferroviarias) sobre el cambio climático es grande y, en general, se evalúa mediante la estimación de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Según el Protocolo de Kioto[32], son seis los gases de efecto invernadero: dióxido de carbono (CO_2), óxido de nitrógeno (N_2O), hidrofluorocarburos (HFC), metano (CH_4), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6). Es importante destacar que las emisiones GEI suelen formularse en términos de peso equivalente de CO_2 (CO_2e), aunque también es cierto que la incidencia de gases CH_4, N_2O y de gases fluorados es reducida en el sector transporte, por lo que, generalmente, suele emplearse las emisiones de CO_2 como indicador del calentamiento global.

Es importante destacar que las emisiones de GEI se producen en diferentes fases o etapas de un proyecto: construcción de la infraestructura, explotación y desmantelamiento y reciclaje de la infraestructura y de los vehículos. Todas y cada una de estas fases son estudiadas dentro de nuestro análisis, pues todas ellas influyen en la decisión de construir el proyecto.

Generalmente, la evaluación de proyectos en términos de impacto en el cambio climático tiene en cuenta solamente la fase de operación, puede afirmarse que es en esta etapa en la que mayor cantidad de emisiones de CO_2 se producen. Pero si el análisis se centrase solamente en la operación, se estaría dejando fuera del análisis una cantidad de emisiones nada desdeñable, por lo que la evaluación quedaría bastante limitada. De hecho, tanto en el último informe elaborado por (Betancor & Llobet, 2015) como en los estudios realizados por (De Rus, 2012) se afirma que los ahorros que se consiguen durante la operación de los servicios de alta velocidad son prácticamente compensados por las emisiones producidas durante la fase de construcción.

[32] El Protocolo de Kioto sobre el cambio climático es un protocolo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), y un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global:

http://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_Kioto_sobre_el_cambio_clim%C3%A1tico

Esta nueva idea pone de manifiesto la falta de una metodología común y consolidada que permita evaluar y contrastar estas afirmaciones. Por ello, en los últimos años se están realizando esfuerzos significativos desde diferentes administraciones públicas, en forma de recomendaciones, normas, etc., para impulsar metodologías que ayuden a la cuantificación y determinación de los probables efectos en el medio ambiente, especialmente en el cambio climático, de proyectos de transporte. Leyes como la 21/2013[33] inciden en la necesidad de estudios y metodologías que permitan determinar "*(…) los efectos previsibles directos o indirectos (…) del proyecto sobre (…) el cambio climático durante las fases de ejecución, explotación y en su caso durante la demolición o abandono del proyecto"*.

En este contexto, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente y el Ministerio de Fomento encargan al CEDEX[34] la elaboración de un documento de orientación y apoyo a la evaluación de la incidencia sobre el cambio climático de los planes, programas y proyectos de transporte (Compte & Crespo, 2015). Los criterios de evaluación propuestos en este informe son los utilizados para la determinación del impacto en el cambio climático que se realizará en esta tesis, pues dichas recomendaciones serán de aplicación en la evaluación de proyectos, planes y programas sujetos al procedimiento regulado por la Ley 21/2013.

A continuación, se expone, de manera detallada, los citados criterios, que se complementan con diferentes estudios e informes, con el objetivo de desarrollar una metodología consistente y adecuada.

4.3.5.1.1 Emisiones atribuibles al tráfico vial

Emisiones en la fase de operación, fabricación, mantenimiento y desguace de los vehículos

En el caso de planes de carretera, las emisiones atribuibles a la operación de los vehículos (incluyendo las emisiones *well-to-tank*), así como a la fabricación de los mismos, mantenimiento y desguace, se muestran en la Tabla 107.

Tabla 107: Factores medios de emisión de GEI por vehículo y kilómetros recorridos.

Categoría de vehículo			Emisiones ($grCO_2e$/veh-km)		
			Actuales	Año 2020	Año 2030
Vehículos ligeros	Motocicleta	Motor térmico (gasolina)	134	114	94
	Turismo	Motor térmico (gasóleo, gasolina o GLP)	228	194	160
		Híbrido	118	115	104
		Eléctrico	110	82	71
	Vehículo de carga ligero (peso bruto < 3,5 Tm)	Motor térmico (gasóleo o gasolina)	326	293	261
		Eléctrico	-	127	110
Vehículos pesados	Vehículo de carga pesado (peso bruto > 3,5 Tm)	Motor térmico (gasóleo o gasolina)	992	868	744
	Autobús	Motor térmico (gasóleo)	1.138	958	821

Fuente: (Compte & Crespo, 2015).

[33] Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental:

http://www.boe.es/boe/dias/2013/12/11/pdfs/BOE-A-2013-12913.pdf

[34] Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

Obsérvese que para expresar las emisiones de GEI por unidad de transporte (en nuestro caso se utilizará pasajeros-kilómetros), es necesario emplear factores de ocupación por vehículo. En el caso de vehículo privado, se ha utilizado para el análisis de demanda una ocupación de 1,3 viajeros/vehículo y, por lo tanto, este será el valor de referencia en nuestro estudio. En el caso del modo autobús, se emplea un factor de ocupación de 18 viajeros/vehículo, coeficiente estimado por el (Ministerio de Fomento, 2013).

A continuación, se muestra las emisiones atribuibles a la operación, fabricación y desguace de los turismos y autobuses en función de los viajeros kilómetro.

Tabla 108: Factores medios de emisión de GEI por vehículo y kilómetros recorridos.

Categoría del Vehículo	Emsiones ($grCO_2e$/p-km)		
	Actuales	Año 2020	Año 2030
Turismo	175,4	149,2	123,1
Autobús	63,22	53,22	45,61

Fuente:(Compte & Crespo, 2015).

Las emisiones de CO_2 dependen directamente del consumo de los vehículos que, a su vez, depende de la tecnología instalada (motor, cilindrada, …), por lo que pueden existir grandes diferencias en relación a valores medios empleados en otros estudios, pues el tipo de vehículo empleado o el tipo de la tecnología considerada puede ser muy diversa. Sin embargo, estudios como el de (Baron, Tuchschmid, Martinetti, & Pépion, 2011), obtienen datos similares a los aquí mostrados (130gCO_2/p-km en la fase de operación y 20,7gCO_2/p-km para la fase de mantenimiento, fabricación y desguace), valores un poco más bajos debido, principalmente, a que están considerando una ocupación por turismo de 1,6 viajeros/vehículo.

Emisiones en la fase de construcción de carreteras

El informe elaborado por (Compte & Crespo, 2015) determina las emisiones atribuibles a la fase de construcción, basándose en los trabajos realizados (Baron et al., 2011) y (Fairburn & Prof Pugh, 2006). Ambos estudios utilizan casos reales para la cuantificación de las emisiones de GEI. La Tabla 109 que se muestra a continuación recoge los valores estimados.

Tabla 109: Emisiones medias de GEI por kilómetro de carretera construido

Tipo de carretera		Emisiones	
Carretera convencional nueva	Terreno llano	2.800 tCO_2e/km	2.000 tCO_2e/km
	Terreno accidentado		4.000 tCO_2e/km
Autovía o autopista nueva	Terreno llano	4.900 tCO_2e/km	3.500 tCO_2e/km
	Terreno accidentado		7.000 tCO_2e/km
Desdoble de una carretera convencional	Terreno llano	2.100 tCO_2e/km	1.500 tCO_2e/km
	Terreno accidentado		3.000 tCO_2e/km

Fuente: (Compte & Crespo, 2015).

A modo resumen y como dato destacado, (Baron, Tuchschmid, Martinetti, & Pépion, 2011) estima que las emisiones por kilómetro y año[35] generadas en la construcción de una autopista ronda los 73tCO_2e/km-año, aplicando el factor de emisiones empleado en

[35] Corresponde al total de emisiones generadas en la construcción de la infraestructura divididas entre los años de vida útil de cada elemento y tipo de obra que compone la infraestructura (túnel, viaducto, pavimento, …)

la elaboración del citado artículo (91gCO_2e/kWh), se determina el consumo atribuible a la etapa de construcción. En este caso corresponde a 802.197,8kWh.

En cuanto a las emisiones atribuibles a las actividades de mantenimiento y a la operación de la infraestructura (incluyendo rehabilitación del firme), se pueden emplear los valores obtenidos en (Fairburn & Prof Pugh, 2006), que estiman un valor de 30tCO2e/km-año para esta actividad.

4.3.5.1.2 Emisiones atribuibles al tráfico aéreo

Emisiones en la fase de operación, fabricación, mantenimiento y desguace de los vehículos

Para el cálculo de las emisiones de GEI en el modo aéreo se empleará la metodología y los valores propuestos en el informe EcoPassenger. Este informe calcula las emisiones dependiendo de la distancia y del tipo de avión. En él se diferencian 4 fases de vuelo (Rodaje/Taxi, Crucero, Despegue/Ascenso y Descenso/Aterrizaje). Estas diferentes fases corresponden a las que se representan en la figura que se muestra a continuación (Figura 110).

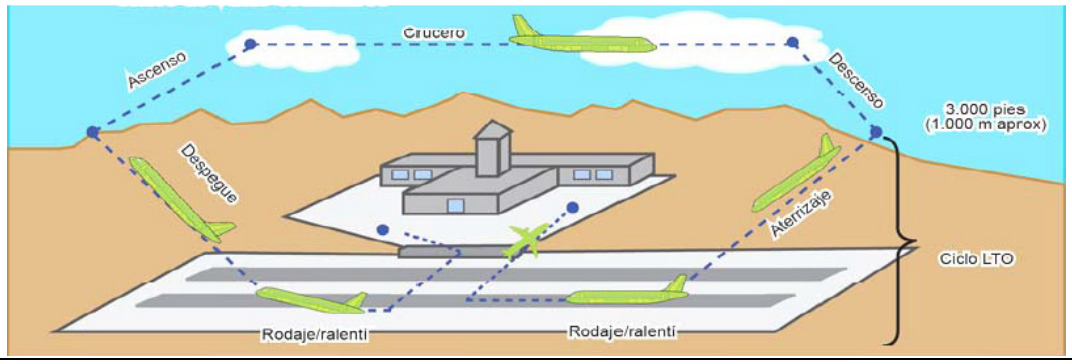


Figura 110. Ciclos de vuelo.

Fuente: Observatorio de Sostenibilidad en Aviación, OBSA.

A continuación se muestra, a modo de resumen, los consumos y emisiones, en función de la distancia recorrida, obtenidas del informe EcoPassenger (véase Tabla 110).

Tabla 110: Consumo de energía (gr-keroseno/plazas-kilómetro) y emisiones en función de la distancia

Distancia	FC	CO2	NOx	SO2	NMVOC	PM
	g/Plaza.km	*kg/kg*	*g/kg*	*g/kg*	*g/kg*	*g/kg*
125 km	40.9	3.150	12.8	0.06	0.52	0.04
250 km	35.4	3.150	11.5	0.06	0.34	0.04
375 km	33.2	3.150	11.5	0.06	0.25	0.04
500 km	30.9	3.150	11.6	0.06	0.15	0.04
625 km	28.3	3.150	11.4	0.06	0.18	0.04
750 km	27.2	3.150	11.2	0.06	0.21	0.04
1000 km	24.8	3.150	10.7	0.06	0.24	0.04
>1000 km	23.9	3.150	9.4	0.06	0.09	0.04
Taxi (g/Seat)	1,000.0	3.150	4.1	0.06	1.7	0.04

Source: DLR 2000, LH°1993, LH°2005, IFEU 2006

Fuente: EcoPassenger.

En cuanto a la evolución de las emisiones de CO_2, puede afirmarse que este modo de transporte ha realizado importantes avances en los últimos 50 años para reducir el consumo de energía, pues dentro de la estructura de costes de una operadora aérea es una de las partidas más importantes. Esta mejora en la eficiencia puede observarse en la gráfica que se muestra a continuación (Figura 111).

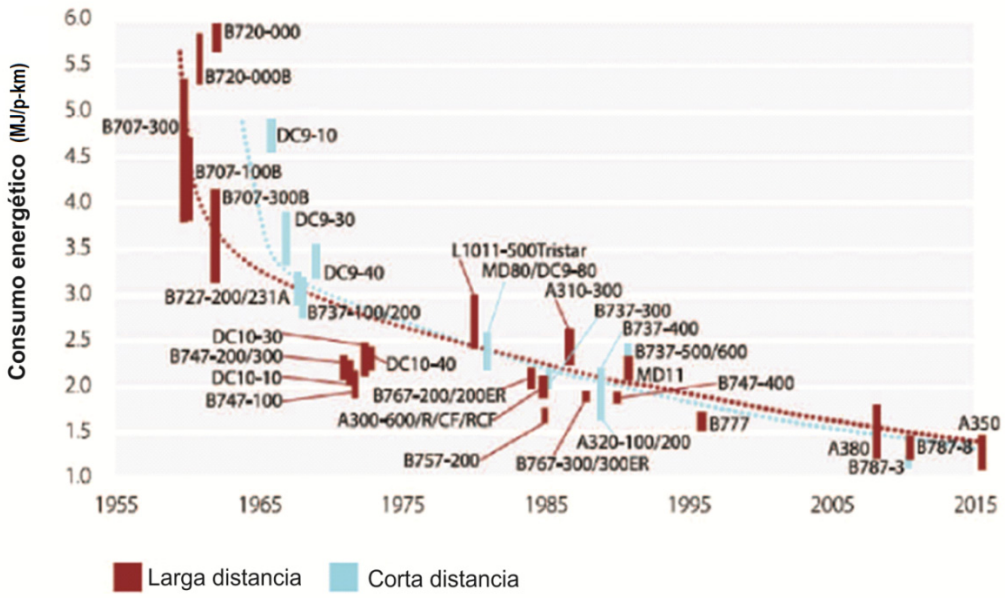


Figura 111. Consumo de energía del modo avión en los últimos sesenta años.

Fuente: (UIC, 2015).

El ritmo de mejora en la eficiencia energética observado puede justificarse en la mejora de las tecnologías introducidas en las aeronaves y en la mejora de la gestión del tráfico aéreo. Teniendo en cuenta las previsiones o predicciones realizadas por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente[36] para los sucesivos años, puede considerarse una reducción del 1,3% anual en el consumo de combustible en vuelos nacionales y del 1,2% en tráfico internacional.

Se destaca que en los factores incluidos en la Tabla 110 no se ha tenido en cuenta las emisiones atribuibles al proceso de fabricación, mantenimiento y desguace de las aeronaves. Aunque en las recomendaciones propuestas por el CEDEX se afirma que las emisiones asociadas a esta fase son despreciables, en (García Álvarez, 2011c) se estima que aproximadamente unas 3.800tCO_2 son atribuibles al proceso de fabricación, mantenimiento y desguace, lo que equivaldría a unos 0,27grCO_2/vkm (suponiendo un avión de 180 plazas ocupadas al 70% que recorre 55.000.000 km a lo largo de su vida útil).

Emisiones atribuibles al tráfico terrestre fuera del recinto aeroportuario

En el acceso y dispersión a los aeropuertos se producen emisiones que deben de ser imputadas al modo aéreo, pues estás no se producirían si los aeropuertos estuvieran situados en el centro de las ciudades. Para estimar las emisiones anuales atribuibles al acceso terrestre al aeropuerto podrá emplearse como referencia los factores incluidos Tabla 111.

[36] Proyecciones de emisiones de gases de efecto invernadero 2011-2030. Comunicación de España a la Comisión Europea, en cumplimiento del artículo 3.2. (b) de la Decisión 280/2004/CE. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Tabla 111: Factores de emisión medios para el cálculo de GEI atribuibles al acceso terrestre al aeropuerto.

Modo de acceso al aeropuerto		Emisiones		
		Actuales	2020	2030
Turismo	Privado/Alquilado	228 $grCO_2e$/veh-km	194 $grCO_2e$/veh-km	160 $grCO_2e$/veh-km
	Taxi	213 $grCO_2e$/veh-km	181 $grCO_2e$/veh-km	149 $grCO_2e$/veh-km
Autobús		1.138 $grCO_2e$/veh-km	958 $grCO_2e$/veh-km	821 $grCO_2e$/veh-km
Tren de cercanías / Metro convencional		57,3 $grCO_2e$/p-km	35,6 $grCO_2e$/p-km	28,3 $grCO_2e$/p-km

Fuente: (Compte & Crespo, 2015)

Las emisiones incluidas en la Tabla 111 se aplicarán a los desplazamientos realizados por los viajeros que llegan o salen del aeropuerto (tráfico comercial de pasajeros, excluido tránsitos). Por lo que, es necesario multiplicar los factores de emisión por el coeficiente de ocupación de cada modo de transporte.

Emisiones atribuibles a la construcción y ampliación de infraestructura

Las emisiones atribuibles a la construcción o ampliación de un aeropuerto son, generalmente, muy inferiores a las emisiones atribuibles a las fases de operación del tráfico aéreo. De acuerdo con el trabajo realizado por (Baron, Tuchschmid, Martinetti, & Pépion, 2011) las emisiones medias generadas en la construcción de un aeropuerto rondan los 2.250tCO_2e por unidad y año.

4.3.5.1.3 Emisiones atribuibles al tráfico ferroviario

Al igual que el resto de modos, las emisiones de GEI atribuibles al tráfico ferroviario se obtienen de multiplicar la demanda anual por un factor de emisiones, que ha sido calculado teniendo en cuenta las diferentes fases o etapas del ciclo de vida. A continuación, se exponen el factor de emisiones para cada una de estas etapas.

Emisiones en la fase de operación, fabricación, mantenimiento y desguace de los vehículos

Para estimar las emisiones producidas en la fase de operación puede utilizarse los valores incluidos en la Tabla 112, datos proporcionado por Renfe y recogidos en el informe (Compte & Crespo, 2015). Estas emisiones también pueden estimarse a partir del consumo de energía de los vehículos en operación.

Tabla 112: Factores de emisión medios actuales por unidad transportada (pasajero o tonelada) y kilómetro de recorrido.

Tipo de servicio			Tracción	Emisiones actuales ($grCO_2e$/p-km o $grCO_2e$/t-km)		
Viajeros	Cercanías		Eléctrica	47,0	58,0	57,3
			Diésel			79,8
	Media distancia	Alta velocidad	Eléctrica		50,8	37,9
		Convencional	Eléctrica			23,3
			Diésel			108,9
	Alta velocidad - Larga distancia		Eléctrica		37,8	35,4
			Diésel			70,6
Mercancías			Eléctrica	28,0		23,1
			Diésel			59,6

Fuente: (Compte & Crespo, 2015).

Si se centra este análisis en estimar las emisiones a partir del consumo de energía, recuérdese que en el capítulo: "Costes de la energía de tracción" se expone la metodología que permite estimar el consumo en función de la velocidad (ecuación (3. 16)). Es importante destacar, como se describe en (González Franco, García-Álvarez, & Pérez-Martínez, 2012) que para comparar el consumo de forma homogénea con otros modos de transporte e incluso dentro del mismo modo, no sólo debe considerarse el consumo en la entrada de pantógrafo (*tank-to-wheel*), sino hay que añadirle el consumo (pérdidas) que se producen como consecuencia de la generación (para convertir la energía primaria en energía eléctrica) y de las pérdidas producidas en del transporte de la energía hasta la entrada del vehículo (*well-to-tank).*

En el caso de tracción eléctrica, estos consumos adicionales (generalmente son pérdidas) dependen de la tensión de electrificación, tanto de la red de transporte/distribución como de la red eléctrica ferroviaria.

Los coeficientes de mayoración que se incluyen en la Tabla 113 y Tabla 114 han sido calculados por el grupo de investigación del proyecto EnerTrans y serán los coeficientes empleados en esta tesis para transformar los consumos *tank-to-wheel* en consumos *well-to-wheel*.

Tabla 113: Pérdidas red Transporte/Distribución.

Coeficiente de pérdidas (en %)	Conjunto	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
BT	13.81						
1kV < V < 36kV	5.93	6.8	6.6	6.5	6.3	6.3	5.4
36kV < V < 72,5kV	4.14	4.9	4.7	4.6	4.4	4.4	3.8
72,5kV < V < 145kV	2.87	3.4	3.3	3.2	3.1	3.1	2.7
220kV	2.3%	2.7%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%	2.1%
400kV	1.2%	1.5%	1.4%	1.4%	1.4%	1.4%	1.1%

Tabla 114: Pérdidas red eléctrica ferroviaria.

Coeficiente de pérdidas (en %), incluyendo transporte y distribución	Tensión acometida	Coef. Distrib + Transp	Coef. Red Ferroviaria	Coef. Total
2x25kV CA	400kV	101,2%	102,2%	**103,5%**
1x25kV CA	220kV	102,3%	103,5%	**105,9%**
3000V CC (Cercanías)	1kV < V < 36kV	105,9%	105,6%	**111,8%**
3000V CC (tráfico normal)	1kV < V < 36kV	105,9%	106,0%	**112,2%**
1500V CC	1kV < V < 36kV	105,9%	110,1%	**116,6%**
750V CC	1kV < V < 36kV	105,9%	118,2%	**125,2%**
600V CC	1kV < V < 36kV	105,9%	122,0%	**129,2%**
Oleoducto	1kV < V < 36kV	105,9%	--	**105,9%**
Gasoducto	36kV < V < 72,5kV	104,1%	--	**104,1%**

Fuente: Proyecto EnerTrans (Pilo de la Fuente, E. & Pérez Arriaga, 2009).

Conocido el consumo de energía "aguas arriba" (a la salida de la central generadora), las emisiones se obtienen multiplicando el consumo por el "mix eléctrico". El "mix eléctrico" es un indicador que permite determinar las emisiones de CO_2 por kilovatio-hora producido, es función de las tecnologías de generación eléctrica utilizadas, es decir, si en un área la producción de la electricidad se realiza con tecnologías contaminantes, por ejemplo, centrales térmicas de carbón, el "mix energético" tomaría valores más elevados, que sí se generase mediante energías renovables (eólica, solar…).

Las emisiones de GEI debidas a la producción de energía eléctrica en España se muestran en la Tabla 115. Estos valores han sido recogidos del informe (Compte & Crespo, 2015) como promedio de los factores de emisión propuestos por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDEA).

Tabla 115: Emisiones de CO_2 por unidad de energía eléctrica producida.

Año	Emisiones nacionales ($grCO_2/kWh$)	Emisiones peninsulares ($grCO_2/kWh$)
Actual	383	352
2020	250	235
2030	200	190

Fuente: (Compte & Crespo, 2015)..

Las previsiones del "mix energético" para los años 2020 y 2030 se realizan teniendo en cuenta el compromiso europeo energético 20-20-20[37], que estima que para el año 2020 se alcanzará una participación de las energías renovables del 20% y la hoja de ruta elaborada por la Comisión Europea para el año 2050[38].

Obsérvese que si se emplea el método de estimación de las emisiones de GEI a partir del consumo ((ecuación (3. 16)), es necesario transformar las emisiones de CO_2 a emisiones de CO_2 equivalentes. Para ello, se aplican los coeficientes indicados en la Tabla 116.

Tabla 116: Coeficientes empleados para transformar emisiones de CO_2 a emisiones de CO_2e.

Fuente de emisiones			Coeficiente	
Fuente móvil	Tráfico vial	Gasolina	1 $grCO_2$ ≈ 1,011 $grCO_2e$	1 $grCO_2$ ≈ 1,009 $grCO_2e$
		Gasóleo		1 $grCO_2$ ≈ 1,011 $grCO_2e$
	Tráfico ferroviario	Tracción eléctrica	1 $grCO_2$ ≈ 1,008 $grCO_2e$	
		Tracción diésel	1 $grCO_2$ ≈ 1,010 $grCO_2e$	
	Uso de maquinaria industrial terrestre		1 $grCO_2$ ≈ 1,014 $grCO_2e$	
	Tráfico aéreo		1 $grCO_2$ ≈ 1,010 $grCO_2e$	
	Tráfico marítimo		1 $grCO_2$ ≈ 1,015 $grCO_2e$	
Fuente estacionaria	Consumo de energía eléctrica		1 $grCO_2$ ≈ 1,008 $grCO_2e$	
	Combustión de combustibles fósiles		1 $grCO_2$ ≈ 1,016 $grCO_2e$	
	Combustión de gas natural		1 $grCO_2$ ≈ 1,009 $grCO_2e$	

Fuente: (Compte & Crespo, 2015).

Los valores que incluye la Tabla 112 tienen en cuenta las fases de mantenimiento, desguace y fabricación, pero en cambio en la metodología que se basa en la estimación de las emisiones a partir de los consumos de energía (considerando el consumo en pantógrafo y trasladarlo a la salida de la central generadora) es necesario añadir las emisiones atribuibles a estas fases, pues no se está teniendo en cuenta. Para ello, se utilizan los resultados obtenidos por (García Álvarez, 2011c) en el que se afirma que las emisiones asociadas a estas etapas equivalen aproximadamente a 0,7$grCO_2e$/p-km para un tren de alta velocidad y a 2,2grCO2e/t-km para un tren de mercancías.

[37] Comunicación de la Comisión, de 13 de noviembre de 2008, "Eficiencia energética: alcanzar el objetivo del 20%". COM(2008) 772 final

[38] Comunicación de la Comisión, de 8 de marzo de 2011, "Hoja de Ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050". COM(2011) 112 final.

4.3.5.1.4 Emisiones asociadas a la construcción y ampliación de infraestructura

Las emisiones de GEI atribuibles a la construcción de líneas férreas, han sido obtenidos a partir de los resultados alcanzados en el informe (Baron, Tuchschmid, Martinetti, & Pépion, 2011). Obsérvese (Tabla 117) que los valores que proporciona este informe se basan en el "mix eléctrico" francés, por lo que deben de ser transformados a consumos de energía, si el objetivo es emplearlos en cualquier escenario diferente a Francia.

Tabla 117: Emisiones de CO_2 y consumo por construcción y ampliación de las líneas de alta velocidad Valence-Marseille y Tours-Bordeux.

	Emisiones			Mix Energético	Consumo		
	Central	Bajo	Alto		Central	Bajo	Alto
	tCO_2/km_año	*tCO_2/km_año*	*tCO_2/km_año*	$kgCO_2/kWh$	*kWh/km_año*	*kWh/km_año*	*kWh/km_año*
Fase de planificación	0,45	-	-	0,091	4.945,1	-	-
Movimiento de Tierras	5	8,6	22,2		54.945,1	94.505,5	243.956,0
Ballasto	22,8	-	-		250.549,5	-	-
Vía en Placa	31,6	-	-		347.252,7	-	-
Viaductos y Puentes	108-138	68	156-183		1.186.813,2-1.450.549,5	747.252,7	1.714.285-2.010.989
Tunel	212	172	243		2.329.670,3	1.890.109,9	2.670.329,7
Energía y Comunicaciones	3,5	-	-		38.461,5	-	-
Estaciones	45	33	82		494.505,5	362.637,4	901.098,9

Fuente: Elaboración propia a partir de (Baron, Tuchschmid, Martinetti, & Pépion, 2011).

Conocido el consumo de energía, se obtiene las emisiones de CO_2 atribuibles a esta fase, aplicando el "mix eléctrico" español. A continuación se muestran las emisiones asociadas a la fase de construcción en el caso español (Tabla 115).

Tabla 118: Emisiones medias de GEI por construcción y ampliación de infraestructuras ferroviarias en el caso español.

Mix nacional (*kgCO2/kWh*) 0,383

	Emisiones		
	Central	Bajo	Alto
	tCO_2e/km_año	*tCO_2e/km_año*	*tCO_2e/km_año*
Fase de planificación	1,92	-	-
Movimiento de Tierras	21,34	36,70	94,74
Ballasto	97,30	-	-
Vía en Placa	134,86	-	-
Viaductos y Puentes	461-589	290,20	665-781
Tunel	904,76	734,05	1037,05
Energía y Comunicaciones	14,94	-	-
Estaciones	192,05	140,83	349,95

Fuente: Elaboración propia.

Otro estudio relevante y que proporciona valores consistentes, es el trabajo (Network Rail, 2009). Este estudio realiza una evaluación medioambiental comparando los servicios ferroviarios convencionales con los de alta velocidad. En el peor escenario de los analizados, se obtiene que las emisiones medias de CO_2e por kilómetro de línea y año atribuibles a la construcción de la infraestructura toman valores que rondan las 270,6tCO_2e/km-año (el rango de resultados está entre 298tCO_2e/km-año y

248,8tCO_2e/km-año). Lo que se traduce, conocido el "mix eléctrico" inglés (550kgCO_2/kWh).

En el modelo desarrollado se emplearán los valores proporcionados por (Baron, Tuchschmid, Martinetti, & Pépion, 2011), ya que presenta un mayor grado de desagregación, lo que permite analizar la influencia de la velocidad en las emisiones de CO_2. Recuérdese que la velocidad (capítulo 3.3.2) afecta al porcentaje de obra (kilómetros de túnel, viaducto y movimiento de tierras), y por lo tanto, aplicando está metodología no sólo se consigue relacionar velocidad y emisiones en la etapa de operación, sino que también se obtendrá una relación con la emisiones atribuibles a la etapa de construcción.

4.3.5.1.5 Emisiones asociadas al mantenimiento y operación de la infraestructura

Dentro de las emisiones atribuibles al ferrocarril, solamente queda por analizar las emisiones producidas en las actividades de mantenimiento realizadas por el gestor de la infraestructura. El informe (Compte & Crespo, 2015) indica que los valores relativos a esta actividad rondan las 10tCO_2e/km-año, dato obtenido basándose en los resultados publicados por Adif[39].

Valor económico de las emisiones

Una vez determinado las emisiones atribuibles a cada modo y en cada una de las fases, es necesario asignar un valor monetario relativo al cambio climático producido por las emisiones de GEI. Es importante tener en cuenta que establecer un precio al coste externo ligado al cambio climático, es una cuestión complicada, pues no es un valor de mercado al uso, presenta una componente política elevada y, por lo tanto, depende en parte de la "preocupación" que tengan los estados en relación a esta cuestión.

Este estudio se basará en el trabajo realizado por (CE Delft, Infras, Fraunhofer ISI, 2011), el cual propone el siguiente esquema de costes de CO_2 para los distintos horizontes temporales (Figura 112).

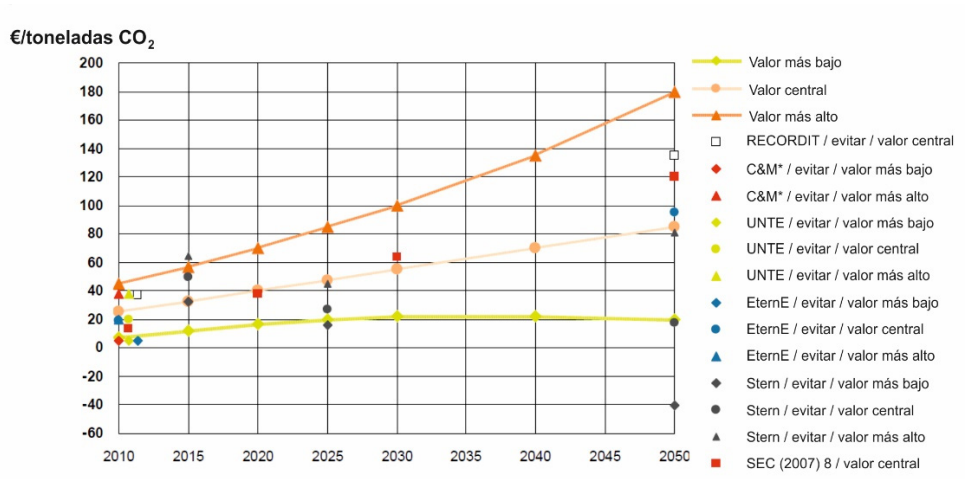


Figura 112. Costes Unitarios de CO2 en €/tCO2.

Fuente : (CE Delft, Infras, Fraunhofer ISI, 2011).

Teniendo en cuenta los escenarios propuestos por (CE Delft, Infras, Fraunhofer ISI, 2011) y que los análisis ACB de valoración de proyectos de transporte implican un

[39] Informe de sostenibilidad 2011. Memoria ambiental. Adif:

http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/doc/CA_MS_03_11-Medioambiental-es.pdf

elevado horizonte temporal, se considera: por una parte, un valor monetario (€/tCO_2) central que toma un precio aproximado de 20€/tCO_2 para 2010, y por otro lado, un incremento lineal del mismo pasando por 40€/tCO_2 en 2020, 60€/tCO_2 en 2030, alcanzando finalmente los 80€/tCO_2 en 2050.

4.3.5.1.6 Ahorro en costes netos por impacto en el cambio climático: aplicación caso ejemplo Madrid-Valencia

Ahorro en costes netos por impacto en el cambio climático, es el coste asociado a la reducción o incremento de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que se produce cuando un nuevo modo de transporte se pone en servicio. En el caso de infraestructuras ferroviarias de alta velocidad, se entiende como el ahorro en euros por utilizar vehículos (por ejemplo, tren de alta velocidad) que emiten menor cantidad de GEI.

A continuación, se expone la ecuación que permite estimar el ahorro por impacto en el cambio climático en la fase de operación, mantenimiento y desguace de los vehículos:

$$A._{C.Climático_{Oper}} = \sum_{i=n}^{m}\big((V.transv_{i-AVE}) \times (km_i \times Emis_i - km_{AVE} \times Emis_{AVE}) - T_{ind} \times Emis_{AVE}\big) \times V.mont_{Emisiones} \quad (4.\ 6)$$

Donde:

- $A_{C.Climático_Oper}$*: ahorro en costes netos por impacto en el cambio climático en la fase de operación(€/año).*
- *V. transv* $_{i\text{-}AVE}$: viajeros que han dejado de viajar en el modo i para viajar en tren de alta velocidad.
- *i:* cada uno de los modos de transporte (coche, autobús, avión y ferrocarril convencional).
- km_i: longitud del recorrido en coche, autobús, avión y tren convencional
- km_{AVE}: longitud del recorrido en tren de alta velocidad.
- $Emis_i$: emisiones de GEI por viajero atribuibles al modo i (kgCO_2/viajero).
- $Emis_{AV}$: emisiones de GEI por viajero atribuibles al tren de alta velocidad (kgCO_2/viajero).
- $V.mont_{Emisiones}$: valor monetario de las emisiones (€/kgCO_2).

Conocidos los ahorros en la fase de operación, mantenimiento y desguace, se le añade los ahorros netos en la fase de construcción y mantenimiento de la infraestructura. Estos ahorros se pueden calcular aplicando la siguiente ecuación:

$$A._{C.Climático_{Const}} = \Big(Emis_{Carr} \times km_{Carr} + n^{o}_{Aero} \times Emis_{Aero} - \big(Emis_{Mov_TierrasAV} \times km_{Mov_TierrasAV} + Emis_{TunelAV} \times km_{TunelAV} + Emis_{ViadAV} \times km_{ViadAV} + n^{o}_{Est} \times Emis_{Est}\big)\Big) \times V.mont_{Emisiones} \quad (4.\ 7)$$

Donde:

- $A_{C.Climático_Const}$: ahorro en costes netos por impacto en el cambio climático en la fase de construcción y mantenimiento de la infraestructura (€/año).
- *EmisCarr:* emisiones atribuibles a la construcción y mantenimiento de una infraestructura viaria (tCO_2/km_año).
- km_{Carr}: longitud de la infraestructura viaria.
- n^{o}_{Aero}: número de aeropuertos.
- *EmisAero:* emisiones atribuibles a la construcción y mantenimiento de un aeropuerto (tCO_2/aeropuerto_año).

- $Emis_{MovTierrasAV}$, $Emis_{TunelAV}$, $Emis_{ViadAV}$: emisiones por kilómetro atribuibles a cada tipo de obra en una infraestructura ferroviaria (tCO_2/km_año).
- $km_{MovTierrasAV}$, $km_{túnelAV}$, km_{ViadAV}: número de kilómetros de movimiento de tierras, túnel y estructura (viaducto/puente) respectivamente.
- $Emis_{Aero}$: emisiones atribuibles a la construcción y mantenimiento de una estación (tCO_2/estación_año).
- $V._{montEmisiones}$: valor monetario de las emisiones (€/$kgCO_2$).

Es importante recordar que el ahorro total por impacto en el cambio climático no solo corresponde al ahorro en emisiones de GEI en la fase de operación, sino que es necesario incluir las emisiones generadas en la fase de construcción de la infraestructura. Esto puede afectar negativamente al análisis de las emisiones (impacto en el cambio climático) para líneas de alta velocidad, pues el volumen de emisiones de GEI en la construcción de este tipo de infraestructuras es elevado, incluso puede llegar a compensar los ahorros producidos en la etapa de operación, como así afirma en (Betancor & Llobet, 2015) y (De Rus, 2012).

El siguiente paso consiste en aplicar la metodología expuesta en un caso ejemplo, para ello se empleará la línea de alta velocidad Madrid-Valencia en diferentes escenarios de velocidad media y precio, al igual que se ha hecho en el resto de externalidades. De esta manera se podrá analizar la influencia de la velocidad en este ahorro.

A continuación se muestra los resultados obtenidos tras aplicar la metodología en la línea Madrid-Valencia (Figura 113).

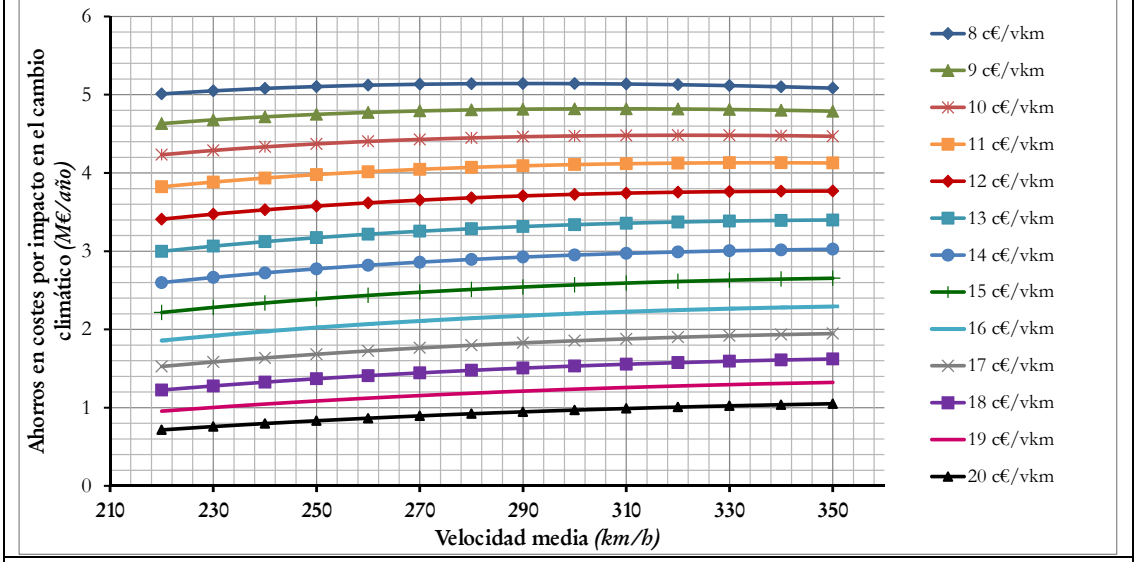


Figura 113. Ahorros en costes neto por impacto en el cambio climático (M€/año) en función de la velocidad media

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en consideración, además de las emisiones producidas en la etapa de operación, fabricación y mantenimiento de vehículos, las emisiones de CO_2 producidas en la etapa de construcción de la infraestructura ferroviaria, así como las producidas en la etapa de manteniendo de la misma, el sistema aún genera ahorros netos en costes por impacto en el cambio climático. Por ello, se puede afirmar que, en este caso, sí se produce un ahorro con la incorporación en el corredor de servicios ferroviarios de alta velocidad.

Puede observarse que el ahorro en el cambio climático varía dependiendo del precio del billete (rango de beneficios entre 0,7M€/año y 5M€/año, precios de billete más caros, menores ahorros por impacto en el cambio climático se alcanzarán). También se observa que el ahorro depende de la velocidad media, principalmente, en tarifas altas, ya que un aumento de la velocidad supone un mayor número de viajeros transvasados de otros modos al tren de alta velocidad y, por lo tanto, un mayor ahorro en emisiones de gases de efecto invernadero.

4.3.5.2 Ahorro en costes netos por impacto en el ruido o contaminación acústica

El coste externo debido al ruido o contaminación acústica se trata del coste incurrido por superar los límites de decibelios (dB(A)) recomendados. Este impacto tiene poca influencia, o prácticamente nula, en los impactos globales, pero puede adquirir gran importancia en el paso de las infraestructuras por núcleos urbanos requiriendo de medidas correctoras. El ruido emitido en áreas densamente pobladas afecta a gran número de persones y, por lo tanto, causa un gran impacto en comparación con el emitido en zonas poco pobladas.

La cuantificación económica de este coste, al igual que el resto de costes externos, es una tarea compleja, por ello, su estimación suele basarse en tres conceptos claves:

1. La disposición a pagar por persona expuesta a cierto nivel de ruido.
2. La evaluación de muertes (por ejemplo, número de afecciones cardiacas debidas al estrés provocado por el ruido).
3. Coste médico debido a la contaminación acústica.

En cuanto a la disposición a pagar, el estudio (INFRAS/IWW., 2004) establece que el coste asociado al ruido crece linealmente con el volumen, a medida que se incrementan los dB(A) la población está dispuesta a pagar más dinero por reducir el ruido. Este estudio se centra en Alemania como escenario de referencia (Tabla 119) que se ajusta y extrapola a otros países europeos mediante el PIB referente a cada país.

Tabla 119: Valores de referencia por persona afectada en Alemania y en euros por dB(A) reducido.

Valores de referencia en Alemania					
dB (A)	55-60	60-65	65-71	70-75	>75
Carretera, avión	53	159	265	371	477
Ferrocarril	0	53	159	265	371

Fuente: (INFRAS/IWW., 2004).

En lo referente a los daños a la salud provocados por el ruido, (INFRAS/IWW., 2004) también afirma que en un intervalo entre 65-70 dB(A) el riesgo de ataque al corazón se incrementa en un 20% y para valores mayores de 70 dB(A) el riesgo se incrementa a un 30%. Considerando también que el valor de una vida humana está alrededor de 1,5 millones de euros. Se afirma también que existe una relación estadísticamente probada entre las enfermedades isquémicas del corazón y el ruido del tráfico, cuando esté toma valores de 65 dB(A)).

Teniendo en cuenta lo establecido en el estudio (INFRAS/IWW., 2004) y las actualizaciones de los costes realizado por (Adif, 2011), el coste medio provocado por el ruido para cada uno de los modos de transporte, toma los valores que se muestran en la Tabla 120.

Tabla 120: Costes medio provocado por el ruido y la contaminación acústica según modo de transporte.

	Coste ruido (€/1000 viajeros-km)
Coche	5,7
Autobús	1,4
Tren convencional	4,3
Avión	2,0
Tren alta velocidad	4,3

Fuente: (Adif, 2011).

Conocido el valor monetario del ruido para cada modo de transporte, el ahorro en costes netos por impacto en el ruido o contaminación acústica se determina como diferencia del coste de cada modo de transporte en relación al coste incurrido por el tren de alta velocidad. A continuación, se muestra la expresión que permite su determinación:

$$A_{\cdot C.Ruido} = \left(\sum_{i=n}^{m} \left[(V.transv_{i-AVE}) \times \left(km_i \times V.monet_{C.Ruido_i} - km_{AVE} \times V.monet_{C.Ruido_AVE} \right) \right] - T_{ind} \times V.monet_{C.Ruido_AVE} \right) / 1000 \quad (4.\ 8)$$

Donde:

- $A_{C.Ruido}$: ahorro neto en costes por impacto del ruido (€);
- $V.\ transv_{i-AVE}$: viajeros que han dejado de viajar en el modo i para viajar en tren de alta velocidad;
- *i*: cada uno de los modos de transporte (coche, autobús, avión y ferrocarril convencional);
- km_i: longitud del recorrido en coche, autobús, avión y tren convencional;
- km_{AVE}: longitud del recorrido en tren de alta velocidad;
- $V.\ monet_{C.Ruido_i}$: valor monetario provocado por el ruido del modo de transporte i (€/1000 viajeros-km),
- $V.\ monet_{C.Ruido_AVE}$: valor monetario del ruido provocado por el tren de alta velocidad (€/1000 viajeros-km).

4.3.5.2.1 Aplicación caso ejemplo Madrid-Valencia

Conocido el valor monetario por modo de transporte relativo al coste provocado por la contaminación acústica y la ecuación que permite estimar el ahorro neto por impacto del ruido, se aplica al caso Madrid-Valencia, al igual que en los casos anteriores, en diferentes escenarios de precio y velocidad.

A continuación se muestran los resultados obtenidos (Figura 114).

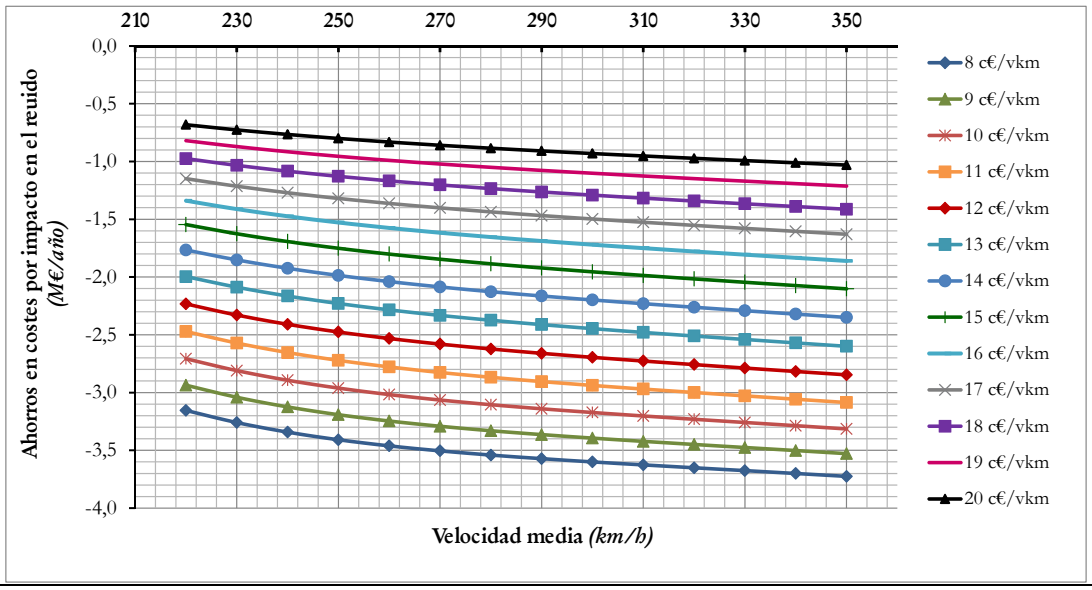


Figura 114. Ahorros netos en costes por impacto del ruido (M€/año) en función de la velocidad media.

Fuente: Elaboración propia.

Obsérvese que en este caso el tren de alta velocidad tiene una influencia negativa sobre la sociedad, pues el ruido emitido por este modo de transporte es mayor que otros modos de transportes, no por el simple hecho de que tenga una tecnología que genera una mayor contaminación acústica, sino que afecta a un mayor número de personas, generalmente, las infraestructuras ferroviarias atraviesan áreas densamente pobladas.

De los resultados obtenidos puede destacarse que a medida que se incrementa la velocidad, el coste es mayor. Esto se debe a que se incrementa el número de viajeros transportados por este modo. Al ser función del número de pasajeros, se produce un incremento del coste, o lo que es lo mismo una reducción de los beneficios.

4.3.5.3 Ahorros netos en costes por impacto en la polución atmosférica

La polución atmosférica no solo influye en la salud de la población, sino que también afecta a los cultivos, vegetación, pérdidas de producción forestal y corrosión en los materiales de construcción. Todos estos efectos o impactos negativos suponen un coste para la sociedad que deben ser estimados en todo análisis ACB, pues la actividad de transporte es uno de los mayores inductores.

La mayor parte de las emisiones de dióxido de azufre (SO_2), monóxidos de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas en suspensión (PM_{10}) que contaminan la atmosfera, provienen del transporte y son claramente nocivas para la salud de la población.

Para valorar el coste de la polución atmosférica el informe (INFRAS/IWW., 2004) se basa en un enfoque top-down[40] basados en diferentes estudios que, en definitiva, asignan valores monetarios a estos impactos basándose en la disposición a pagar que muestra la población por mejorar la calidad del aire (véase Tabla 121).

[40] Top-down: Se basa en valores unitarios extraídos de estudios con el objetivo de conocer parámetros más globales que expliquen el sistema para ir, posteriormente, descendiendo progresivamente hasta variables más específicas.

Tabla 121: Disposición a pagar. Valores medios europeos basados en la evaluación de los costes de la salud debido a la contaminación atmosférica. (Precios 1995).

Disposción a pagar por los efectos de la contaminación atmósferica sobre la salud		
Incidente	**Valor [Euro]**	**Unidad**
Mortalidad a largo plazo (adultos >= 30 años)	915.000 (61% de 1,5 millones)	por vida perdida
Ingreso hospitalario por problemas respiratorios (cualquier edad)	7.870	por ingreso
Ingreso hospitalario por problemas cardiovasculares (cualquier edad)	7.870	por ingreso
Episodio de bronquistis crónica (adultos >= 25 años)	209.000	por caso
Bronquitis (niños< 15 años)	131	por caso
Días de actividad restringida (adultos >= 20años)	94	por día
Asmáticos: ataques de asma (niños < 15 años)	31	por ataque
Asmáticos: ataques de asma (adultos >= 15 años)	31	por ataque

Fuente: (INFRAS/IWW., 2004).

Al igual que en el caso anterior, el informe (Adif, 2011) hace una actualización de los datos obtenidos en (INFRAS/IWW., 2004) para cada modo transporte, basándose en el PIB. Los resultados obtenidos han sido incluidos en la tabla que se muestra a continuación (Tabla 122).

Tabla 122: Costes medio asociado a la polución atmosférica según modo de transporte.

	Coste polución atmosférica (€/1000 viajeros-km)
Coche	15,5
Autobús	25,3
Tren convencional	7,5
Avión	2,6
Tren alta velocidad	7,5

Fuente: (Adif, 2011).

El ahorro en costes de polución atmosférica generado por la incorporación del tren de alta velocidad al corredor o enlace, se obtendrán tras la aplicación de la siguiente expresión (4. 9):

$$A_{.C.Pol} = \left(\sum_{i=n}^{m} \left[(V.trasv_{i-AVE}) \times \left(km_i \times V.monet_{C.Pol_i} - km_{AVE} \times V.monet_{C.Pol_{AVE}} \right) \right] - T_{ind} \times V.monet_{C.Pol_{AVE}} \right) / 1.000 \quad (4.\ 9)$$

Donde:

- $A_{C.pol}$: ahorro neto en costes por impacto en la polución atmosférica (€);
- $V.\ transv_{\ i\text{-}AVE}$: viajeros que han dejado de viajar en el modo i para viajar en tren de alta velocidad;

- *i*: cada uno de los modos de transporte (coche, autobús, avión y ferrocarril convencional);
- km_i: longitud del recorrido en coche, autobús, avión y tren convencional;
- km_{AVE}: longitud del recorrido en tren de alta velocidad;
- $V.\ monet_{C.Pol_i}$: valor monetario del impacto en la polución atmosférica por el modo de transporte i (€/1.000 viajeros-km),
- $V.\ monet_{C.Pol_AVE}$: valor monetario del impacto en la polución atmosférica generado por el tren de alta velocidad (€/1.000 viajeros-km).

4.3.5.3.1 Aplicación caso ejemplo Madrid-Valencia

La gráfica que se muestra a continuación (Figura 115) expone el ahorro en costes netos debido al impacto en la polución atmosférica tras la incorporación de servicios de alta velocidad en el trayecto Madrid-Valencia. Al igual que se ha realizado para la estimación de los ahorros generados por el tren de alta velocidad en el resto de externalidades, se han simulado diferentes escenarios de precio y velocidad media con el objetivo de analizar la elasticidad del ahorro en la polución atmosférica al parámetro velocidad media.

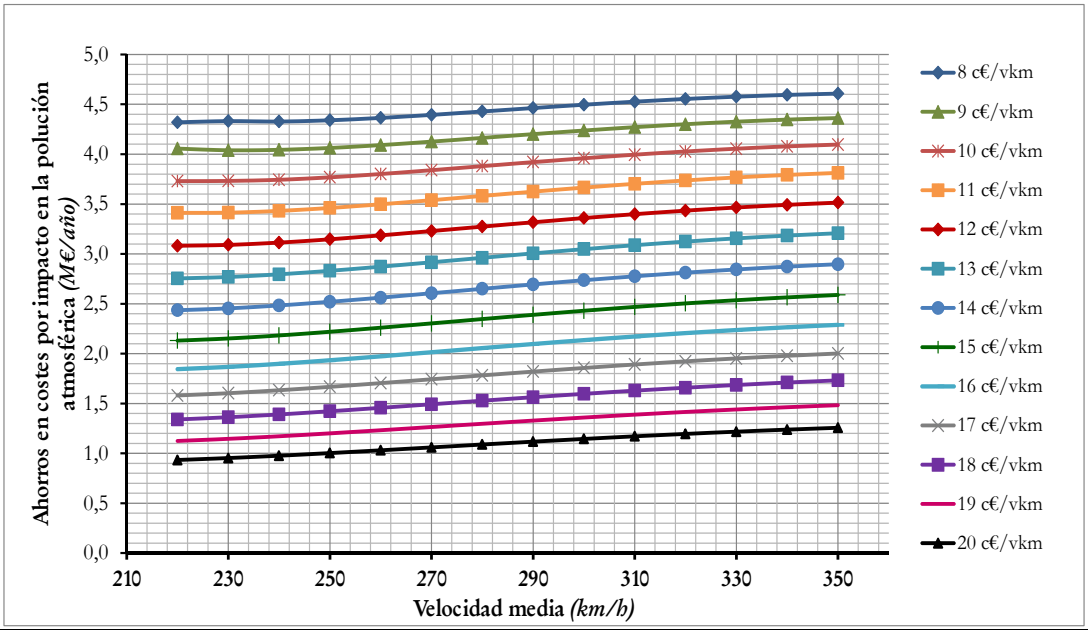


Figura 115. Ahorros netos en costes por en la polución atmosférica (M€/año) en función de la velocidad media.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos muestran un rango de ahorros que va desde los 3M€/año a los 8,5M€/año, dependiendo del precio del billete y de la velocidad media. Puede observarse cómo la velocidad comercial y, por lo tanto, el tiempo viaje influyen en el ahorro por impacto en la polución, una mejora en la velocidad comercial implica un incremento en los viajeros transvasados de otros modos al tren de alta velocidad, por lo que, un mayor número de viajeros deja de utilizar modos que tienen un mayor impacto sobre la polución en la atmosfera que el tren de alta velocidad.

4.3.5.4 Ahorro en costes netos por impacto en la naturaleza y el paisaje

La construcción de infraestructuras de transporte modifica el entorno de manera irreversible, deterioran el paisaje y generan el llamado efecto barrera que limita la capacidad para desplazarse por un territorio determinado, poniendo en peligro la supervivencia de las especies. Esto genera un coste social, que al igual que el resto de costes externos, es de difícil cuantificación.

El informe (INFRAS/IWW., 2004) analiza este impacto en la naturaleza, pero a diferencia de análisis realizado para otros costes externos, en este caso, no se basa en un enfoque orientado en la disposición a pagar de la población para evitar el daño causado al medio ambiente, sino que se basa en el coste (coste unitario por m^2) estimado para mejorar, en términos medioambientales, proyectos existentes, es decir, basándose en diferentes aspectos como son: ocupación, efecto barrera, contaminación del suelo y agua,… se estudia el coste por unidad de superficie (m^2) que genera reparar la zona afectada.

Conocido el coste total, se le asigna o reparte a cada modo de transporte basándose en vehículos kilómetro, número de operaciones de aviones, es decir en función de la producción de cada modo de transporte.

Al igual que en los diferentes casos expuestos los valores obtenidos por (INFRAS/IWW., 2004) son ajustados por (Adif, 2011) a precios de 2011, pero en este caso la actualización se realiza basándose en el IPC.

A continuación la Tabla 123 muestra el costes medio para cada modo de transporte.

Tabla 123: Costes medio asociado a la naturaleza y paisaje según modo de transporte.

	Coste naturaleza y paisaje (€/1000 viajeros-km)
Coche	3,5
Autobús	0,9
Tren convencional	0,7
Avión	1,0
Tren alta velocidad	0,7

Fuente: (Adif, 2011).

Continuando con la metodología propuesta en las anteriores externalidades, el ahorro en costes netos por impacto en la naturaleza y el paisaje se obtiene como diferencia entre el coste generado por los diferentes modos de transporte y el coste generado por el tren de alta velocidad, lo que permite estimar los "beneficios" o costes que la infraestructura de alta velocidad aporta comparándose con el caso base (sin actuación).

La siguiente expresión permite la estimación del citado ahorro neto:

$$A_{.C.paisaje} = \left(\sum_{i=n}^{m} \left[(V.transv_{i-AVE}) \times \left(km_i \times V.monet_{C.Paisaje_i} - km_{AVE} \times V.monet_{C.Paisaje_AVE} \right) \right] - T_{ind} \times V.monet_{C.Paisaje_AVE} \right) /1000 \quad (4.\ 10)$$

Donde:

- $A_{C.paisaje}$: ahorro neto en costes por impacto en la naturaleza y en el paisaje (€);
- $V.\ transv_{i-AVE}$: viajeros que han dejado de viajar en el modo i para viajar en tren de alta velocidad;
- i: cada uno de los modos de transporte (coche, autobús, avión y ferrocarril convencional);
- km_i: longitud del recorrido en coche, autobús, avión y tren convencional;
- km_{AVE}: longitud del recorrido en tren de alta velocidad;

- *V. monet*$_{C.Paisaje_i}$: valor monetario del impacto en el paisaje y en la naturaleza generado por el modo de transporte i (€/1.000 viajeros-km),
- *V. monet*$_{C.Paisaje_AVE}$: valor monetario del impacto en el paisaje y en la naturaleza generado por el tren de alta velocidad (€/1.000 viajeros-km).

4.3.5.4.1 Aplicación caso ejemplo Madrid-Valencia

La figura que se muestra a continuación (Figura 116) expone los ahorros en costes netos por impacto en la naturaleza y paisaje (en millones de euros al año) por poner en servicio el tren de alta velocidad en la línea Madrid-Valencia. Al igual que se ha realizado para el resto de externalidades, se estima el ahorro en diferentes escenarios de precio y velocidad media.

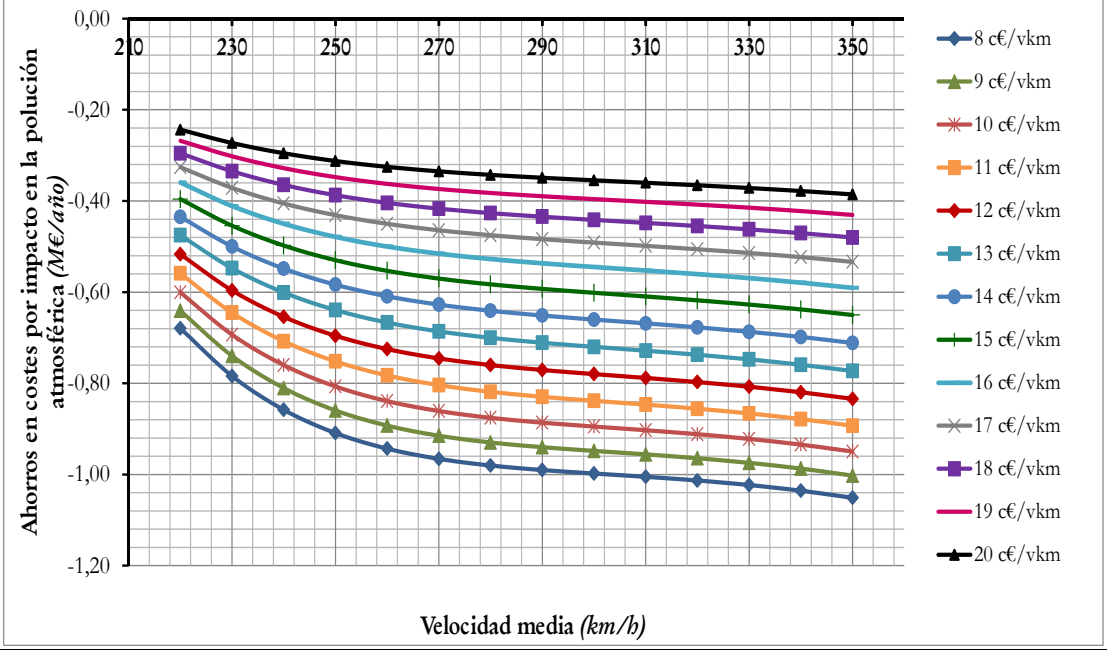


Figura 116. Ahorros netos en costes por impacto en la naturaleza y paisaje (M€/año) en función de la velocidad media.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran, al igual que el caso de la contaminación acústica, el tren de alta velocidad, en esta línea (Madrid-Valencia), supone un coste para la sociedad, pues obtiene unos ahorros negativos. Aunque el costes unitario (€/1.000 vkm) por impacto en la naturaleza, es menor que en el resto de modos (Tabla 123), el número de viajeros nuevos (demanda inducida) que transportará el tren de alta velocidad reduce este ahorro hasta el punto que supone un coste. Esto explica el efecto negativo que tiene la velocidad sobre esta externalidad, pues un incremento de la velocidad atrae a un mayor número de viajeros al tren de alta velocidad (incrementa el atractivo de este modo), como consecuencia se incrementa el número de viajeros nuevos que utilizan este modo y, por lo tanto, a medida que se reduce el tiempo de viaje se incrementan las pérdidas.

4.3.5.5 Ahorro en costes netos por efectos urbanos

Al igual que en la externalidad anterior, las infraestructuras de transporte dividen el espacio (en este caso el espacio urbano) en diferentes áreas dificultando el tránsito, en este caso, de peatones, lo que provoca una pérdida de tiempo y limita el espacio urbano útil a causa de la superficie ocupada por la infraestructura.

El valor monetario asignado a esta externalidad por (INFRAS/IWW., 2004). Este coste se estima, principalmente, como el coste adicional que supone la falta de espacio para medios no motorizados. Se utiliza como aproximación para determinar el coste, la escasez de espacio para carriles bicis debido a la superficie que ocupan las infraestructuras, principalmente, infraestructuras ferroviarias y de carreteras.

Los valores monetarios por habitualmente se emplean en evaluaciones de proyectos de infraestructuras de transporte son los que se muestran en la Tabla 124.

Tabla 124: Costes medio asociado a efectos urbanos según modo de transporte.

	Coste por efectos urbanos (€/1000 viajeros-km)
Coche	2,0
Autobús	0,5
Tren convencional	1,6
Avión	0,0
Tren alta velocidad	1,6

Fuente: (Adif, 2011).

Los ahorros en costes netos por efectos urbanos que supone la construcción de una línea de alta velocidad, se pueden estimar a partir de la siguiente expresión:

$$A_{.C.EfecUrbano} = \left(\sum_{i=n}^{m} [(V.transv_{i-AVE}) \times (km_i \times V.monet_{C.EfecUrbano_i} - km_{AVE} \times V.monet_{C.EfecUrbano_AVE})] - T_{ind} \times V.monet_{C.EfecUrbano_AVE} \right) / 1000 \quad (4.\ 11)$$

Donde:

- $A_{C.EfecUrbano}$: ahorro neto en costes por efectos urbanos (€);
- $V.\ transv_{i\text{-}AVE}$: viajeros que han dejado de viajar en el modo i para viajar en tren de alta velocidad;
- i: cada uno de los modos de transporte (coche, autobús, avión y ferrocarril convencional);
- km_i: la longitud del recorrido en coche, autobús, avión y tren convencional;
- km_{AVE}: la longitud del recorrido en tren de alta velocidad;
- $V.\ monet_{C.EfecUrbano_i}$: valor monetario por efectos urbanos por el modo de transporte i (€/1.000 viajeros-km),
- $V.\ monet_{C.EfecUrbano_AVE}$: valor monetario por efectos urbanos generado por el tren de alta velocidad (€/1.000 viajeros-km).

4.3.5.5.1 Aplicación caso ejemplo Madrid-Valencia

Conocida la ecuación que permite estimar el ahorro en costes netos por efecto urbano y el coste unitario por modo de transporte se estima, como se ha realizado para el resto de externalidades, el citado ahorro para la línea Madrid-Valencia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos Figura 117.

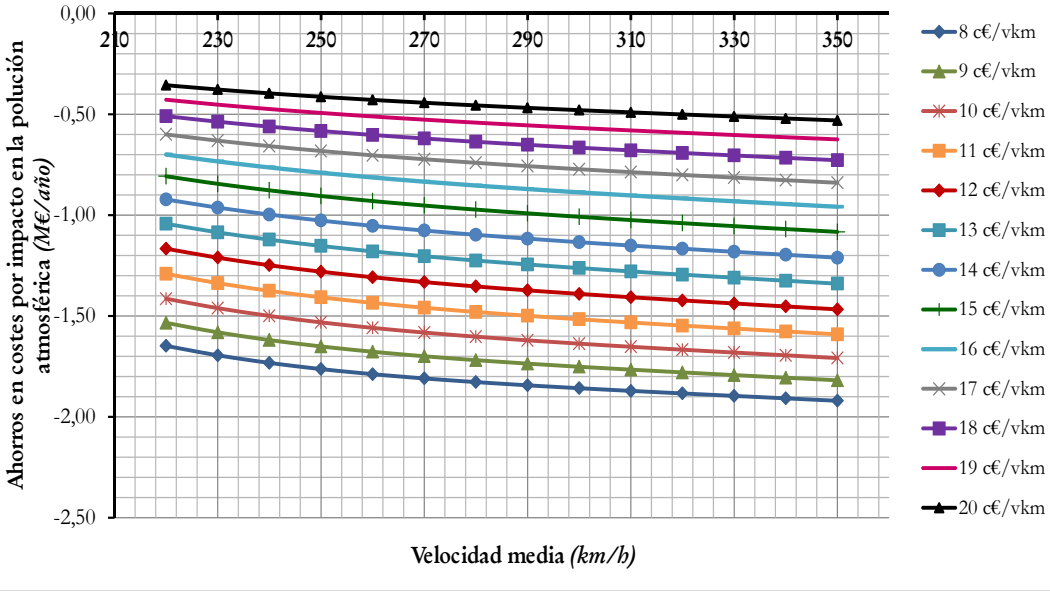


Figura 117. Ahorros netos en costes por efecto urbano (M€/año) en función de la velocidad media.

Fuente: Elaboración propia.

Como era previsible el tren de alta velocidad supone un coste para la sociedad en términos de ocupación urbana, pues su impacto es menor que en el caso por ejemplo del vehículo privado, pero mucho mayor que en el resto de modos (Tabla 124). Generalmente, las vías férreas transcurren por el centro de las ciudades, la ocupación del espacio urbano no es muy grande, pero suelen dificultar el tránsito de peatones, de ahí que se obtengan ahorros negativos.

4.3.6 Conclusiones

En los apartados anteriores se observa cómo el tren de alta velocidad permite reducir los costes externos en al menos seis de los nueve inductores de costes estimados para el caso ejemplo, lo que se traduce en un beneficio considerable para la sociedad.

Si se analizan los resultados globales, es decir se agregan todos y cada uno de los ahorros calculados para el caso ejemplo (véase Figura 118) en un solo parámetro, que llamaremos “ahorros totales en costes externos y tiempos de viaje”, puede afirmarse que existe un gran ahorro global atribuible a la construcción de la infraestructura ferroviaria de alta velocidad (los ahorros están dentro de un rango que va desde 112M€/año a los 635M€/año, dependiendo del escenario analizado). Este ahorro está claramente condicionado por la velocidad, a medida que la velocidad media se incrementa el ahorro total es mayor, lo que supone un incremento en los beneficios sociales.

A la vista de estos resultados, puede afirmarse que la velocidad es un gran inductor en ahorros externos, sobre todo a precios de billete bajos, ya que el volumen de viajeros transvasados de otros modos al tren de alta velocidad es muy elevado (véase Figura 118).

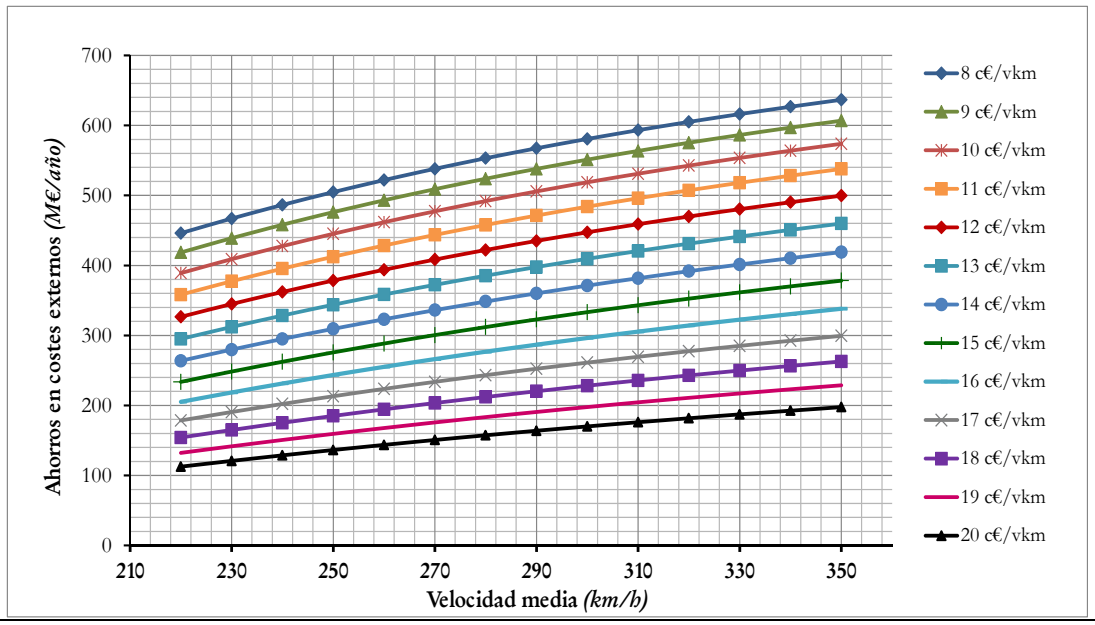


Figura 118. Ahorro total en costes externos debido a la construcción de la línea de alta velocidad Madrid-Valencia en función de la velocidad media.

Fuente: Elaboración propia.

Si se centra el análisis para un precio de billete, por ejemplo 18c€/vkm (mismo precio utilizado para la estimación de la demanda en el corredor de Levante), ya que las diferentes curvas de precio son aproximadamente paralelas, por lo que la influencia de la velocidad es prácticamente igual en todos los casos, y se desagrega el ahorro total en cada uno de los ahorros en costes externos estimados en los apartados anteriores, es posible analizar la influencia de cada uno de ellos en el beneficio global, como se muestra en la Figura 119.

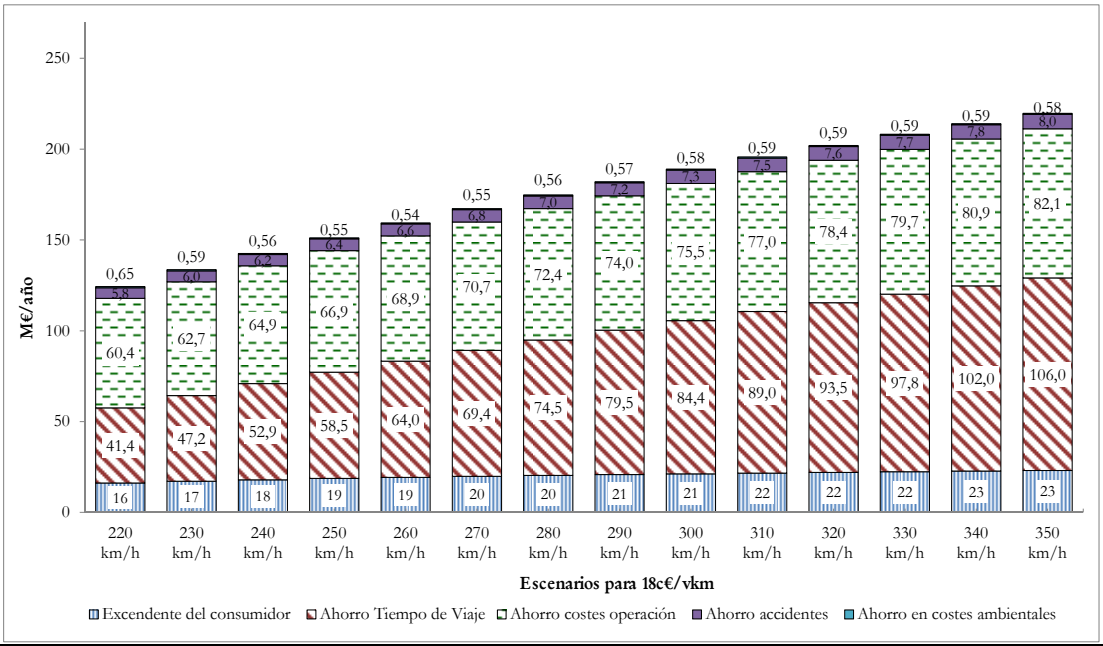


Figura 119. Desglose de cada uno de los diferentes ahorros en costes externos y en tiempos de viaje.

Fuente: Elaboración propia.

Se observan dos grandes partidas que hacen que el tren de alta velocidad sea un modo de transporte inductor de ahorros:

- Ahorros en tiempo de viaje, el tren de alta velocidad reduce el tiempo de viaje considerablemente en comparación con otros modos de transporte, exceptuando el avión que presenta tiempos de viaje parecidos en distancias entre los 600km y 800km (Steer Davies, 2004). Este ahorro en tiempo supone grandes ahorros para la sociedad, como puede verse en la figura anterior, en el caso de Madrid-Valencia los ahorros pueden llegar a los 106M€ al año.
- Ahorros en costes de operación, como muestra la Tabla 105 el tren de alta velocidad presenta unos costes operativos relativamente inferiores al resto de modos, por lo que cualquier transvase de viajeros supone ahorros en la línea o corredor. A velocidades medias alrededor de 260km/h estos ahorros son parecidos en volumen a los ahorros en tiempo de viaje, sin embargo, a velocidades medias muy altas la diferencia se incrementa considerablemente, lo que se traduce en que la influencia de la velocidad media en esta externalidad es mucho menor que en el caso de los ahorros de tiempo de viaje.

A la vista de los resultados, se destaca la influencia de los ahorros en costes medioambientales sobre el total de ahorros. A diferencia de lo que se puede pensar antes de realizar un análisis de este tipo, el ahorro en costes netos por el impacto en el medio ambiente no representa un beneficio sustancial sobre la totalidad de los ahorros, pues determinadas partidas como ruido, impacto en la naturaleza y paisaje y efectos urbanos, reportan impactos negativos para la sociedad.

5. APLICACIÓN AL CASO EJEMPLO

5.1 INTRODUCCIÓN

El objeto de los diferentes modelos empleados y desarrollados en el marco de esta tesis doctoral ha sido: por un lado, establecer las relaciones numéricas concretas para comparar casos teóricos; y, por otro lado, evaluar las relaciones funcionales entre la velocidad (ya sea la velocidad máxima o la comercial) y los costes, ingresos y beneficios atribuibles a determinado proyecto ferroviario.

El estudio y conocimiento de las variables (especialmente la velocidad) que definen y caracterizan los ingresos y beneficios generados por la explotación ferroviaria puede ser –y de hecho lo es- de gran ayuda para la realización de estudios tanto de planificación como de explotación ferroviaria, así como también pueden ayudar a mejorar el aprovechamiento de los recursos públicos e incrementar el beneficio social. Sin embargo, las decisiones concretas relativas a la rentabilidad tanto socio-económica como financiera de un proyecto, como es el caso de la construcción de una infraestructura ferroviaria, deben adoptarse aplicando los diferentes modelos desarrollados de manera conjunta, de forma que pueda analizarse las interacciones entre los diferentes parámetros que caracterizan los modelos.

No debe obviarse que estos modelos desarrollados y utilizados pueden utilizarse de manera independiente, sin analizar y evaluar las consecuencias y las implicaciones que tienen sobre la decisión en su conjunto, lo que no siempre supone una mejora en el proyecto ámbito de análisis. Por ejemplo, incrementar la velocidad en un determinado tramo en aras de mejorar los ingresos de una determinada ruta puede implicar también un incremento excesivo en los costes, tanto de inversión como de explotación, actuación que puede llegar a reducir considerablemente la rentabilidad global del proyecto.

Por lo tanto, parece conveniente aplicar los diferentes modelos desarrollados en un caso-ejemplo, con el objetivo de analizar los valores y resultados obtenidos de manera conjunta y poder así mostrar como ayuda al planificador a tomar decisiones más coherentes y eficientes sobre el proyecto.

Es importante destacar que los resultados que se obtendrán del caso ejemplo no corresponden a datos reales, sino que se han utilizado valores representativos de casos reales y contrastados con medidas reales en capítulos anteriores.

Antes de entrar en la presentación y el análisis de los resultados, se definirá el escenario de estudio; se explicará de forma resumida la metodología aplicada para el análisis de los casos, pues ya ha sido detallada en el apartado 1.2; y se especificarán las variables o datos de entrada que serán utilizados para la aplicación del modelo ACB.

5.2 DEFINICIÓN DEL ESCENARIO

El escenario seleccionado corresponde al estudio de la rentabilidad socio-económica y financiera de un nuevo trazado de alta velocidad que conectaría las ciudades de Madrid, Cuenca y Valencia (véase Figura 119). Se supondrá que la línea de alta velocidad que une estas ciudades, y que hoy en día está en servicio, no existe y se plantea y evalúa la construcción de un trazado nuevo con unas características específicas, similares al caso real.

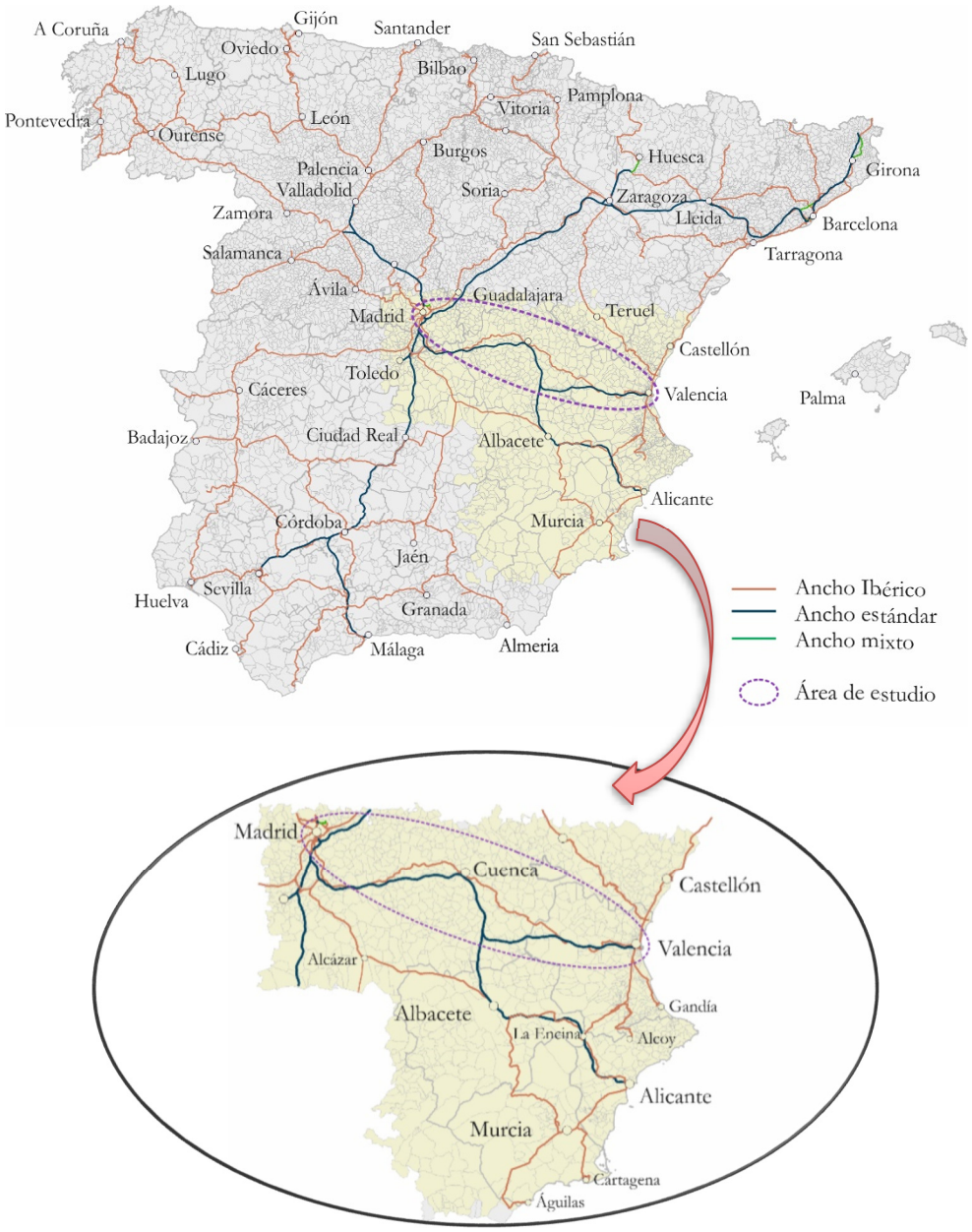


Figura 120. Situación en la red del caso ejemplo teórico analizado.

Fuente: Elaboración propia (cartografía de Luis E. Mesa).

Este trazado estará compuesto por dos tramos (Madrid-Cuenca y Cuenca-Valencia) y cuatro subtramo por tramo que corresponde a cada uno de los tipos de relieves que se han identificado en esta tesis (llano, semillano, montañoso y muy montañoso). Se considerará para el análisis una única ruta que una las ciudades Madrid-Valencia. Por tanto, puede afirmarse que el escenario seleccionado es un escenario teórico, definido como escenario tipo 1 en el apartado 0.3.2.2 de esta tesis, que se asemeja al trazado real que une ambas ciudades.

Se ha seleccionado un escenario tipo 1 (escenario teórico) con una única ruta con el fin de simplificar el caso ejemplo y poder así evaluar y analizar la metodología propuesta, pues si se hubiera considerado el escenario en su conjunto (corredor de Levante) aparecerían diferentes rutas (lineales y ramificados) y diferentes tramos, lo que incrementaría el número de combinaciones posibles, añadiría complejidad de cálculo al modelo, aumentaría el tiempo de simulación y restaría claridad a la exposición. Sin

embargo, la metodología, el procedimiento y las fases de aplicación del modelo serían las mismas, lo único que cambia es el número de inputs de entrada en el modelo.

Además, no es objeto de esta tesis valorar infraestructuras concretas ya existentes y puestas en servicio, sino más bien proponer una metodología robusta que permita analizar futuros proyectos con el fin de hacerlos más eficientes y coherentes con los recursos que se disponen.

El análisis socio-económico y financiero de la nueva infraestructura de alta velocidad se realizará para cuatro precios de billete diferentes (9c€/vkm, 12c€/vkm, 18c€/vkm y 20c€/vkm), lo que permitirá no solo analizar el efecto de la velocidad, sino el efecto en la rentabilidad del proyecto al precio del billete pagado por los viajeros.

5.3 METODOLOGÍA

Como se ha definido anteriormente, el objetivo de este apartado consiste en realizar una evaluación socio-económica y financiera de un nuevo trazado de alta velocidad que una las ciudades de Madrid, Cuenca y Valencia. Este análisis se realiza para cada tarifa (precio de billete) y para cada una de las combinaciones de velocidades máximas de diseño por subtramo.

Por lo tanto, para cada uno de los precios de billete prefijados se realizará un análisis de todas las combinaciones de velocidades máximas de diseño por cada subtramo que podría tener el trazado propuesto; se estimará en cada una de ellas la rentabilidad socio-económica y financiera y se seleccionará aquella/s que sea/n la/s mejor/es alternativa/s en términos de rentabilidad socio-económica sujeto a las restricciones que procedan.

El proceso que se seguirá corresponde a lo especificado en la Figura 5, que contempla las siguientes etapas:

1. Se comienza por la división de la infraestructura en subtramos (tramos de línea que comparten el mismo relieve del terreno: llano, semillano, montañoso, ...).
2. A cada subtramo se le asigna una velocidad máxima y, por lo tanto, se obtienen un conjunto de velocidades máximas de diseño por subtramos (conjunto de escenarios). El rango de velocidades máximas elegido está entre los 200km/h y los 500km/h con un salto de 10km/h.
3. El siguiente paso corresponde a la determinación de los costes de inversión. Aplicando la metodología desarrollada en la sección 3.3 de esta tesis se determina el coste de inversión para cada escenario, ya que es conocido el tipo de relieve que atravesará la infraestructura y la velocidad máxima por tramo.
4. Para cada combinación de velocidades máximas se determina la velocidad media y el tiempo de viaje, parámetros obtenidos empleando la metodología definida en el apartado 0.
5. Conocida la velocidad media y el precio de billete, se determina la demanda aplicando los modelos descritos en la sección 2.2, utilizando a su vez los datos de oferta, tanto del ferrocarril como de otros modos de transporte, ya que el escenario empleado para validar el modelo de demanda es el mismo que el que se utiliza en este caso-ejemplo.
6. Con las previsiones de demanda, su evolución durante el horizonte temporal del proyecto y un precio (tarifa) se procede a la estimación de los ingresos del operador (como se ha explicado en el apartado 2.5.1).
7. Conocida la velocidad máxima de la línea y prefijando unas características básicas del material rodante (capacidad, tipo de tracción, tipo de articulación, etc.) se determinan, para cada escenario, las características del tren. En esta fase se empleará el modelo desarrollado para determinar las características y el precio del material rodante (apartado 0).
8. Una vez determinada la tipología y características del tren y las previsiones de demanda se procede a la determinación del plan de explotación (modelos desarrollados en la sección 2.6.2).

9. La siguiente fase corresponde con la determinación de los costes de operación y de explotación. Conocida la velocidad media para cada escenario y el número de trenes necesarios para el servicio se procede con el cálculo de los costes de explotación, empleando la metodología expuesta en la sección 3.2.
10. El siguiente paso consiste en la estimación de los ahorros en costes externos y ahorros en tiempo (capítulo 4), ya que es conocida la demanda para cada modo, el trasvase de viajeros al tren de alta velocidad y las reducciones de tiempo de viaje conseguidas por este modo de transporte.
11. Una vez que se ha determinado los ingresos, beneficios, costes de explotación a lo largo del proyecto (flujo de caja) y se ha estimado los costes de inversión se procede a la estimación de la rentabilidad socio-económica y financiera del conjunto para cada uno de los escenarios propuestos (cada una de las combinaciones de velocidades máximas). Se estimará el VAN socio-económico y el VAN financiero mediante la metodología definida en el apartado 1.2.1.
12. La última fase que se llevará a cabo consiste en el criterio de decisión (análisis multicriterio). Se utilizarán en este caso ejemplo dos criterios de decisión: uno basado exclusivamente en maximizar la rentabilidad socio-económica; y otro basado también en maximizar el VAN socio-económico, pero sujeto a unas determinadas restricciones financieras, que en este caso consistirán en limitar los costes de inversión y limitar las pérdidas en la rentabilidad financiera del conjunto.

5.4 VARIABLES DEL MODELO

A continuación, se describen las variables e hipótesis que han sido consideradas o preestablecidas para la elaboración del caso ejemplo.

5.4.1 Características del trazado

El nuevo trazado (infraestructura) que se propone analizar estará formado por dos tramos (Madrid-Cuenca y Cuenca-Valencia) y cuatro tipos diferentes de subtramos por cada tramo. Como han sido definidos solamente cuatro tipos de subtramos posibles: llano, semillano, montañoso y muy montañoso (véase capítulo 3.3), aunque se han dividido cada uno de los tramos en cuatro subtramos, el trazado completo Madrid-Valencia tendrá solamente cuatro subtramos diferentes.

Es importante mencionar que no se analiza el trazado ferroviario de alta velocidad que hoy en día existe, ya que éste atraviesa únicamente dos tipos de relieve; semillano y montañoso (véase Tabla 98), lo que no permitiría evaluar todas las posibles combinaciones de velocidades y tipos de terreno desarrolladas en esta tesis, limitando el alcance de estudio.

El porcentaje de tipo de terreno y, por lo tanto, la longitud de cada uno de los diferentes subtramos que se empleará para la resolución del caso, se describen en la tabla que se muestra a continuación (Tabla 125).

Tabla 125: Tipos de terreno seleccionados para el trazado del caso ejemplo.

	Tipo de relieve Subtramo	Porcentaje tipo de terreno	Longitud línea recta *(km)*	Longitud Vmax diseño 350km/h
Trazado Madrid-Valencia	Muy Montañoso	9,6%	35	37,6
	Montañoso	35,4%	132	138,4
	Semillano	21,9%	83	85,6
	Llano	33,2%	125	129,7
			Total	**391**

Fuente: Elaboración propia.

Los porcentajes de tipo de terreno que este trazado atravesará han sido determinados (y prefijados para el modelo) a partir de los valores medios de las líneas de alta velocidad españolas, es decir, se ha determinado el porcentaje de relieve que atraviesan las principales líneas de alta velocidad de la red ferroviaria española y se ha obtenido que: el 9,6% de los kilómetros de red ferroviaria española de alta velocidad atraviesan zonas muy montañosas; el 35,4% atraviesan zonas montañosas; el 21,9% zonas de relieve semillano y; el 32,2% orografías suaves.

La longitud de cada subtramo se obtiene a partir de los porcentajes medios de terreno y de los kilómetros totales de línea. Además, cabe destacar que se ha considerado una distancia total de 391km, ya que es la longitud del trazado actual. Obsérvese que esta distancia total es la considerada para una velocidad de diseño de 350km/h, lo que permite calcular la distancia en línea recta de cada subtramo a partir de la relación establecida entre velocidad máxima y longitud real de la línea (ecuación (3. 28)).

Para cada subtramo definido se tomará una velocidad máxima dentro de un rango que va desde 200km/h a 500km/h en intervalos de 10km/h, lo que hace que se genere (para cada precio de billete considerado) una muestra de 923.521 escenarios.

$$I = [200, 210, 220, \dots, 500] \; \forall V_{max} \in I \qquad (5.\ 1)$$

Como muestra la tabla que se incluye a continuación (Tabla 126), se asignará una velocidad máxima a cada uno de los cuatro tipos de terreno definidos lo que corresponde a 31 elementos (200, 210, 220,…, 500) tomados en combinaciones de cuatro (variaciones con repetición de 31 elementos tomados de 4 en 4).

$$V_{31}^{4} = 31^{4} = 923.521 \qquad (5.\ 2)$$

Tabla 126: Combinación de velocidades máximas para cada escenario propuesto.

	Subtramo 1	Subtramo 2	Subtramo 3	Subtramo 4
	Muy Montañoso	Montañoso	Semillano	Llano
	Vel. Max (km/h)	*Vel. Max (km/h)*	*Vel. Max (km/h)*	*Vel. Max (km/h)*
Escenario 1	200	200	200	200
Escenario 2	200	200	200	210
Escenario 3	200	200	200	220
…	…	…	…	…
Escenario 923.521	500	500	500	500

Fuente: Elaboración propia.

Obsérvese que se generan 923.521 escenarios para cada precio de billete por lo que el caso ejemplo que se analizará en esta tesis contemplará aproximadamente 3.700.000 escenarios.

El resto de parámetros preestablecidos (inputs de entrada al modelo) se corresponde al escenario base analizado en el apartado costes de inversión:

- Plataforma de ancho de 14 metros a los que se les añaden aproximadamente 2 metros por cada lado para la capa de forma y subbalasto, para velocidad máxima de diseño de 350km/h.
- Ancho de vía estándar (1.435mm).
- Vía doble y distancia entre ejes de 4,7 metros para velocidad máxima de diseño de 350km/h.
- Rampa máxima de 25‰.

5.4.2 Características del material rodante

Las características del material serán diferentes dependiendo del escenario que se esté analizando, pues el tren empleado en el modelo será uno u otro dependiendo de la velocidad máxima que se considere, a igualdad del resto de inputs de entrada (véase Tabla 39).

La velocidad máxima del material rodante considerada en cada escenario será la máxima velocidad de la combinación de velocidades máximas por subtramo, por ejemplo, si se dispone de una combinación de velocidades de: 200km/h en el subtramo 1; 250km/h en el subtramo 2; 360km/h en el subtramo 3 y; 230 en el tramo 4, la velocidad máxima que se considerará para la determinación de las características del tren es la de 360km/h.

El resto de parámetros que se han fijado en el modelo son las correspondientes al tren AVE de la serie 103 que actualmente presta servicios en la línea Madrid-Barcelona y Madrid-Córdoba-Sevilla.

En la tabla que se muestra a continuación (Tabla 127) se incluyen los parámetros prestablecidos que permiten al modelo determinar las características del tren para cada caso analizado.

Tabla 127: Inputs de entrada en el modelo de determinación de las características de los trenes.

Plazas Aproximadas	404
Articulado o no Articulado	Articulado_bogies
Tracción	Distribuída
Anchura de la Caja	Caja Normal
Número de Pisos	1 Piso
Freno regenerativo	Freno regenerativo (SI)
Tipo de Señalización del tren	ASFA+ETCS 1+ETCS 2
Densidad de Plazas	Lujosa (3 clases cafetería y restaurante)
Potencia *(kW)*	Variable entre: 3.074kW -27.900kW

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla anterior, la potencia es una característica del tren que varía, ya que es un parámetro que depende de la velocidad máxima considerada para el tren. En el caso ejemplo aquí empleado la potencia del tren tomará valores desde los 3.074kW (correspondientes a velocidades máximas de 200km/h) a los 27.900kW (correspondientes a 500km/h).

5.4.3 Datos de entrada e hipótesis del modelo ACB

Como se ha mostrado a lo largo de esta tesis, para la aplicación de un ACB es necesario prefijar una serie de parámetros que son básicos e imprescindibles en toda evaluación tanto financiera como socio-económica. A continuación se muestra una tabla (Tabla 128) en la que se recogen los inputs de entrada que son empleados en el estudio de este caso ejemplo.

Tabla 128: Parámetros comunes en la metodología ACB empleada en el caso ejemplo.

Año de descuento y unidad monetaria	2011 euro
Horizonte de la inversión	30 años
Tasa de descuento financiera	5%
Tasa de descuento socio-económica	5,5%

Fuente: Elaboración propia.

Obsérvese que el horizonte temporal sobre el que se basará el análisis del proyecto es de 30 años y que la vida útil de los diferentes subsistemas de la infraestructura es superior a este horizonte temporal (véase Tabla 104). Por ello, es necesario determinar y contabilizar en la evaluación un valor residual para todos y cada uno de los activos del proyecto, incluso para aquellos trenes que se compren dentro de este periodo de evaluación.

La metodología empleada para la estimación del valor residual consistirá en el uso de la formulación relativas a la depreciación de los activos (ecuaciones (3. 60) y (3. 61)), como aconseja la Comisión Europea en aquellos proyectos con tiempos de vida muy largos, como puede ser el caso de proyectos de transporte.

Una última hipótesis empleada para la elaboración de este caso ejemplo corresponde a la ponderación de los costes de inversión que se obtengan tras aplicar el modelo desarrollado en el capítulo 3.3.

Como se ha mencionado anteriormente, la metodología se aplicará a una única ruta dentro del trazado establecido. Esto significa que se imputarán todos los costes de inversión de la infraestructura a esa única ruta sin considerar que ese trazado pueda tener otras rutas lineales, por ejemplo, Madrid-Castellón, Cuenca Castellón, etc., u otras rutas ramificadas como puede ser la ruta Madrid-Alicante, Madrid-Murcia, etc.

Obsérvese (véase Figura 121) que la línea de alta velocidad Madrid-Valencia forma parte de un corredor mucho más amplio que será construido en los próximos años (corredor de Levante). Además, esta línea es una infraestructura básica dentro del propio corredor, pues el carácter troncal que presenta (sobre todo el tramo Madrid-Cuenca) hace que la mayoría de las rutas que prestan o prestarán servicio en los próximos años utilicen parte de ella (algunos tramos) o su totalidad.

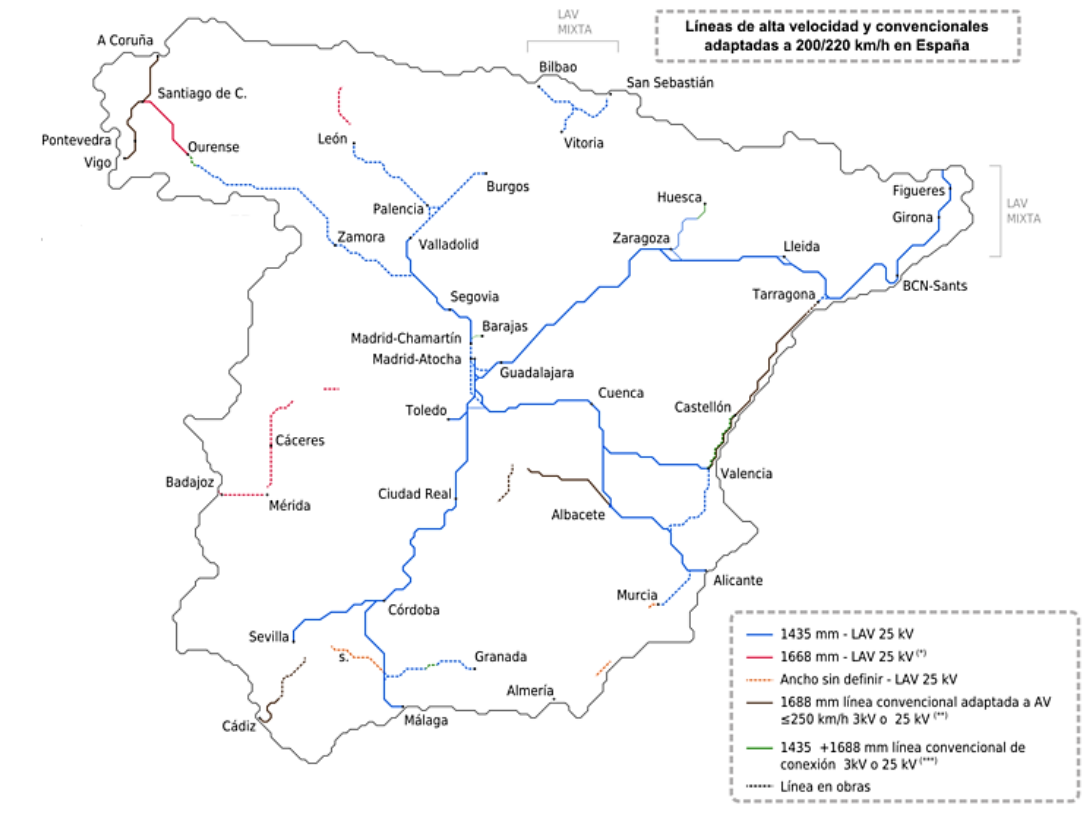


Figura 121. Líneas de Alta Velocidad (LAV) y líneas convencionales adaptadas a alta velocidad que existen en España, tanto en servicio (trazado continuo) como en obras (trazado discontinuo). (3 de mayo de 2015).

Fuente: http://www.ferropedia.es/wiki/Archivo:Esquema_de_LAVs_en_Espana.png

Una manera de afrontar la problemática asociada a emplear un escenario teórico con una única ruta, es la ponderar los costes de inversión y explotación de la infraestructura en función de la demanda total que tendrá cada una de las rutas que utilizarán el trazado que une Madrid con Valencia. De esta manera se imputarán los costes a todos los viajeros que utilicen esa infraestructura, no solo a aquellos que viajen entre Madrid y Valencia.

La tabla que se muestra a continuación (Tabla 129) resumen los tráficos estimados en el capítulo 2.2.2 para una serie de rutas del corredor de Levante (aquellas que a 2015 están en servicio o en obras, véase Figura 121), así como la estimación del porcentaje de viajeros sobre el total que utilizan la ruta Madrid-Valencia.

Tabla 129: Demanda total de las rutas que componen el corredor de Levante y porcentaje de demanda de la ruta Madrid-Valencia sobre el total.

Origen	Destino	Demanda total
Madrid	Albacete	96.093,8
Madrid	Alicante	368.345,9
Madrid	Almería	49.327,1
Madrid	Castellón	117.206,5
Madrid	Cuenca	103.062,9
Madrid	Murcia	234.047,0
Madrid	Valencia	1.155.877,5
Cuenca	Castellón	7.785,3
Cuenca	Valencia	29.817,5

Ruta		Tramo 1	Tramo 2
		Madrid-Cuenca	*Cuenca-Valencia*
Madrid	Albacete	96.093,8	0,0
Madrid	Alicante	368.345,9	0,0
Madrid	Almería	49.327,1	0,0
Madrid	Castellón	117.206,5	117.206,5
Madrid	Cuenca	103.062,9	0,0
Madrid	Murcia	234.047,0	0,0
Madrid	Valencia	1.155.877,5	1.155.877,5
Cuenca	Castellón	0,0	7.785,3
Cuenca	Valencia	0,0	29.817,5
	Viajeros totales	2.123.960,7	1.310.686,8
Porcentaje de viajeros		**54,42%**	**88,19%**

Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla anterior (Tabla 129) existen dos porcentajes de imputación a la ruta Madrid-Valencia diferentes dependiendo del tramo que se analice, esto es debido a que el tramo Madrid-Cuenca es común a mayor número de rutas que el tramo Cuenca-Valencia, de ahí que el tráfico de la ruta Madrid-Valencia suponga un porcentaje menor en el primer tramo que en el segundo.

Estos porcentajes de imputación obtenidos serán los empleados para ponderar los costes de inversión. Obsérvese que el nuevo trazado propuesto en esta tesis tiene dos tramos (Madrid-Cuenca y Cuenca-Valencia) y cuatro subtramos por tramo; por lo que, los costes de inversión de los cuatro subtramos correspondientes al tramo 1 se ponderará con un porcentaje de 54,4% y los costes de inversión de los cuatro subtramos correspondientes al segundo tramo, se ponderarán con un porcentaje del 88,2%.

Definidas las hipótesis y las variables de entrada al modelo, se procede con la aplicación del modelo ACB para todos y cada uno de los escenarios por tarifa que se obtienen del caso ejemplo (923.521 por tarifa) que corresponde a todas y cada una de las combinaciones de velocidades máximas por subtramo.

5.5 RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD Y LAS VARIABLES DE DECISIÓN

A continuación, se muestra de manera gráfica los resultados intermedios obtenidos tras la aplicación de los diferentes modelos desarrollados en esta tesis, así como los resultados finales (VAN socio-económico, VAN financiero) tras la aplicación de un análisis coste-beneficio para cada escenario.

5.5.1 Velocidad comercial y costes de inversión

Para cada combinación de velocidades máximas por subtramos se obtendrá un coste de inversión, pero también (conocida la longitud de los subtramos) una velocidad comercial para la ruta Madrid-Valencia. Por ello, puede afirmarse que para cada velocidad comercial se obtienen diferentes costes de inversión, ya que existen múltiples combinaciones de velocidades máximas que obtienen la misma velocidad comercial. Sin embargo, el coste de inversión es diferente entre unas combinaciones u otras.

A continuación se muestra gráficamente la relación entre la velocidad comercial, los costes de inversión y los costes de inversión equivalentes por kilómetro (Figura 122).

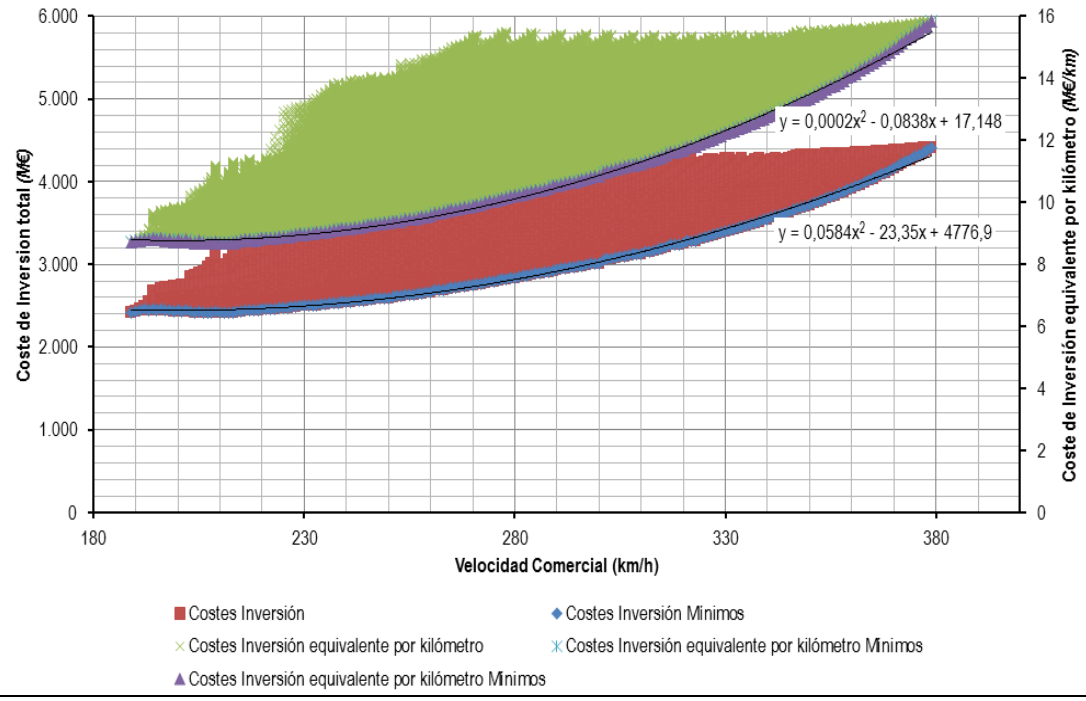


Figura 122. Relación entre la velocidad media y los costes de inversión.

Fuente: Elaboración propia.

Los costes de inversión equivalentes por kilómetro se han obtenido en función de una distancia equivalente a la distancia real (391km) y sin ningún tipo de ponderación en función de la demanda, es decir, se han calculado los costes totales deshaciendo la corrección realizada por viajero y se han dividido entre la distancia del trazado real, con el objetivo de evaluar que los resultados obtenidos tras la aplicación del modelo están en línea con los costes de inversión de una línea de estas características.

Puede observarse en la gráfica (Figura 122) que los costes equivalentes por kilómetro están dentro de un rango que va desde los 8,6M€/km y los 15,8M€/km dependiendo de la velocidad media que se considere. A la vista de los resultados, puede decirse que los

valores obtenidos para el caso ejemplo están en línea con lo estimado en el capítulo 3.3 para el trazado real Madrid-Valencia.

Si se analiza ahora la influencia de la velocidad en los costes de inversión, la gráfica (Figura 122) muestra claramente que a medida que se incrementa la velocidad comercial se incrementa los costes de inversión, esto tiene sentido ya que para incrementar la velocidad comercial es necesario incrementar la velocidad máxima en alguno o todos los subtramos definidos. Como se ha mostrado en el apartado costes de inversión, un incremento de la velocidad máxima, sea cual sea el tipo de relieve, supone un incremento en los costes de inversión.

Otro punto importante a destacar de los resultados es la cuantía de los costes totales de inversión, se observa que toman valores que están dentro de un rango que va desde los 2.424M€ a los 4.410M€, cantidad nada despreciable, teniendo en cuenta que, en este caso, han sido corregidos en función de la demanda.

Además, se destaca de los resultados que para cada velocidad comercial existe un coste de inversión mínimo, que resulta de una concreta combinación de velocidades máximas por subtramo que minimiza el coste de inversión. Si se unen estos puntos de inversión mínima, como se ha realizado en la gráfica anterior (Figura 122), se obtiene la curva de costes de inversión mínima (Curva de Pareto), que marca la frontera de mínima inversión.

Como se ha destacado en la Figura 122 la inversión mínima de caso-ejemplo, tanto para el coste total como para el coste equivalente por kilómetro se pueden estimar con las siguientes expresiones:

$C_{eq_km} = 0{,}0002 \times V_{com}^2 - 0{,}0838 \times V_{com} + 17{,}148$	(5. 3)
$C_{tot} = 0{,}0584 \times V_{com}^2 - 23{,}35 \times V_{com} + 4.776{,}9$	(5. 4)

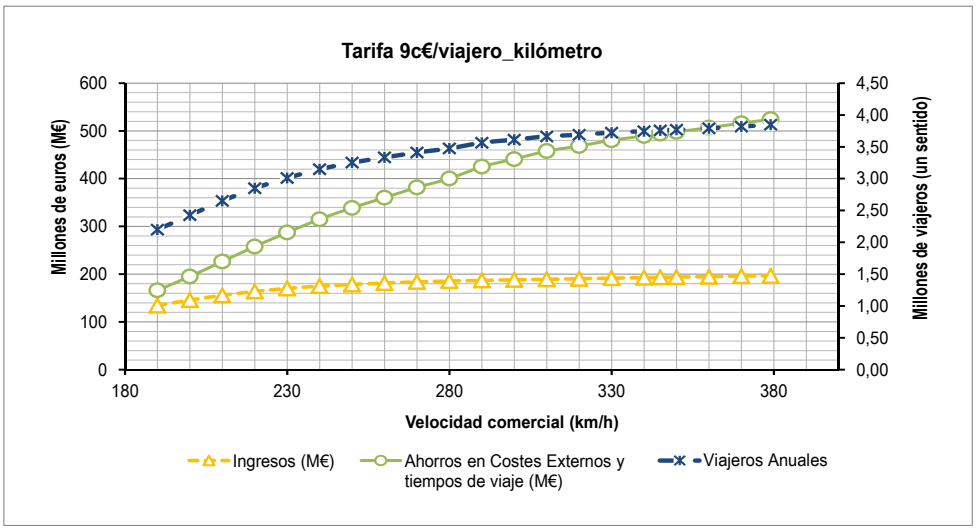
Donde:

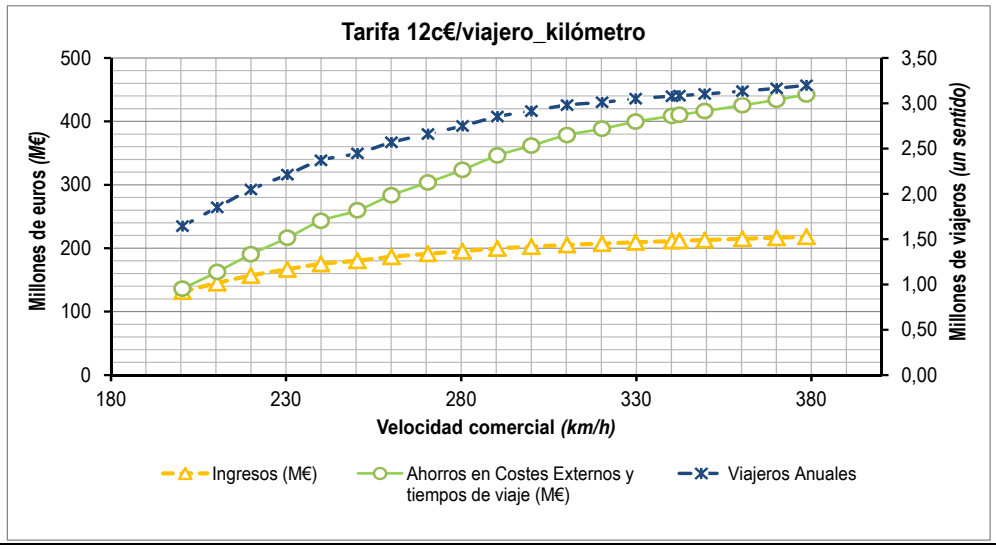
- C_{eq_km}: corresponde al coste equivalente por kilómetro mínimo (M€/km).
- C_{tot}: corresponde al coste total mínimo (M€).
- V_{com}: velocidad comercial (km/h).

5.5.2 Velocidad media, ingresos, ahorros en costes externos y ahorros en tiempos de viaje

Una vez conocida la relación velocidad y costes de inversión se procede con el análisis de los resultados en términos de ingresos y beneficios. Como se ha definido en la descripción de caso-ejemplo, se analizan cuatro tarifas (precios de billete) diferentes, esto implica que el número de escenarios (923.521) se multiplique por cuatro, debido a que los ingresos y beneficios dependen de la demanda, y ésta a su vez, además de otras variables, de la tarifa o precio de billete y de la velocidad comercial (tiempo de viaje). Por ello, se obtendrán ingresos y beneficios diferentes dependiendo de la tarifa que se esté considerando.

A continuación se muestra gráficamente la influencia de la velocidad comercial en los ingresos y en los beneficios socio-económicos dependiendo del precio del billete o tarifa (Figura 123).





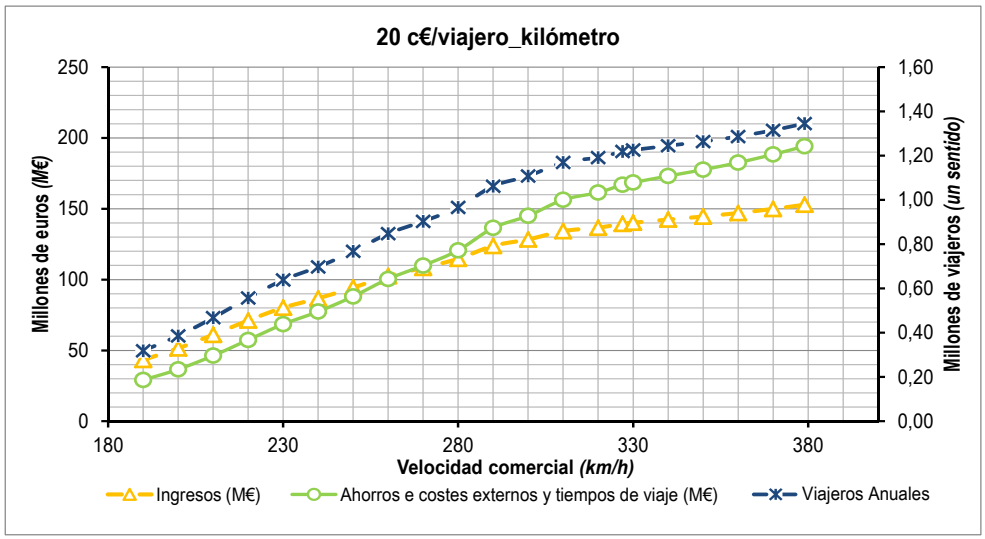


Figura 123. Ingresos, Ahorros en costes externos y tiempos de viaje y viajeros en relación a la velocidad comercial y precio del billete.

Fuente: Elaboración propia.

A la vista de los resultados obtenidos se afirma que:

- Sea cual sea la tarifa, a medida que se incrementa la velocidad (o, lo que es lo mismo, se reduce el tiempo de viaje) se produce un aumento en los ingresos y ahorros en costes externos y tiempos de viaje.
  Obsérvese que a medida que se incrementa la velocidad comercial aumenta el número de viajeros, por ello, tanto los ingresos como los ahorros en costes y tiempos se incrementan. Los resultados están en línea con las conclusiones obtenidas tras la aplicación de los modelos desarrollados en esta tesis.
  Es importante mencionar también que la relación entre la demanda y la velocidad comercial es diferente a bajas velocidades comerciales y a altas. Esto se observa claramente para la tarifa de 9c€/vkm, la explicación de este cambio en la elasticidad de la demanda se debe a que, en este caso-ejemplo, llega un punto (una velocidad comercial) en el que la demanda no experimenta incrementos sustanciales, pues el tren ya ha captado la mayor parte de los viajeros posibles para esta ruta y, por ello, cambios en la velocidad comercial no suponen incrementos en el tráfico o en la ganancia de viajeros.
- Por último, se observa que, para precios bajos, sea cual sea la velocidad comercial, los ahorros en costes externos y en tiempos de viajes son mayores que los ingresos, lo que tiene sentido pues los ahorros en costes externos y en tiempo no solo tienen en cuenta la demanda captada de otros modos de transporte, sino también los ahorros en tiempos de viaje, ahorros medioambientales, etc. por lo que se contabilizan más variables que suponen, generalmente, beneficio para la sociedad.
  En cambio, para tarifas altas y velocidades comerciales bajas se observa que los ingresos son ligeramente superiores a los ahorros en costes externos y tiempos de viaje. En estos casos la demanda captada por el tren de alta velocidad y el tiempo ahorrado en relación a otros modos de transporte no es suficiente y menor que los ingresos generados de multiplicar todos los viajeros por el precio ganado por viajero.

5.5.3 Velocidad media y costes de operación

A continuación, se incluye un gráfico que representa los costes de operación en relación a la velocidad comercial y en función de la tarifa establecida. Es importante mencionar que, al igual que en el caso de ingresos y ahorros en coste externos y tiempos de viaje, se representan los costes anuales del primer año de explotación, pues estos costes varían a lo largo del horizonte temporal del proyecto, ya que como se ha comprobado la demanda evoluciona (de acuerdo con las previsiones del PIB) con los años.

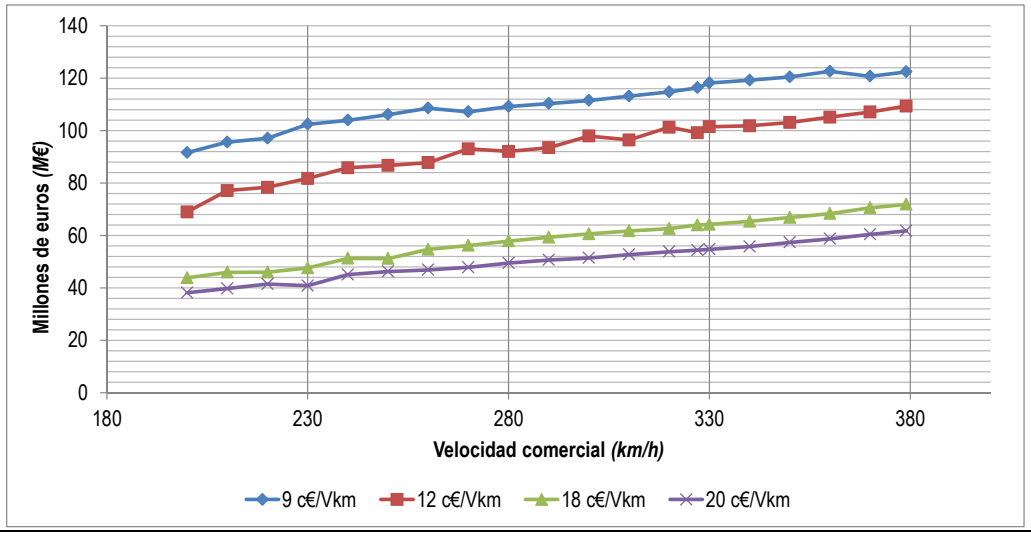


Figura 124. Costes de operación (M€) para las diferentes tarifas consideradas en el caso ejemplo.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos están en línea con lo calculado en el apartado 3.2.4, resumiéndose en:

- A menor precio (tarifa) mayor coste de explotación. Esto es debido a que el número de viajeros se incrementa y, por lo tanto, el operador necesita mayor número de trenes para dar servicio.
- La velocidad afecta de dos formas a los costes de operación:
  - A mayor velocidad, generalmente, se reduce el número de trenes necesarios para atender el servicio, ya que permite al operador hacer mayor uso del material rodante. Esto se observa claramente en la tarifa de 12 c€/vkm con la que a determinadas velocidades comerciales el coste sufre un pequeño descenso en relación a velocidades comerciales inferiores.
  - En aquellos casos en los que la velocidad no reduce el número de trenes, el coste de explotación se incrementa ligeramente con la velocidad. Esto es debido al incremento en el consumo de energía.

Es importante destacar que los resultados obtenidos pueden sufrir variaciones sustanciales si se considerase para este caso ejemplo otro tren diferente con otras características, especialmente con una capacidad diferente. Como se ha señalado en el capítulo 2.6.2, el coste de operación está claramente vinculado a las plazas del tren ya que influye en el número de trenes necesarios para atender a la demanda prevista.

5.5.4 Velocidad media, VAN Socio-económico y financiero

Conocida la relación de la velocidad y los costes de inversión, ingresos, ahorros en costes externos y tiempos de viaje; y conocida también la relación de la velocidad con los costes operativos, se procede a estimar la rentabilidad socio-económica y financiera de todos los escenarios propuestos.
A continuación se muestran gráficamente los resultados obtenidos para las diferentes tarifas (Figura 125, Figura 126, Figura 127 y Figura 128).

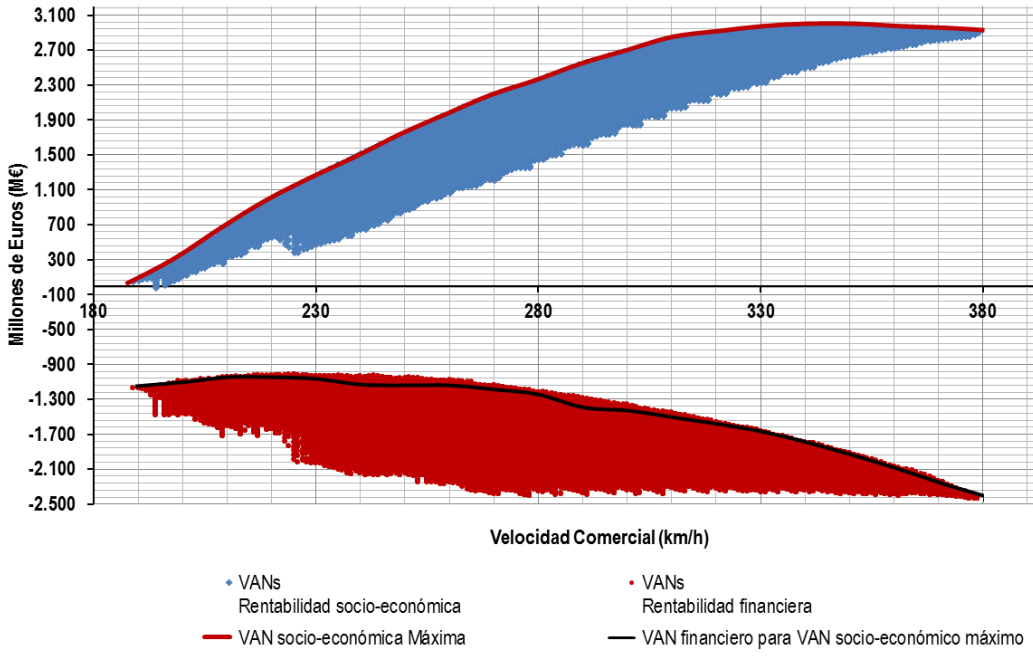


Figura 125. VAN Socio-económico y financiero para una tarifa de 9c€/vkm.

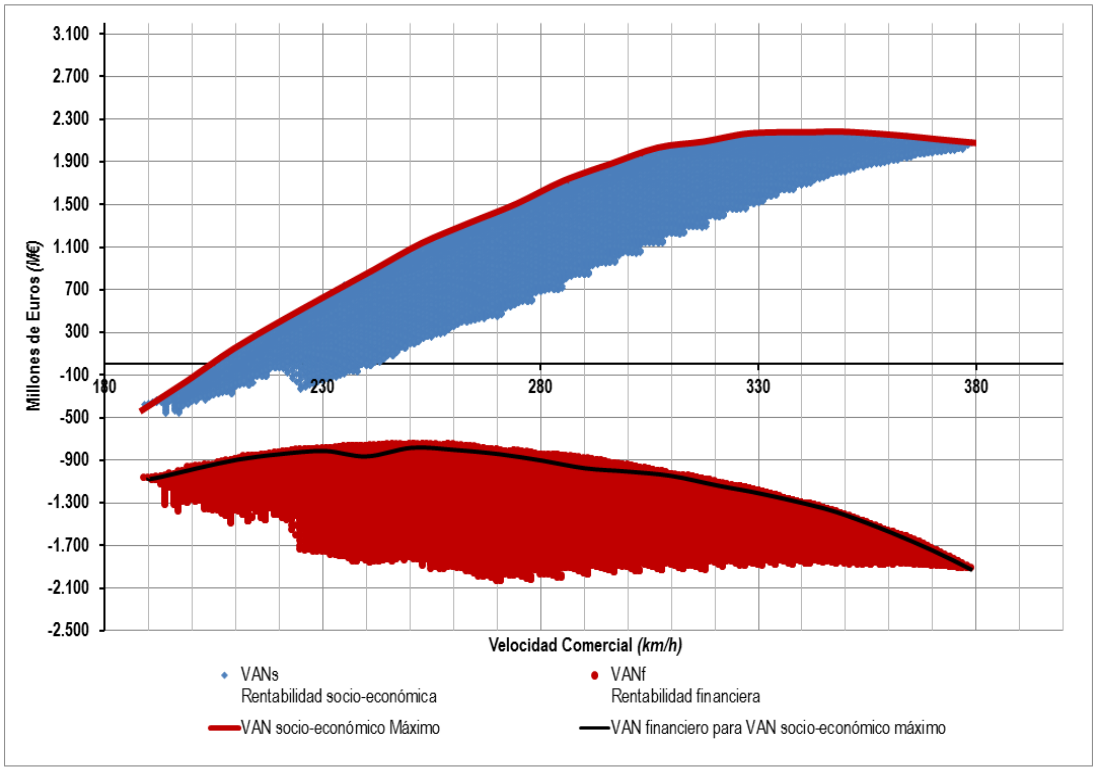


Figura 126. VAN Socio-económico y financiero para una tarifa de 12c€/vkm.

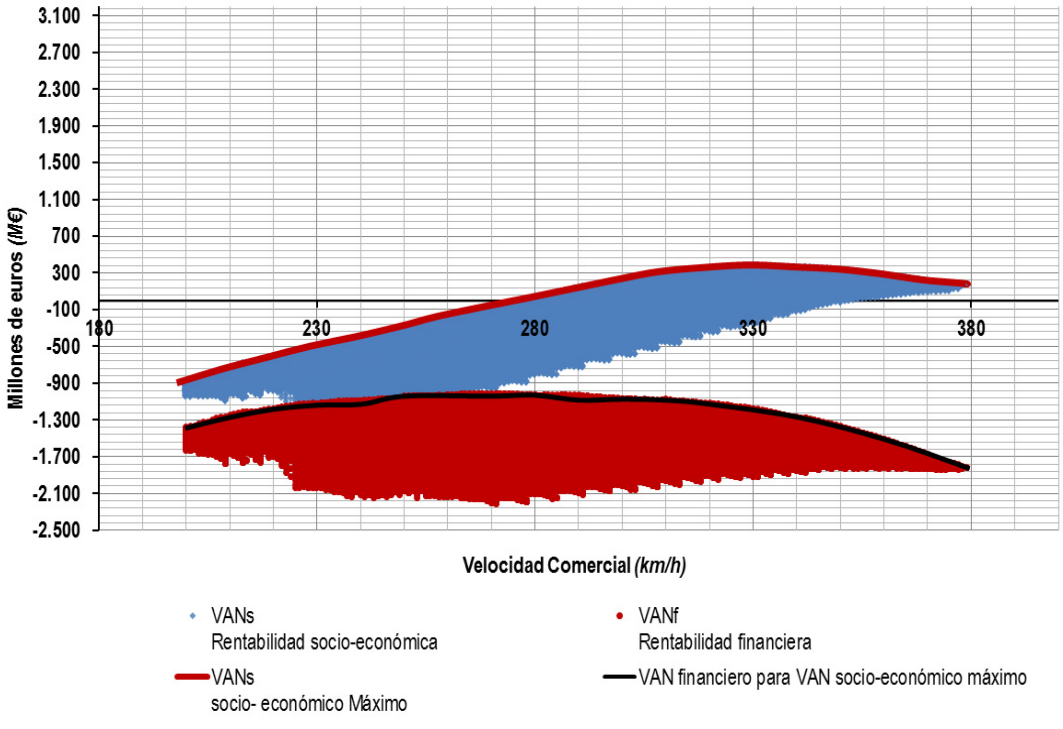


Figura 127. VAN Socio-económico y financiero para una tarifa de 18c€/vkm.

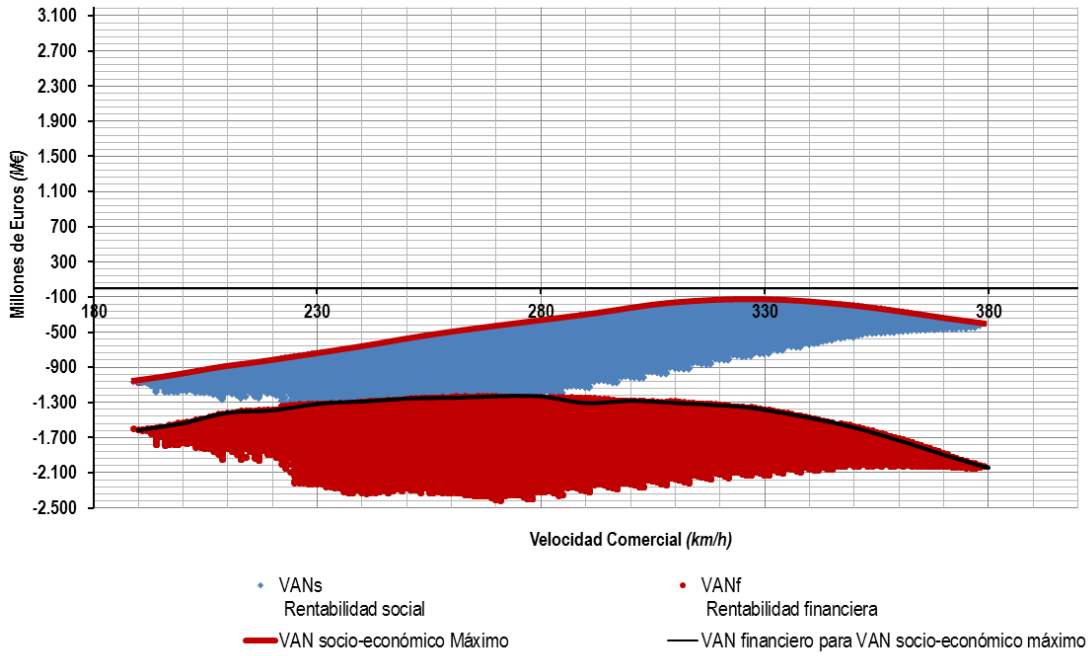


Figura 128. VAN Socio-económico y financiero para una tarifa de 20c€/vkm.

Fuente: Elaboración propia.

Analizando detenidamente las gráficas obtenidas se puede concluir que:

a) Sea cual sea la tarifa prestablecida, a medida que se aumenta la velocidad comercial se incrementa la rentabilidad socio-económica del proyecto. Este incremento se produce hasta una determinada velocidad media (velocidad óptima socio-económica) a partir de la cual la rentabilidad socio-económica del proyecto empieza a caer. Por ello, puede afirmarse que para cada tarifa se obtiene un óptimo en términos de rentabilidad socio-económica que se corresponde a una velocidad comercial determinada.
   Los resultados obtenidos muestran que: para una tarifa de 9c€/vkm el óptimo se produce a 345km/h; para una tarifa de 12c€/vkm el óptimo corresponde para velocidades de 342km/h; para 18c€/vkm el óptimo se da a 328km/h y; para 20c€/vkm el óptimo se da a 327km/h.
   A partir de estas velocidades, que llamaremos óptimas en términos de rentabilidad socio-económica, se observa un descenso en la rentabilidad del proyecto. Esto tiene una explicación sencilla, si se analiza la curva de costes de inversión y velocidad comercial (Figura 122) se observa que es a partir de los 330km/h cuando un cambio en la velocidad supone un incremento elevado de los costes de inversión; si se combina este cambio en la elasticidad del coste de inversión con el cambio de elasticidad sufrido en la demanda a elevadas velocidades medias (menor elasticidad), se llega un punto de inflexión (velocidad óptima), a partir del cual los ahorros en costes externos y en tiempos de viaje empiezan a ser menores que los incrementos en costes de inversión.
b) La rentabilidad socio-económica se reduce con el incremento en la tarifa, esto está en línea con el estudio (García Álvarez, González Franco, & Rubio García, 2015). A medida que se incrementa la tarifa se produce una reducción en los ahorros en costes externos y tiempos de viaje, sin embargo, el coste de inversión es el mismo independientemente de la tarifa, lo que implica una reducción de la rentabilidad social del proyecto.
c) La influencia de la velocidad comercial en la rentabilidad financiera es ligeramente diferente a la observada en la rentabilidad socio-económica del proyecto analizado. Se observa un incremento de la rentabilidad financiera con

el incremento de la velocidad en todos los casos (tarifas), pero al igual que en el caso de la rentabilidad socio-económica, alcanzada una determinada velocidad comercial se produce un cambio de tendencia y la rentabilidad financiera comienza a decrecer con el incremento de la velocidad, ese punto de inflexión se le llamará velocidad óptima financiera. Aunque la influencia de la velocidad en la rentabilidad financiera es parecida al efecto que provoca la velocidad en la rentabilidad socio-económica, se observa que el óptimo financiero se obtiene a velocidades comerciales mucho menores que él óptimo socio-económico.
Los resultados muestran que: para una tarifa de 9c€/vkm el óptimo financiero se produce a 224km/h; para 12c€/vkm el óptimo corresponde para velocidades de 253km/h; para una tarifa de 18c€/vkm el óptimo se da a 267km/h y; para 20c€/vkm el óptimo financiero se da a 267km/h.
Esto es debido a la relación entre la curva de ingresos y la curva ahorros en costes externos y tiempos de viajes (Figura 123), los resultados muestran claramente que en la mayoría de los casos los beneficios son mayores que los ingresos y que la elasticidad de los beneficios a la velocidad es mayor a la elasticidad de los ingresos.

d) Otro punto relevante es que a medida que la tarifa aumenta, el óptimo financiero para cada caso (cada tarifa) se produce a mayor velocidad, es decir para 9c€/vkm el óptimo financiero se produce a 224km/h, mientras que para 12c€/vkm el óptimo corresponde para velocidades de 253km/h. Esto se debe a que la elasticidad del ingreso a la velocidad es menor para precios bajos que para precios altos (véase Figura 42), es decir, para tarifas de 9c€/vkm los ingresos se incrementan al aumento de la velocidad en menor medida que para tarifas de 12c€/vkm.

5.5.4.1 Relación entre la velocidad máxima de cada subtramo y la rentabilidad socio-económica

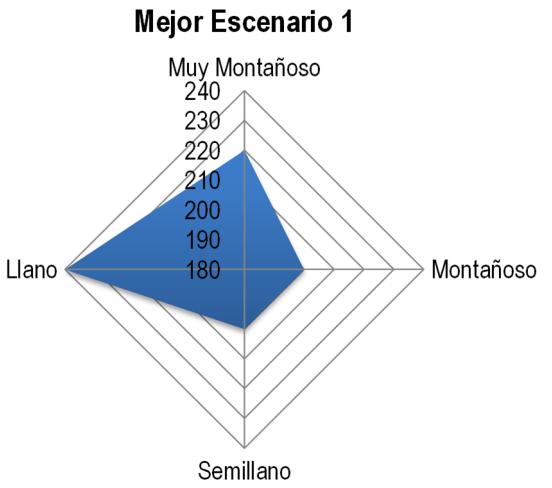
Analizada la influencia de la velocidad comercial en la rentabilidad socio-económica y financiera, pongamos el foco ahora en analizar, para una misma velocidad media, qué diferencias existen entre los mejores escenarios, aquellos casos con mayor VAN socio-económico, y aquellos casos presentan una peor rentabilidad económica.

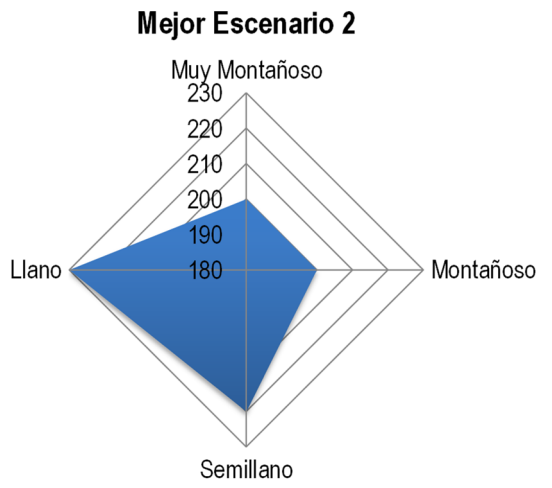
Como se ha expuesto anteriormente, para cada velocidad comercial existen infinitas combinaciones de velocidades máximas por subtramos. Se ha observado en los resultados, y se ha destacado gráficamente, que existen combinaciones de velocidades máximas por subtramos para cada velocidad comercial que maximizan la rentabilidad. Sin embargo, también existen combinaciones de velocidades que reducen claramente la rentabilidad, veamos a qué es debido.

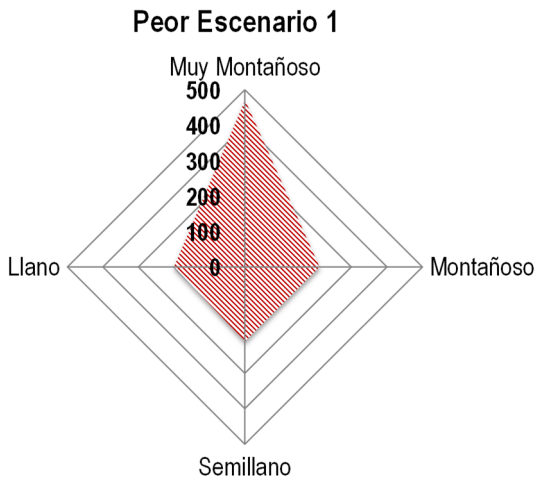
A continuación se muestra gráficamente (mediante el uso de gráficos radiales) para una serie de velocidades comerciales: 200km/h, 250km/h, 300km/h y 342km/h y para la tarifa de 12 c€/vkm, los dos mejores y los dos peores escenarios, es decir, los escenarios con mayor VAN socio-económico y los dos escenarios con peor rentabilidad socio-económica (Figura 129, Figura 130, Figura 131 y Figura 132).

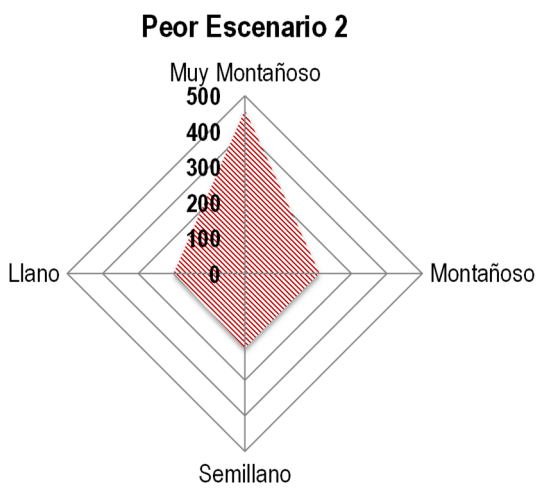
Cada uno de los ejes de los gráficos radiales empleados corresponde a un subtramo del caso ejemplo, es decir, el eje y (eje de ordenadas) con signo positivo corresponde al subtramo 1 que es el subtramo con un relieve montañoso y la parte negativa del eje de ordenadas corresponde al subtramo 3 que corresponde a un relieve semillano, mientras que el eje x (eje de abscisas), la parte positiva corresponde al subtramo 2 con relieve montañoso y la parte negativa corresponde al subtramo 4 con relieve llano.

En cada uno de esto ejes se dibuja la velocidad máxima considerada para el subtramo, por lo que la unión de los cuatro puntos (cuatro velocidades máximas) forma un área que representa de forma gráfica la combinación de velocidades máximas por subtramos del escenario elegido. En este caso se seleccionarán los dos mejores y los dos peores escenarios en términos de rentabilidad socio-económica, las diferencias en el área (en su forma) explicarán a qué son debidas estas diferencias.





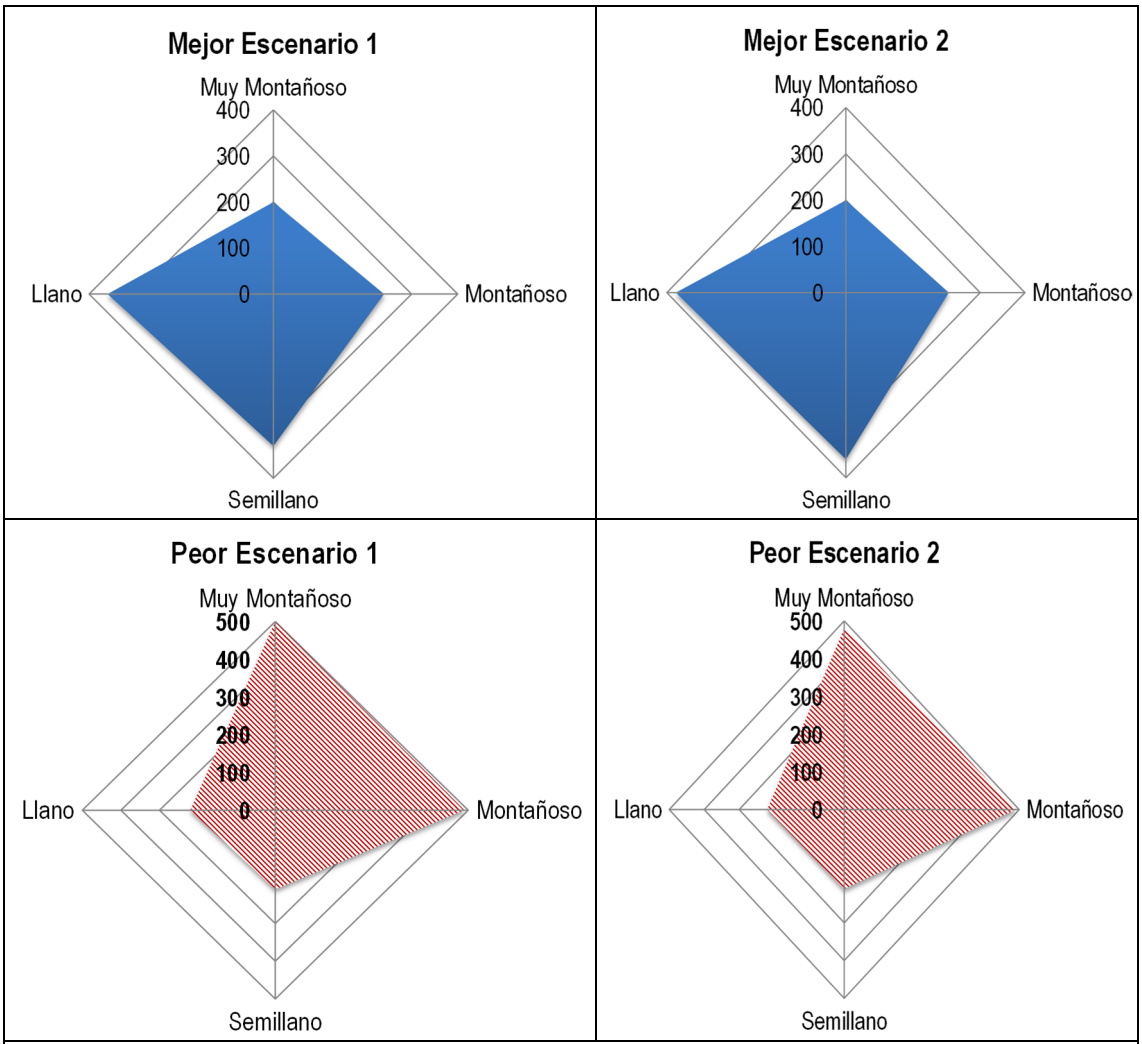




	Velocidad máxima de diseño *(km/h)*				Velocidad comercial	VANs Socio-económico
	Subtramo 1	Subtramo 2	Subtramo 3	Subtramo 4		
	Muy Montañoso	*Montañoso*	*Semillano*	*Llano*	*km/h*	*(M€)*
Mejor Escenario 1	220	200	200	240	200	-140,9
Mejor Escenario 2	200	200	220	230	200	-146,7
Escenario Medio	300	200	220	210	200	-231,6
Peor Escenario 1	470	210	210	200	200	-345,6
Peor Escenario 2	460	210	210	200	200	-337,7

Figura 129. Mejores y peores escenarios en términos de rentabilidad socio-económica para una velocidad media de 200 km/h.

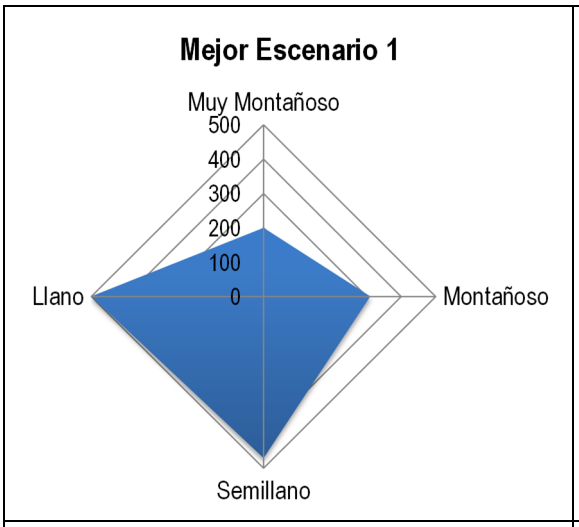
Fuente: Elaboración propia.

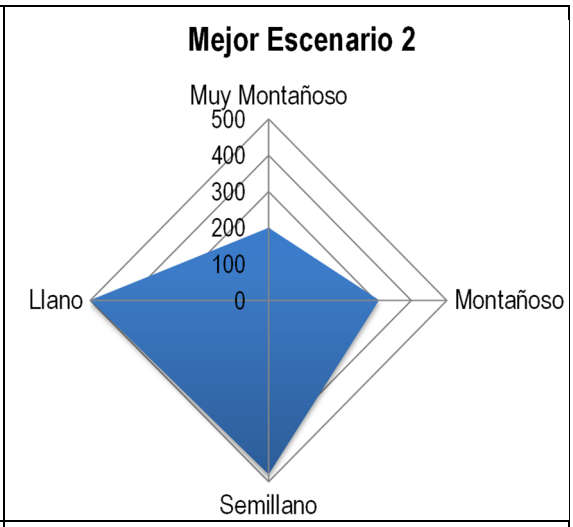


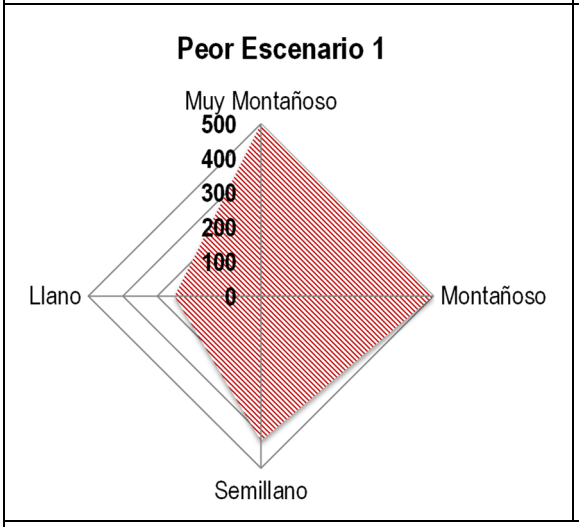
	Velocidad máxima de diseño *(km/h)*				Velocidad comercial	VANs Socio-económico
	Subtramo 1	Subtramo 2	Subtramo 3	Subtramo 4		
	Muy Montañoso	*Montañoso*	*Semillano*	*Llano*	*km/h*	*(M€)*
Mejor Escenario 1	200	240	330	360	250	1027,4
Mejor Escenario 2	200	230	360	380	250	1027,2
Escenario Medio	360	360	250	230	250	761,4
Peor Escenario 1	500	490	210	220	250	194,3
Peor Escenario 2	480	490	210	220	250	195,0

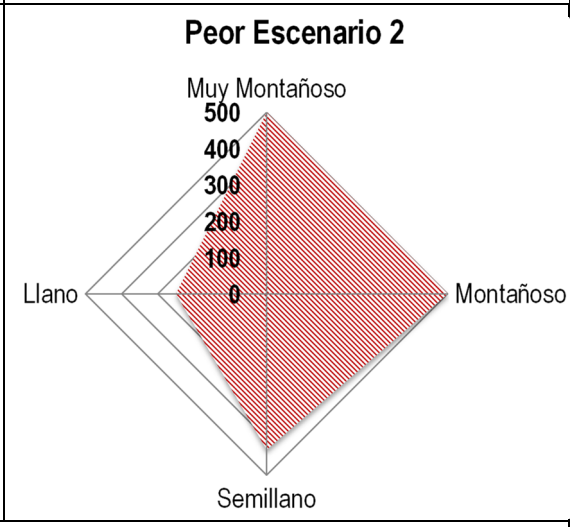
Figura 130. Mejores y peores escenarios en términos de rentabilidad socio-económica para una velocidad media de 250 km/h.

Fuente: Elaboración propia.





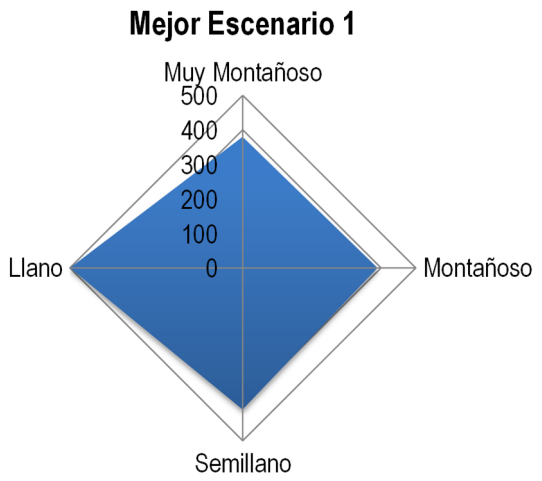


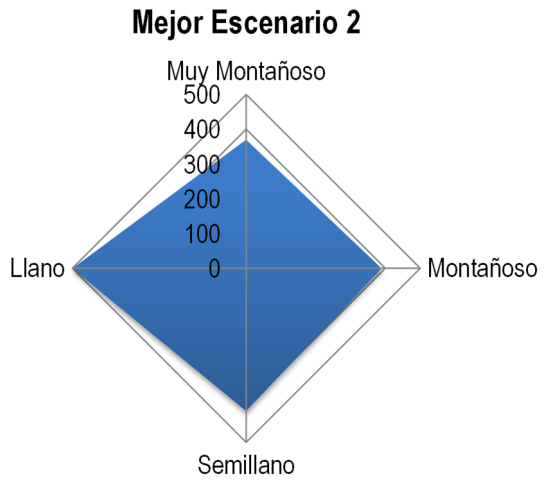


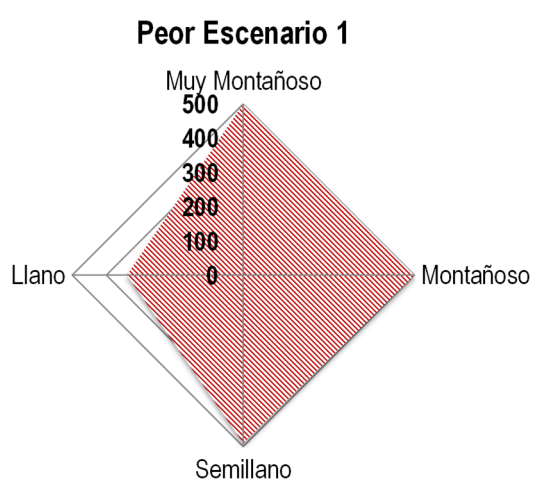
	Velocidad máxima de diseño *(km/h)*				Velocidad comercial	VANs Socio-económico
	Subtramo 1	Subtramo 2	Subtramo 3	Subtramo 4		
	Muy Montañoso	*Montañoso*	*Semillano*	*Llano*	*km/h*	*(M€)*
Mejor Escenario 1	200	310	470	500	300	1.611,9
Mejor Escenario 2	200	310	480	500	300	1.604,2
Escenario Medio	320	420	360	300	300	1.574,6
Peor Escenario 1	500	500	420	250	300	1.100,4
Peor Escenario 2	500	500	430	250	300	1.096,8

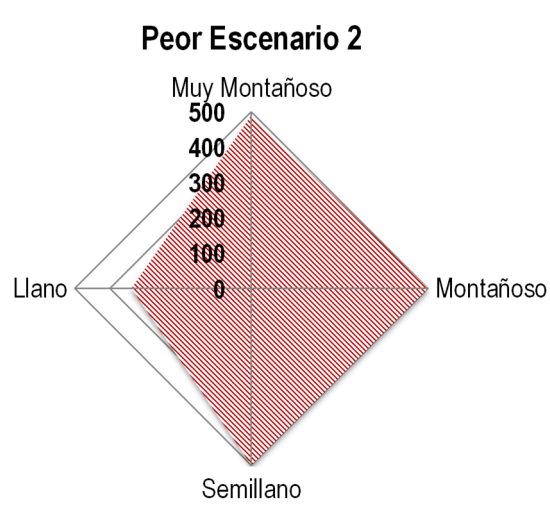
Figura 131. Mejores y peores escenarios en términos de rentabilidad socio-económica para una velocidad media de 300km/h.

Fuente: Elaboración propia.









	Velocidad máxima de diseño *(km/h)*				Velocidad comercial	VANs Socio-económico
	Subtramo 1	Subtramo 2	Subtramo 3	Subtramo 4		
	Muy Montañoso	*Montañoso*	*Semillano*	*Llano*	*km/h*	*(M€)*
Mejor Escenario 1	380	390	410	500	342	2.171,9
Mejor Escenario 2	370	390	410	500	342	2.171,7
Escenario Medio	420	470	380	400	342	1.973,5
Peor Escenario 1	500	500	490	340	342	1.703,9
Peor Escenario 2	490	500	500	340	342	1.705,3

Figura 132. Mejores y peores escenarios en términos de rentabilidad socio-económica para una velocidad media óptima (342km/h).

Fuente: Elaboración propia.

Las gráficas muestran claramente y para todas las velocidades comerciales que los escenarios con mayor rentabilidad socio-económica son aquellos en los que se selecciona la velocidad máxima de diseño más alta en los subtramos llanos. Además, se demuestra gráficamente que para conseguir la máxima rentabilidad socio-económica se debe de construir a mayores velocidades máximas los subtramos llanos, después en los subtramos semillanos, después en subtramos montañosos y por último en subtramos muy montañosos.

Además, se muestra claramente que los peores casos son en los que las velocidades máximas más altas se seleccionan para los subtramos muy montañosos y las velocidades máximas más bajas se seleccionan para los subtramos llanos.

Por ejemplo, obsérvense los mejores y peores escenarios para 300km/h (tabla de la Figura 131), en este caso para conseguir 300km/h de velocidad media se dispone de cuatro combinaciones de velocidades máximas diferentes, aquellas en las que la velocidad máxima más alta se ha seleccionado para los subtramos montañoso y muy montañoso presentan una rentabilidad socio-económica mucho menor que aquellas en las que la velocidad máxima se ha planificado para terrenos llanos y semillanos.

En definitiva, los resultados demuestran que la rentabilidad de la infraestructura está muy ligada a la velocidad máxima y sobre todo está muy ligada a cuál es y qué características (relieve) tiene el subtramo en el que se pretende circular más deprisa (mayor velocidad máxima). Se demuestra que mejores rentabilidades se consiguen planificando el trazado a mayor velocidad en terrenos llanos que en el resto de terrenos y que si es necesario aumentar la velocidad es mejor hacerlo primero en terrenos llanos, después en terrenos semillanos, después en montañosos y si no queda alternativa en terrenos muy montañosos. Cualquier otra combinación reduce la rentabilidad del proyecto.

5.6 CRITERIOS DE DECISIÓN; DECISIÓN MULTICRITERIO

La decisión de construir o no la infraestructura o en este caso la decisión de para qué combinación de velocidades máximas por subtramos debe ser construida la infraestructura es una decisión que se basa en un análisis multicriterio.

La metodología empleada en esta tesis (análisis coste-beneficio) ofrece herramientas que permiten y ayudan a decidir sobre a qué velocidad comercial y máxima debe ser construida la línea. Sin embargo, es el planificador el que tiene que decidir finalmente, basando su decisión en un análisis en el que normalmente se emplearán varios criterios.

En este caso-ejemplo la decisión de a qué velocidad comercial y a qué combinación de velocidades máximas debe construirse el escenario propuesto se tomará basándose en dos criterios:

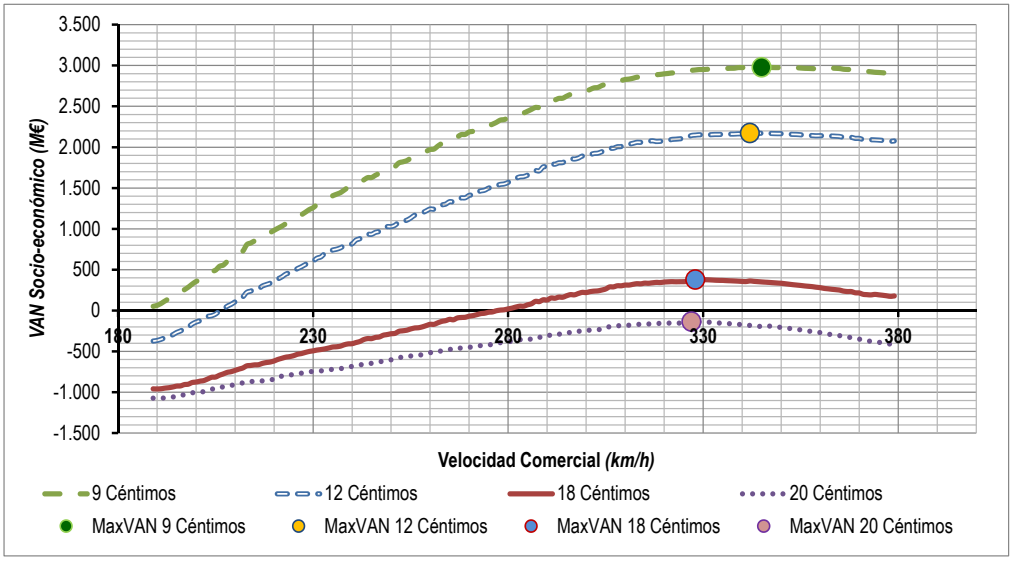
1. Máxima rentabilidad socio-económica.
2. Máxima rentabilidad socio-económica sujeta a una limitación en el coste de inversión y una restricción en la rentabilidad financiera (VAN financiero).

Ello no excluye que la metodología desarrollada en esta tesis permita aplicar también otros criterios de decisión alternativos.

5.6.1 Aplicación del criterio de decisión de la máxima rentabilidad socio-económica

Si el criterio de decisión reside únicamente en la máxima rentabilidad socio-económica, el planificador debe buscar el punto (velocidad comercial) dónde la rentabilidad económica alcanza su máximo (velocidad óptima socio-económica).

En el caso ejemplo que se está analizando en esta tesis el punto de máxima rentabilidad se alcanza a diferentes velocidades comerciales dependiendo de la tarifa que se haya establecido. A continuación se muestra gráficamente el punto de máxima rentabilidad socio-económica para cada tarifa analizada (Figura 133).



		9c€/vkm	12c€/vkm	18c€/vkm	20c€/vkm
Subtramo 1	*Muy Montañoso*	390	380	360	360
Subtramo 2	*Montañoso*	400	390	360	360
Subtramo 3	*Semillano*	410	410	370	360
Subtramo 4	*Llano*	500	500	500	500
Velocidad media	*(km/h)*	345	342	328	327
Tiempo de Viaje	*(h)*	1,10	1,11	1,16	1,17
Viajeros Anuales	Millones *(un sentido)*	3,76	3,08	1,61	1,219
Ingresos	*(M€)*	193	212	166	139
Ahorros en C. Externos	*(M€)*	494	410	218	167
C. Inversión	*(M€)*	3.647	3.593	3.379	3.364
C. Operación Operador y G.I	*(M€)*	119,20	101,85	63,99	54,37
VANs Socio-económico	***(M€)***	**2.977**	**2.172**	**378**	**-136**
TIR Socio-económico	*(%)*	14,0%	12,1%	6,9%	5,0%
VANf Financiero	*(M€)*	-1.863	-1.322	-1.163	-1.359
TIR Financiero	*(%)*	0,3%	1,7%	1,8%	1,1%

Figura 133. VAN Socio-económico máximo para las diferentes tarifas empleadas en el caso ejemplo.

Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en tabla de la Figura 133, la máxima rentabilidad económica se alcanza a diferentes velocidades dependiendo de la tarifa considerada. Puede afirmarse que el mejor caso de todos los analizados corresponde a una tarifa de 9c€/vkm y a una velocidad comercial de 345km/h.

Además los resultados muestran la combinación de velocidades máximas a las que deben construirse los diferentes subtramos no solo para conseguir esa velocidad comercial, sino también para alcanzar esa máxima rentabilidad social (véase tabla de la Figura 133).

Obsérvese que para todas las tarifas se obtiene que el subtramo que debe construirse a mayor velocidad máxima, es el subtramo que tiene un relieve llano y aquel que debe construirse a menor velocidad máxima es para relieve muy montañoso.

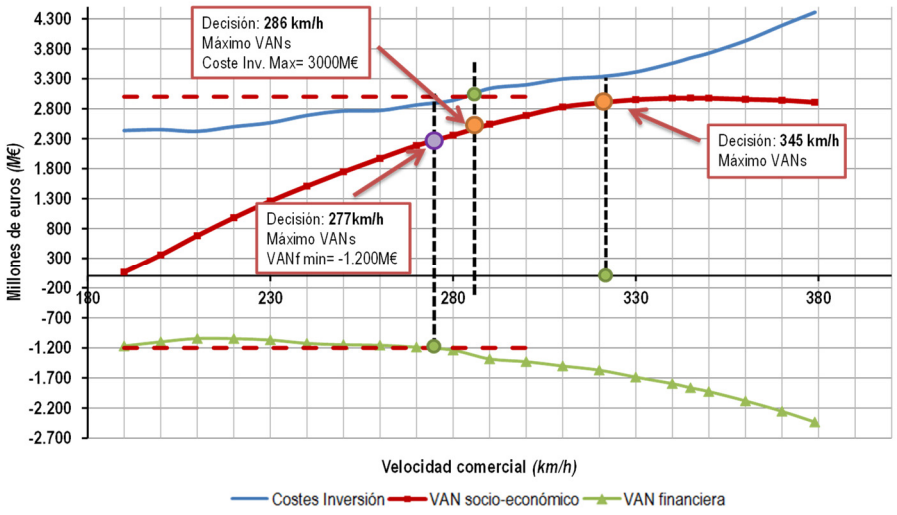
En resumen, si la decisión se tomase solo y exclusivamente teniendo en cuenta la rentabilidad socio-económica, la velocidad comercial (tiempo de viaje) y la combinación de velocidades máximas por subtramos para cada tarifa sería la que se ha especificado en la tabla que se incluye en la Figura 133.

5.6.2 Aplicación del criterio de decisión de máxima rentabilidad socio-económica sujeta a una limitación en la inversión y restricción en la rentabilidad financiera (VAN financiero)

Otro posible criterio de decisión podría ser alcanzar la máxima rentabilidad socio-económica, pero limitando el coste de inversión y la rentabilidad financiera. Los resultados anteriores cambiarían de forma importante, es decir, la velocidad comercial y las velocidades máximas por subtramo al que se tendría que construir la infraestructura sería completamente diferente que en el caso anterior.

Observemos qué ocurre en el caso ejemplo aquí analizado si se limitase el coste de inversión a 3.000 millones de euros y no se permitiese una rentabilidad financiera (VAN financiero) inferior a -1.200 millones de euros.

La gráfica y tabla que se muestra a continuación (Figura 134) muestra los resultados obtenidos para una tarifa de 9c€/vkm.

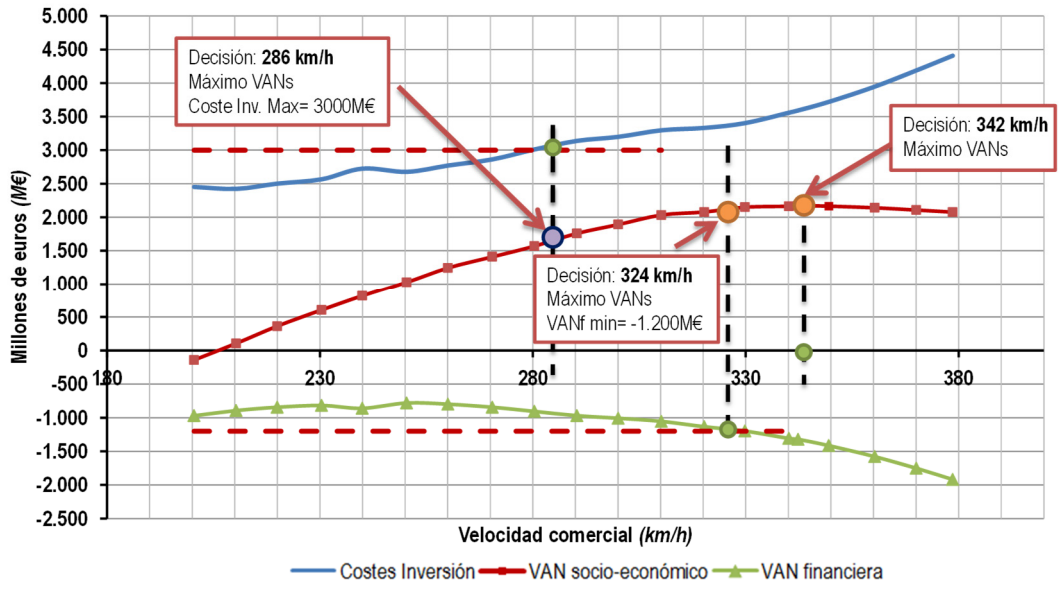


		Restricciones	
		Coste Inv. Max= 3000 M€	VANf min= -1.200 M€
Subtramo 1	*Muy Montañoso*	290	260
Subtramo 2	*Montañoso*	290	300
Subtramo 3	*Semillano*	360	300
Subtramo 4	*Llano*	390	370
Velocidad media	***(km/h)***	**286**	**277**
Tiempo de Viaje	***(h)***	**1,39**	**1,44**
Viajeros Anuales	Millones *(un sentido)*	3,50	3,43
Ingresos	*(M€)*	187	185
Ahorros en C. Externos	*(M€)*	410	389
C. Inversión	*(M€)*	3.000	2.868
C. Operación Operador y G.I	*(M€)*	110,03	109,83
VANs Socio-económico	***(M€)***	**2.419**	**2.255**
TIR Socio-económico	*(%)*	14,3%	14,2%
VANf financiero	*(M€)*	-1.300	-1.200
TIR Financiero	*(%)*	0,9%	1,0%

Figura 134. VAN Socio-económico máximo sujeto a unas restricciones (coste de inversión y VAN financiero) para una tarifa de 9c€/vkm.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa claramente cómo la velocidad óptima se ha reducido sustancialmente en relación al supuesto anterior. Se ha pasado de 345km/h (para una tarifa de 9c€/vkm) a una velocidad comercial óptima de 277km/h. Además, la rentabilidad socio-económica se ha reducido considerablemente pasando de 2.977M€ a 2.255M€. Sin embargo, el proyecto seguiría teniendo una rentabilidad positiva (un VAN socio-económico de 2.255M€) y cumpliría con las restricciones propuestas.
Pasemos a analizar ahora para una tarifa de 12 c€/vkm. A continuación se muestra una gráfica y una tabla que resume los resultados obtenidos (Figura 135).



		Restricciones	
		Coste Inv. Max= 3000 M€	VANf min= -1.200 M€
Subtramo 1	*Muy Montañoso*	230	250
Subtramo 2	*Montañoso*	330	390
Subtramo 3	*Semillano*	330	390
Subtramo 4	*Llano*	370	470
Velocidad media	***(km/h)***	**286**	**324**
Tiempo de Viaje	***(h)***	**1,39**	**1,19**
Viajeros Anuales	Millones *(un sentido)*	2,76	2,98
Ingresos	*(M€)*	197	207
Ahorros en C. Externos	*(M€)*	328	384
C. Inversión	*(M€)*	3.000	3.417
C. Operación Operador y G.I	*(M€)*	94,11	98,82
VANs Socio-económico	***(M€)***	**1.609**	**1.980**
TIR Socio-económico	*(%)*	11,8%	11,9%
VANf Financiero	*(M€)*	-909	-1.200
TIR Financiero	*(%)*	2,2%	1,8%

Figura 135. VAN Socio-económico máximo sujeto a unas restricciones (coste de inversión y VAN financiero) para una tarifa de 12c€/vkm.

Fuente: Elaboración propia.

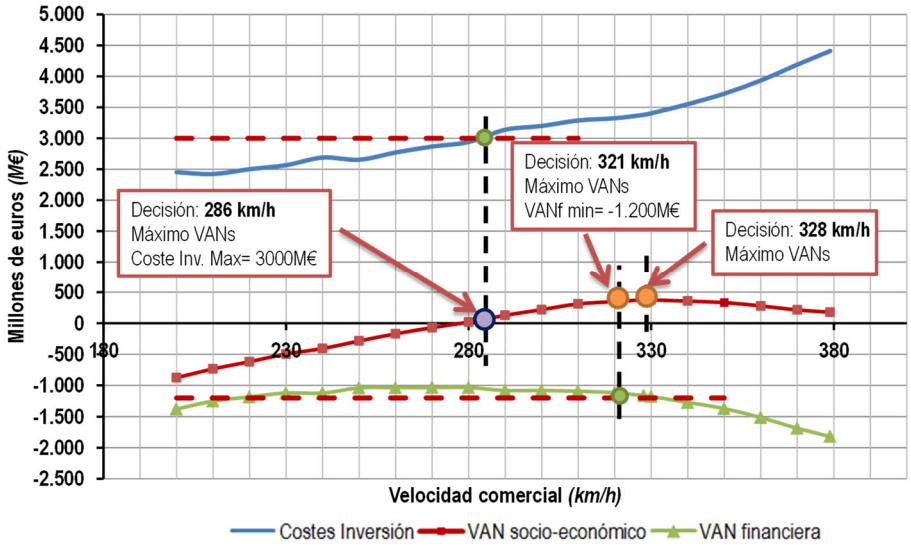
Al igual que en el caso anterior, la velocidad comercial a la que se debería construir la infraestructura se reduce en relación al criterio de decisión de máxima rentabilidad socio-económica. Como puede observarse en la tabla que se incluye en la Figura 135, la velocidad que cumple todas las condiciones propuesta y que maximizaría la rentabilidad

es la de 286km/h, claramente inferior a la que resultó del primer criterio de decisión (342km/h).

Obsérvese que en este caso lo que limita el criterio y, por la tanto, la velocidad óptima, es el coste de inversión, pues para una tarifa de 12c€/vkm se obtienen rentabilidades financieras mayores que para 9c€/vkm, debido principalmente al incremento en los ingresos.

De todas formas, al igual que para la tarifa de 9c€/vkm, se alcanza una rentabilidad social positiva y se cumplen todas las restricciones (un VAN socio-económico de 1.609M€).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la tarifa de 18c€/vkm. (Figura 136).



		Restricciones	
		Coste Inv. Max= 3000 M€	VANf min= -1.200 M€
Subtramo 1	*Muy Montañoso*	230	240
Subtramo 2	*Montañoso*	330	360
Subtramo 3	*Semillano*	330	430
Subtramo 4	*Llano*	370	500
Velocidad media	***(km/h)***	**286**	**321**
Tiempo de Viaje	***(h)***	**1,39**	**1,20**
Viajeros Anuales	Millones *(un sentido)*	1,33	1,54
Ingresos	*(M€)*	142	161
Ahorros en C. Externos	*(M€)*	165	206
C. Inversión	*(M€)*	3.000	3.360
C. Operación Operador y G.I	*(M€)*	59,88	63,19
VANs Socio-económico	***(M€)***	**21**	**250**
TIR Socio-económico	*(%)*	5,6%	6,5%
VANf Financiero	*(M€)*	-1.077	-1.200
TIR Financiero	*(%)*	1,5%	1,7%

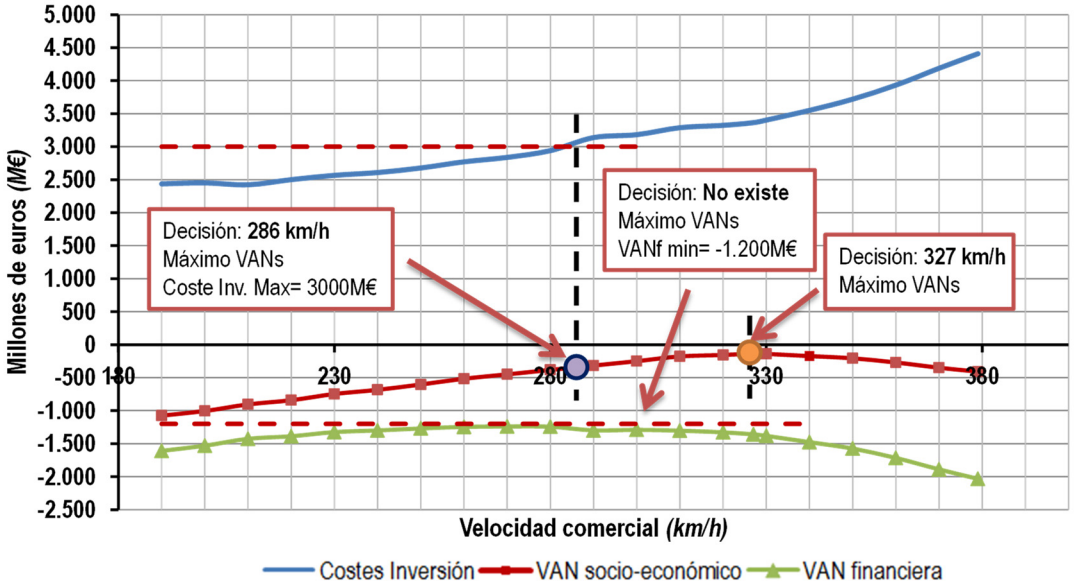
Figura 136. VAN Socio-económico máximo sujeto a unas restricciones (coste de inversión y VAN financiero) para una tarifa de 18c€/vkm.

Fuente: Elaboración propia

Ocurre exactamente lo mismo que para las tarifas de 9c€/vkm y 12c€/vkm: la velocidad comercial a la que se maximiza la rentabilidad socio-económica es mucho más baja que para el criterio de máxima rentabilidad (se pasa de una velocidad comercial de 328km/h a 286km/h).

Al igual que para 12c€/vkm, la limitación se debe al coste de inversión y no a la rentabilidad financiera. Se observa que la rentabilidad socio-económica es positiva pero estaría casi en el límite de aceptación (un VAN socio-económico de 21 M€).

Por último, se presentan los resultados obtenidos para una tarifa de 20c€/vkm (Figura 137).



		Restricciones	
		Coste Inv. Max= 3000 M€	VANf min= -1.200 M€
Subtramo 1	*Muy Montañoso*	230	-
Subtramo 2	*Montañoso*	330	-
Subtramo 3	*Semillano*	330	-
Subtramo 4	*Llano*	370	-
Velocidad media	***(km/h)***	**286**	**-**
Tiempo de Viaje	***(h)***	**1,39**	**-**
Viajeros Anuales	Millones *(un sentido)*	0,98	-
Ingresos	*(M€)*	116	-
Ahorros en C. Externos	*(M€)*	124	-
C. Inversión	*(M€)*	3.000	-
C. Operación Operador y G.I	*(M€)*	51,39	-
VANs Socio-económico	***(M€)***	**-390**	**-**
TIR Socio-económico	*(%)*	3,6%	-
VANf Financiero	*(M€)*	-1.288	-
TIR Financiero	*(%)*	0,7%	-

Figura 137. VAN Socio-económico máximo sujeto a unas restricciones (coste de inversión y VAN financiero) para una tarifa de 20c€/vkm.

Fuente: Elaboración propia.

Este escenario claramente debería ser rechazado pues no cumple uno de los supuestos predefinidos en el análisis multicriterio, como puede observarse no existe ninguna velocidad comercial que alcance la restricción de -1.200M€ de rentabilidad financiera.

Además, se observa que incluso con una limitación de coste de inversión se obtiene una rentabilidad socio-económica negativa (un VAN socio-económico de -390M€), lo que indica que los costes del proyecto son mayores a sus ingresos y, por lo tanto, se aconsejaría rechazar el proyecto.

A modo de resumen se destaca en la figura que se muestra a continuación (Figura 138) para cada una de las tarifas: la velocidad comercial a las que se debe construir la línea analizada en el caso ejemplo, teniendo en cuenta este segundo criterio de decisión (máximo VAN socio-económico sujeto a unas restricciones de inversión y de VAN financiero).

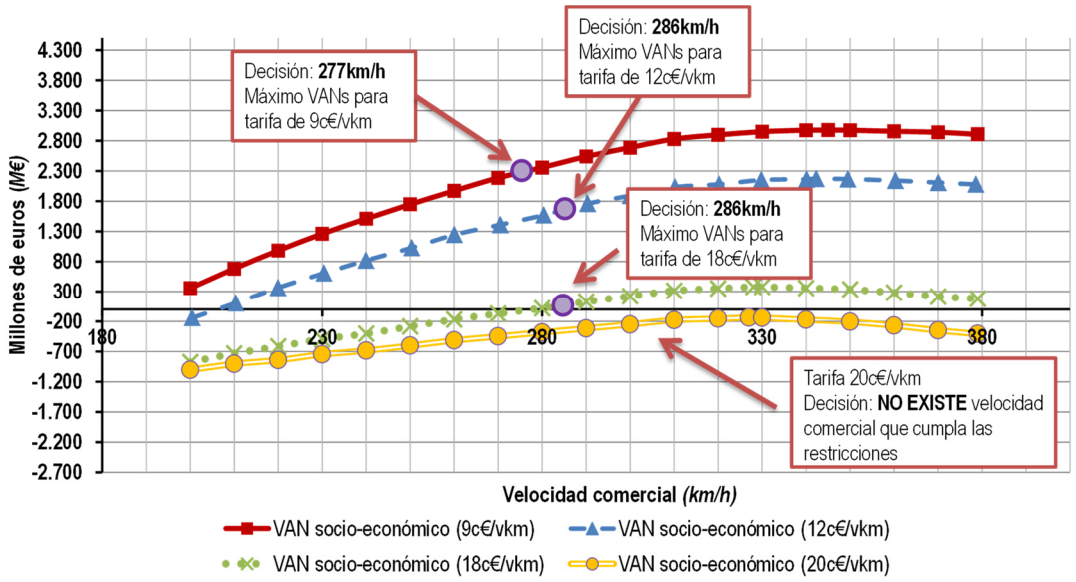


Figura 138. Velocidad comercial máxima que obtiene el VAN Socio-económico máximo sujeto a las limitaciones de coste de inversión y VAN financiero.

Fuente Elaboración propia.

5.6.3 Conclusiones del caso ejemplo

Como se ha observado de los resultados, tanto para un criterio como para otro, la velocidad media y, por lo tanto, la combinación de velocidades máximas por subtramo, es diferente según la tarifa que se considera. Se observa que las mejores rentabilidades socio-económicas se consiguen para tarifas bajas y, por ello, puede afirmarse que en este caso ejemplo los mejores resultados en ambos criterios de decisión son los correspondientes a la tarifa de 9c€/km.

En la tabla que se muestra a continuación (Tabla 130) se resume los resultados obtenidos para los dos criterios considerados. En ella se incluye para cada tarifa la velocidad comercial, el tiempo de viaje y el cuadro de velocidades máximas por subtramo a la que debería construirse la línea considerada en el caso ejemplo. Además, se destaca (números en negrita y con fondo) los dos casos (uno por criterio) que maximizan la rentabilidad socio-económica del proyecto y cumple los requisitos establecidos en el criterio de decisión, por lo tanto, se señala los casos que deberían implementarse en este caso ejemplo.

Tabla 130: Combinación de velocidades máximas por subtramo y velocidad comercial a la que se debe construir la línea del caso ejemplo analizado.

Criterio de máxima rentabilidad socio-económica										
	Subtramo 1 (Muy Montañoso)	Subtramo 2 (Montañoso)	Subtramo 3 (Semillano)	Subtramo 4 (Llano)	Velocidad media	Tiempo de Viaje	VANs Socio-económico	TIR Socio-económico	VANf Financiero	TIR Financiero
	(km/h)	(km/h)	(km/h)	(km/h)	(km/h)	(h)	(M€)	(%)	(M€)	(%)
9c€/vkm	**390**	**400**	**410**	**500**	**345**	**1,10**	**2.977**	**14,0%**	**-1.863**	**0,3%**
12c€/vkm	380	390	410	500	342	1,11	2.172	12,1%	-1.322	1,7%
18c€/vkm	360	360	370	500	328	1,16	378	6,9%	-1.163	1,8%
20c€/vkm	360	360	360	500	327	1,17	-136	5,0%	-1.359	1,1%
Criterio de máxima rentabilidad socio-económica sujeto a una limitación en la inversión y en la rentabildad financiera										
9c€/vkm	**260**	**300**	**300**	**370**	**277**	**1,44**	**2.255**	**14,2%**	**-1.200**	**1,0%**
12c€/vkm	230	330	330	370	286	1,39	1.609	11,8%	-909	2,2%
18c€/vkm	230	330	330	370	286	1,39	21	5,6%	-1.077	1,5%
20c€/vkm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Los valores mostrados en la tabla anterior (Tabla 130) corresponderían a los resultados obtenidos tras la aplicación del modelo desarrollado en esta tesis. En resumen, se ha demostrado que:

(i) Existe una velocidad comercial, un tiempo de viaje y un cuadro de velocidades máximas por subtramo que maximiza la rentabilidad socio-económica del proyecto ámbito de análisis y, por lo tanto, se demuestra que existe una velocidad óptima (o tiempo de viaje óptimo) a la que debe construirse la infraestructura.

(ii) Dependiendo del criterio de decisión considerado la velocidad comercial y el cuadro de velocidades máximas por subtramo al que se debe construir la línea, es diferente.

(iii) Para cada tarifa se obtiene una velocidad comercial y una combinación de velocidades máximas que mejoran la rentabilidad del proyecto. Esto es una cuestión clave, ya que cualquier cambio en la tarifa, implica una variación en la velocidad comercial y, en consecuencia, una variación en el cuadro de velocidades máximas a las que se debería construir la infraestructura. Por ello, una vez realizada la evaluación socio-económica para una tarifa determinada, estimada la velocidad óptima y la combinación de velocidades máximas por subtramo y construida la línea para esa combinación de velocidades máximas, no se debería cambiar la tarifa (precio del billete) ya que se reduciría la rentabilidad socio-económica de la línea.

6. CONCLUSIONES

6.1 INTRODUCCIÓN

Las conclusiones de esta tesis serán agrupadas en tres grandes bloques: i) las relativas a los ingresos y beneficios y su relación con la velocidad y la tarifa; ii) las referidas a la relación entre la velocidad, la tarifa y los costes de inversión y de explotación y iii) las correspondientes a la relación entre la velocidad y la rentabilidad socio-económica y financiera del proyecto.

6.2 EFECTO DE LA VELOCIDAD Y LA TARIFA EN LOS INGRESOS Y BENEFICIOS

a) **Efecto de la velocidad en la demanda**. Un incremento de la velocidad media supone una disminución del tiempo de viaje, lo que implica una reducción en el coste generalizado asumido por los viajeros. Descensos en el coste generalizado implican incrementos en la cuota de mercado del ferrocarril que se traducen en incrementos en la demanda. En resumen, a igualdad de precios, un incremento de la velocidad produce un incremento de la demanda.
   Tras la aplicación de los modelos en el caso-ejemplo, se observa que a medida que la longitud entre dos puntos es mayor, un incremento en la velocidad comercial implica incrementos de la cuota de mercado mayores (mayores elasticidades). Esta tendencia se cumple hasta una determinada longitud de la ruta, a partir de la cual, el avión es más competitivo (principalmente por su velocidad), por ello, el tren empieza a perder cuota de mercado.
   Los resultados obtenidos concluyen que no existe una única elasticidad que caracteriza la variación de la demanda en función de la velocidad media para todas las líneas de alta velocidad, por lo que la utilización de elasticidades medias llevaría a errores de cálculo. Las elasticidades obtenidas para el caso ejemplo se han agrupado en tres intervalos de tiempo que se resumen en:
   - ✓ Tiempos de viaje inferiores a 40 minutos, obtienen unas elasticidades entre -0,2 y -0,5 con un promedio de -0,35.
   - ✓ Tiempos de viaje de entre 40 y 80 minutos obtienen unas elasticidades entre -0,4 y -1,2 con un promedio de -0,6.
   - ✓ Y, finalmente, para tiempos de viaje de entre 80 y 180 minutos presentan unas elasticidades entre -0,6 y -1,7 con un promedio de -0,95.

b) **Efecto de la velocidad en el ingreso**. Para una tarifa fija (precio de billete) a medida que se reduce el tiempo de viaje (mayor velocidad comercial), se observa una mayor demanda y, por lo tanto, mayores ingresos obtenidos por el operador. En la línea de alta velocidad analizada (Madrid-Valencia) un incremento de 10km/h de la velocidad media (pasar de una velocidad media de 220km/h a 230km/h) supone un incremento de aproximadamente 4% en los ingresos del operador.

c) **Efecto del precio del billete en los ingresos.** Puede afirmarse que el precio del billete influye claramente en la decisión de viajar y, por lo tanto, en el número de viajeros. A mayor precio, menos viajeros están dispuestos a viajar, ya que su coste generalizado se incrementa. Por ello, existe una relación inversa entre la tarifa impuesta por el operador y el número de viajeros (elasticidad negativa).
   La elasticidad del ingreso al precio varía enormemente según sea la tarifa y la velocidad comercial. En el estudio realizado se han obtenido elasticidades que van desde el -0,58 al -2,36. Al igual que en el caso de la demanda, se confirma que la utilización de elasticidades medias para calcular los ingresos del operador implica grandes errores de cálculo e ineficiencias en las metodologías.
   En el caso ejemplo analizado reducciones del precio en tarifas altas (ej. 20c€/vkm) obtendrían mayores ingresos (elasticidades que rondan los -2) que

reducciones de precio en tarifas bajas (elasticidades menores que -1). Esto es debido a que, principalmente, reducciones del precio en tarifas altas, permiten captar muchos viajeros de otros modos de transporte, mientras que reducciones de la tarifa con precios bajos la ganancia de viajeros no es muy acentuada, ya que el tren de alta velocidad, en el caso ejemplo analizado, ya es dominante con tarifas bajas.

Se ha observado que, cuando el tren de alta velocidad presenta elevadas cuotas de mercado, la reducción del precio no capta viajeros suficientes (porque no hay mercado adicional suficiente) como para compensar la pérdida de ingreso por viajeros que supone bajar la tarifa.

d) **Efecto de la velocidad en los ahorros en costes externos y tiempos de viaje.**

La velocidad es un gran inductor en ahorros externos, ya que el volumen de viajeros transvasados de otros modos al tren de alta velocidad es muy elevado.

Los resultados han destacado dos grandes partidas que hacen que el tren de alta velocidad sea un modo de transporte inductor de ahorros en costes externos:

- Ahorros en tiempo de viaje, el tren de alta velocidad reduce el tiempo de viaje considerablemente en comparación con otros modos de transporte. En el caso de Madrid-Valencia analizado los ahorros han llegado hasta los 106M€ al año.
- Ahorros en costes de operación. Para altas velocidades comerciales la influencia de la velocidad en esta externalidad es mucho menor que en el caso de ahorros de tiempo de viaje, sin embargo, a velocidades comerciales medias alrededor de 260km/h estos ahorros son parecidos en volumen a los ahorros en tiempo de viaje.

Otro aspecto a destacar dentro de los costes externos, y que se ha demostrado en el caso ejemplo analizado, ha sido los ahorros obtenidos por impacto en el cambio climático (emisiones de CO_2). Teniendo en consideración, además de las emisiones producidas en la etapa de operación, fabricación y mantenimiento de vehículos, las emisiones de CO_2 producidas en la etapa de construcción de la infraestructura ferroviaria, así como las producidas en la etapa de manteniendo de la misma, el sistema (el tren de alta velocidad) aún es capaz de generar ahorros en emisiones de CO_2 con respecto a otros modos de transporte.

Se ha obtenido que el ahorro en el cambio climático varía dependiendo del precio del billete (rango de beneficios entre 0,7M€/año y 5M€/año). Los resultados muestran que, para precios de billete más caros, se alcanzan menores ahorros en costes netos por impacto en el cambio climático.

6.3 EFECTO DE LA VELOCIDAD EN LOS COSTES DE EXPLOTACIÓN Y EN LOS COSTES DE INVERSIÓN

a) **Efecto de la velocidad en los costes de explotación.** Se destaca que un incremento de la velocidad supone una reducción de tiempo de viaje, lo que puede suponer; por un lado, una reducción del tiempo de uso de los recursos disponibles, por ejemplo, el material rodante y, por otro lado, para un mismo tiempo de uso, el material puede recorrer mayor número de kilómetros e incrementar así su producción (plazas-kilómetro).

Tras el análisis realizado se obtienen que incrementos en la velocidad y, por lo tanto, reducciones del tiempo de viaje implica pequeños incrementos en el coste de explotación, siempre y cuando el número de trenes necesario para atender el servicio sea el mismo.

La influencia de la velocidad media en los costes de explotación totales del operador no afecta de la misma manera en todos los casos ni en todos los escenarios, por lo tanto, es necesario realizar un análisis detallado para cada caso. Del escenario analizado se extraen las siguientes conclusiones en relación a la velocidad comercial y tarifa:

a.1) **Efecto de la velocidad en el dimensionamiento del parque móvil**. A medida que aumenta la velocidad, en la mayoría de casos, se reduce el

número de trenes necesarios para atender el servicio, sin embargo, la demanda se incrementa, pues mayor velocidad mayor movilidad en el corredor, pero el hecho de circular más rápido permite al operador hacer mayor uso del material rodante (con un mismo tren puede hacer más servicios).

a.2) **Efecto del precio en el dimensionamiento del parque móvil.** A medida que el precio de billete se incrementa menor número de trenes necesarios. Esto es debido a que la demanda se reduce considerablemente con el incremento del precio y, por lo tanto, el operador necesitaría menos trenes. Es claro que a menor número de trenes menor inversión tendrá que hacer el operador, por lo que, si se centra el análisis sólo y exclusivamente en los costes de inversión en material, las estrategias que debería ofertar el operador son aquellas en la que los precios de billete sean altos e incluso velocidades comerciales no muy elevadas.

a.3) **Efecto de la velocidad en los costes de adquisición**. Se observa claramente que sea cual sea la tipología del tren (longitud y confort) el coste de adquisición se incrementa con la velocidad máxima, debido a que la potencia necesaria del tren se incrementa al incrementarse la velocidad máxima.

Se observa que para trenes de mayor capacidad el coste es más elástico al parámetro velocidad máxima, es decir que el incremento del coste de adquisición debido a aumentos en la velocidad máxima es mayor en trenes de 300 metros de longitud que en trenes de 100 metros. Esto se debe a que la longitud del tren afecta al coeficiente aerodinámico (coeficiente C) de la resistencia al avance, que a su vez influye en el término potencia.

a.4) **Efecto de la velocidad en los costes de mantenimiento del material rodante**. Se ha demostrado una elasticidad negativa entre la velocidad media y los costes de mantenimiento y limpieza, sin embargo, se destaca que esta variación (reducción de costes) no es muy acentuada. En el caso ejemplo se ha obtenido que, si se incrementa la velocidad media, pasando de 220km/h a 280km/h, la reducción de los costes es aproximadamente un 3%.

a.5) **Efecto de la velocidad en los costes de la energía de tracción**. En este caso se observa que el incremento de la velocidad media provoca el aumento de los costes de la energía de tracción. Trenes con mayor velocidad máxima presentan un consumo más elevado, pero también recorren más kilómetros en un año. De acuerdo a lo obtenido se puede afirmar que la combinación de ambos factores supone incrementos pequeños en el coste. Para los casos (trenes) empleados se han obtenido unas elasticidades medias a la variación de la velocidad comercial positivas de 1,035.

a.6) **Efecto de la velocidad en los costes del personal de abordo.** El incremento de la velocidad comercial supone un incremento de los kilómetros recorridos durante las horas de servicio; es decir, se incrementa su productividad. Por lo tanto, el coste por kilómetro que tiene que soportar el operador se ve reducido, pues el personal a bordo tiene una retribución anual independiente de la velocidad.

La elasticidad del coste del personal en relación a la velocidad media obtenida es negativa. De hecho, la influencia de la velocidad en los costes de personal es mayor que en los demás costes de explotación. En el caso ejemplo analizado se obtienen unas reducciones en coste del 23% al pasar de 220km/h a 280km/h (pasando de 0,1222 c€/plaza-kilómetro a 0,0944 c€/plaza-kilómetro).

b) **El efecto del precio en los costes de explotación.** A menor precio de billete y suponiendo resto de parámetros iguales (en este caso la velocidad y capacidad del tren) mayor coste absoluto de explotación (aunque menor coste por viajero). Se produce un incremento en el número de viajeros y, por lo tanto, el operador

necesita mayor número de trenes, más personal, mantenimiento, consumo de energía, etc., es decir, el operador necesita más recursos para atender a los incrementos de demanda.

c) **El efecto de la capacidad del tren en los costes de explotación**. Se observa que el coste de explotación está muy vinculada a este parámetro, ya que influye en el número de trenes necesario por el operador para dar servicio. Si el operador de transporte tiene la intención de reducir al máximo su coste de explotación debería de comprar trenes cuya capacidad está optimizada a la demanda de la ruta.
A mayor capacidad del tren, generalmente, mayor coste de inversión en material rodante, por lo que, el posible ahorro en costes de explotación puede no compensar el incremento en el coste de adquisición.

d) **Efecto de la velocidad en los costes de inversión.** De los resultados obtenidos se destaca que, sea cual sea el tipo de terreno, a medida que se incrementa la velocidad máxima, el coste de inversión aumenta. Este incremento es aproximadamente lineal en todos los casos analizados.
Los mayores incrementos en costes producidos por aumentos en la velocidad máxima (mayores elasticidades) se producen en terrenos semillanos y montañosos, ya que es en este tipo de terrenos dónde un incremento de la velocidad implica un mayor incremento en el porcentaje de túneles. En terrenos muy montañosos el porcentaje de túnel es tan elevado que incrementos en la velocidad no suponen incrementos sustanciales en kilómetros de línea construida bajo túnel.
Se observa también que el coste por kilómetro atribuible a la construcción de una infraestructura ferroviaria en un terreno montañoso puede llegar a ser diez veces mayor que construirla en un terreno llano. Incluso puede llegar a ser casi cinco veces mayor que el coste por kilómetro en un terreno semillano. En cuanto a la diferencia entre el coste por kilómetro, entre construir una infraestructura en un terreno montañoso y hacerlo en un terreno muy montañoso de media se obtiene que es aproximadamente 2,5 veces más caro construirla en un terreno muy montañoso.
El efecto de la velocidad en los diferentes parámetros, elementos y subsistemas que componen la infraestructura se resume a continuación:

d.1) **Efecto de la velocidad en la longitud de línea.** La “sinuosidad” de las líneas ferroviarias, vine condicionada por el radio de curva mínimo que presenta la infraestructura. Puede afirmarse que, a mayor velocidad, menos sinuosa será la línea (más recta) y, por lo tanto, existirá menor distancia entre origen y destino, lo que afectará al coste final de la infraestructura e instalaciones, pues se construirán menos kilómetros de línea.

d.2) **Efecto de la velocidad en el tipo de obra construida y en el coste de inversión**. La velocidad juega un papel fundamental en los costes de construcción de tramos montañosos o muy montañosos e influye claramente en la cantidad y en la longitud de túneles y viaductos a construir. A menor velocidad mayor posibilidad de “escapar” de aquellas zonas con relieves muy accidentados, ya que dispone de radios más pequeños, ofreciendo así la posibilidad de construir una línea más sinuosa que transcurra, por ejemplo, por el cauce de los ríos o que rodee las montañas.
En terrenos llanos, se puede afirmar que para velocidades inferiores a 200km/h, casi no se construyen túneles o son de muy pequeña longitud, mientras que la media de puentes por tramo corresponde a un 0,4% de la longitud total. Para velocidades superiores a 200km/h, los porcentajes aumentan en muy pequeña proporción.
En terrenos semillanos, en comparación con el terreno llano, se produce un incremento tanto en el porcentaje de túnel como en el de viaductos. Además, al igual que en el caso anterior la velocidad influye claramente en el porcentaje de obra, (a mayor velocidad mayor porcentaje de túnel y viaducto). Este efecto se resume en:

- Para velocidades menores o iguales a 200km/h, en España de media se ha construido entre un 0,1% y un 4,5% de túnel (sobre la longitud total del tramo) y de máximo un 1,8% de puentes y/o viaductos.
- Para velocidades superiores a 200km/h, se ha construido entre un 1,6% y 8,3% de túnel y entre 3,1% y 5,4% de puentes y/o viaductos.

En terrenos montañosos el porcentaje de túnel construido sobre el total de línea se incrementa considerablemente si se compara con el obtenido en terrenos llanos y semillanos. Además, este porcentaje, tanto de túnel como de viaducto, aumenta considerablemente con el incremento de la velocidad. Por último, en terrenos muy montañosos la cantidad de obra de fábrica y túnel construida se dispara en este tipo de tramos, sobretodo en el caso de líneas de alta velocidad. De los resultados se puede destacar que para:

- Velocidades inferiores a 120km/h se construye en torno a un 25,6% de túnel (entre un 16% y 38,3%) y un 1,8% de puentes (entre un 0,1% y 5,8%).
- Para velocidades mayores o iguales a 350km/h, el porcentaje de túnel construido esta en torno al 85,7% y de viaducto al 5,7%.

d.3) **Efecto de la velocidad y la rampa máxima**. Velocidades elevadas implican trenes con elevadas potencias, cuanta mayor sea la potencia de un tren mayor será la capacidad de éste para subir rampas. Además, elevadas rampas (que pueden admitirse con potentes trenes de alta velocidad) permiten un mayor ajuste del trazado al relieve (orografía) y, por lo tanto, se reduce la necesidad de túneles y viaductos, lo que en definitiva supone una clara reducción de los costes de inversión.

d.4) **Efecto de la velocidad y la sección de túnel**. Cuanto mayor es la sección libre que existe entre túnel y tren, menor es la resistencia al avance en túnel y, por lo tanto, menor es la diferencia de presiones sufrida por los viajeros. Así pues, es imprescindible aumentar la sección de los túneles para poder circular a elevadas velocidades, lo que supone un incremento en la inversión.

d.5) **Efecto de la velocidad y el ancho de la plataforma**. A mayor velocidad, mayor distancia entre ejes, lo que incrementa el ancho de plataforma. Al incrementar el ancho de plataforma se incrementa el coste de inversión en la subestructura.

d.6) **Efecto de la velocidad en el montaje de vía.** A mayor velocidad mayor espesor de la capa de balasto bajo traviesa lo que supone un incremento en el coste. Además, la velocidad también afecta a la tipología de desvíos empleada, mayor velocidad implica la instalación de desvíos de punta móvil, lo que incrementa el coste sustancialmente.

Los resultados obtenidos muestran que diseñar una infraestructura para velocidades superiores a 350km/h, implica casi duplicar el coste asociado al montaje y suministro de vía, si la comparación se realiza con el coste acometido para velocidades por debajo de 200km/h (se pasa de un coste de aproximadamente de 0,8M€/km a un coste de 1,3M€/km para velocidades de 350km/h).

También se destaca de los resultados que el incremento en costes no es constante ni lineal, pues lo que se observa es que el incremento se produce a tramos, es decir, al alcanzar determinadas velocidades máximas el coste por kilómetro sufre un aumento considerable. Esto es debido a que el coste de montaje y suministro de desvíos es función de la tecnología implantada y ésta es función de la velocidad máxima de diseño.

Por último, si se deja a un lado la influencia de la tecnología de desvíos en el coste de montaje de vía, se observa que la influencia de la velocidad en el coste de inversión es pequeña, es decir, un incremento de la velocidad no supone un gran incremento del coste, ya que influye solamente en el ancho y en el espesor de la capa de balasto, características que varían poco con la velocidad máxima.

d.7) **Efecto de la velocidad y coste de electrificación.** Entre otros efectos producidos por la velocidad máxima en el coste de la electrificación, puede destacarse que, a mayor velocidad máxima, mayor potencia de los trenes que circularán por la vía y, por tanto, la potencia de las subestaciones y los centros de autotransformación también será mayor (mayor potencia de los transformadores), incrementándose la corriente (intensidad) que circula por el cable. Al incrementarse la corriente, es necesario emplear cables con mayor sección.
Ya sea por el aumento de potencia de los transformadores o por el aumento de sección de los cables o por ambas causas, el coste se incrementa.
Los resultados obtenidos muestran que el coste se incrementa linealmente con la velocidad máxima de diseño. Los valores están dentro de un rango con límite inferior de 0,5M€/km para 200km/h y límite superior de 0,63M€/km para 500km/h, destacándose también que el coste de electrificación para velocidades máximas de 350km/h es de aproximadamente de 0,6M€/km.

d.8) **Efecto de la velocidad y costes de señalización.** La influencia de la velocidad máxima reside básicamente en la tecnología instalada, tanto a bordo como en tierra. A mayor velocidad, los sistemas tanto de comunicación como de señalización deben de ser tecnológicamente más avanzados, pues los requerimientos de seguridad son mayores, lo que implica un mayor coste de inversión.

6.4 RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD Y LA RENTABILIDAD SOCIO-ECONÓMICA Y LA RENTABILIDAD FINANCIERA

a) **Efecto de la velocidad comercial y la rentabilidad socio-económica.** A medida que se aumenta la velocidad comercial se incrementa la rentabilidad socio-económica del proyecto. Este incremento se produce hasta alcanzar una determinada velocidad media a partir de la cual la rentabilidad socio-económica del proyecto empieza a disminuir.
Esto tiene una explicación sencilla pues es a partir de este punto donde los costes del proyecto se incrementan en mayor medida que los beneficios generados. En el caso analizado, se observa que a partir de los 330km/h un cambio en la velocidad supone un incremento elevado de los costes de inversión. Además, este efecto se combina con el cambio de elasticidad sufrido en la demanda a elevadas velocidades medias (menor elasticidad). Estos dos efectos combinados provocan que la curva de rentabilidad socio-económica llegue al punto de inflexión (velocidad óptima), a partir del cual los ahorros en costes externos y en tiempos de viaje empiezan a ser menores que los incrementos en costes de inversión y, por lo tanto, empieza a disminuir la rentabilidad económica.

b) **Efecto de la velocidad comercial y la rentabilidad financiera.** La influencia de la velocidad comercial en la rentabilidad financiera es ligeramente diferente a la observada en la rentabilidad económica del proyecto. Se observa un incremento de la rentabilidad financiera con el incremento de la velocidad en todos los casos (tarifas), pero al igual que en el caso de la rentabilidad socio-económica, alcanzada una determinada velocidad comercial se produce un cambio de tendencia y la rentabilidad financiera comienza a decrecer con el incremento de la velocidad. Aunque la influencia de la velocidad en la rentabilidad financiera es parecida al efecto que provoca la velocidad en la rentabilidad socio-económica, se observa que el óptimo financiero se obtiene a velocidades comerciales mucho menores que él óptimo socio-económico.
Esto es debido a la relación entre la curva de ingresos y la curva de ahorros en costes externos y tiempos de viajes, los resultados muestran claramente que, en la mayoría de los casos, los beneficios son mayores que los ingresos y que la elasticidad de los beneficios a la velocidad es mayor a la elasticidad de los ingresos, por lo que el óptimo financiero debe aparecer a una velocidad inferior

al óptimo económico. Los incrementos en costes son mayores que los incrementos en ingresos a velocidades comerciales más bajas que en el caso de la rentabilidad económica.

c) **Efecto de la tarifa en la rentabilidad económica.** La rentabilidad socio-económica se reduce con el incremento en la tarifa. A medida que se incrementa la tarifa se produce una reducción en los ahorros en costes externos, sin embargo, el coste de inversión es el mismo independientemente de la tarifa, lo que implica una reducción de la rentabilidad social del proyecto.

d) **Efecto de la velocidad máxima y la rentabilidad socio-económica.** Los escenarios con mayor rentabilidad socio-económica son aquellos en los que se selecciona la velocidad máxima de diseño más alta en los subtramos llanos, es decir, los resultados muestran que los escenarios con mayor rentabilidad económica, sea cual sea la velocidad media, son aquellos en los que se construye a mayores velocidades máximas los subtramos llanos, después en los subtramos semillanos, a continuación, los subtramos montañosos y por último en subtramos muy montañosos.

   Además, se muestra claramente que los peores escenarios son en los que las velocidades máximas más altas se seleccionan para los subtramos muy montañosos y montañosos y las velocidades máximas más bajas se seleccionan para los subtramos llanos.

   En definitiva, si el planificador debe elegir donde construir la línea a mayor velocidad máxima, éste debe hacerlo en este orden: primero debería seleccionar el trazado que atraviesa un terreno llano, después si se precisa subir la velocidad se elegiría la parte del trazado que atraviesa un terreno semillano, después se seleccionaría el terreno montañoso y en último caso se debería elegir subir la velocidad máxima en trazados muy montañosos. Cualquier otra combinación de velocidades máximas reduciría la rentabilidad del proyecto.

7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Durante el desarrollo y elaboración de la tesis han surgido determinados temas de actualidad, de los que se ha identificado escasa investigación previa, que pueden ser ámbito de futuros estudios, pues un análisis en profundidad de los mismos podría ampliar y enriquecer los resultados alcanzados o incluso dar lugar a nuevos desarrollos que ayuden a abrir nuevos campos de investigación relacionados con el transporte.

Los temas que se suponen más enriquecedores al trabajo realizado son los siguientes:

- **La relación entre el precio de billete y la rentabilidad financiera de un proyecto ferroviario**. La elección de la tarifa (precio de billete) que maximice la rentabilidad financiera debería ser imprescindible en todo análisis previo, pues ayudaría así al planificador a optimizar los recursos disponibles (mejorar el aprovechamiento).
  Se ha observado que el precio del billete influye decisivamente en los ingresos que esté obtendrá, pues tiene una influencia clara en la demanda. Se ha destacado también cómo existe un precio en el que se maximiza el ingreso; por debajo o por encima del cual no se consiguen mejores resultados en términos económicos para el operador.
  Además, se ha identificado una estrecha relación entre el precio y los costes de explotación. La tarifa influye en el dimensionamiento del parque que el operador debe realizar para atender la demanda prevista. Bajos precios suponen elevadas demanda y, por lo tanto, el operador necesita mayor número de trenes, más personal, mantenimiento, consumo de energía, etc., para dar un servicio eficiente, lo que implica un mayor coste.
  Por ello, se entiende que la determinación de la tarifa debería surgir tras un proceso de optimización que tratase de maximizar los ingresos y reducir los costes atribuibles al operador, lo que supondría una mejora en la rentabilidad financiera.
- **Relación entre la capacidad de los trenes y la rentabilidad socio-económica.** Se observa que el coste de explotación está muy vinculada a las características que tenga el tren (capacidad), ya que influye en el número de trenes necesario por el operador para dar un servicio eficiente.
  Si el operador dispone de trenes con mayor capacidad puede atender la demanda con un menor número y, por lo tanto, reducir su coste de inversión en material rodante. Sin embargo, a mayor capacidad del tren, generalmente, mayor coste de inversión en material rodante por lo que, el posible ahorro en costes de explotación puede no compensar el incremento en el coste de adquisición.
  Como se observa la elección de la capacidad óptima es una cuestión complicada y que debe ser ámbito de futuros análisis, ya que una capacidad óptima del material rodante ayudaría al diseño de la oferta de transporte optimizando los recursos disponibles (mejorar el aprovechamiento), así como mejoraría los resultados socio-económicos.

8. BIBLIOGRAFÍA

Adif. (2007). Principales ratios de costes por kilómetro. (Tech. Rep).

Adif. (2011). Manual para la evaluación de inversiones de ferrocarril. (Tech. Rep).

Atkins. (2002). High Speed line study - milestone 8 cost model report. (Tech. Rep). Ws Atkins Consultants.

Barcenilla Torres, Z. (2010). Cálculo mecánico de la catenaria de la línea de alta velocidad Madrid-Galicia. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III. Madrid.

Baron, T., Tuchschmid, M., Martinetti, G., & Pépion, D. (2011). High Speed Rail and Sustainability. Background report: Methodology and results of carbon footprint analysis. (Tech. Rep). International Union of Railways (UIC). Paris, 2011.

Barrón de Angoiti, I. (2013). Tecnología ferroviaria española. Una perspectiva internacional. Real Academia De La Ingeniería. Madrid, 19 de marzo 2013.

Baumgartner, J. P. (2001). Prices and costs in the railway sector. (Tech. Rep). Laboratoire d'Intermodalité des Transports et de Planification, Laussanne.

Betancor, O., & Llobet, G. (2015). Contabilidad financiera y social de la alta velocidad en españa. (No. 2015-08). FEDEA, Estudios sobre economía española, Madrid, marzo de 2015.

Börjesson, M. (2012). Inter-temporal variation in the travel time and travel cost parameters of transport models. Working Papers in Transport Economics, 2012:16

Burge, P., Woo Kim, C., & Rohr C. (2011). Modelling demand for long-distance travel in Great Britain: Stated Preference Surveys to support the modelling of demand for high-speed rail. RAND Corporation (Ed.).

Cabanes Martín, A., & González Sanz, R. (2009). El tiempo del tren: Las velocidades comerciales en las líneas españolas desde sus orígenes hasta la actualidad. V Congreso Historia Ferroviaria. Palma, 14-16 octubre 2009.

Campos, J., De Rus, G., & Barrón, I. (2009). The cost of building and operating a new high speed rail line. Economic análysis of high speed rail in Europe. Bilbao: Fundación BBVA: Editorial Biblioteca Nueva, S, L.

Cascetta, E., & Coppola, P. (2011). High Speed Rail demand: empirical and modelling evidences from Italy. Proceeding of European Transport Conference 2011. Glasgow, UK.

CE Delft, Infras, Fraunhofer ISI. (2011). External cost of transport in europe. (Tech. Rep).

CENIT. (2008). SP5-5.1: Análisis de los costes de inversión asociados a cada sistema de vía. (Tech. Rep). CENIT (Centro de Innovación del Transporte).

Compte, A., & Crespo, L. (2015). Recomendaciones para la estimación de las emisiones de GEI en la evaluación ambiental de planes y proyectos de transporte. (Tech. Rep). CEDEX (Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas).

Crozet, Y. (2007). Infrastructure charging within the french railways sector: A new challenge. 11th World Conference on Transport Research, Berkeley, 24 Junio 2007.

Daly, A. J., & Ortúzar, J. d. D. (1990). Forecasting and data aggregation: Theory and practice. Traffic Engineering & Control., 31(12), 632-643.

De Rus, G. (2001). Análisis coste-beneficio. Barcelona: Ariel Economía.

De Rus, G. (2012). Economic evaluation of the high speed rail. (Tech. Rep). Sweden: Expert Group on Environmental. Minitry of Finance.

De Rus, G., & Nash, C. (2009). ¿En qué circunstancias está justificado invertir en líneas de alta velocidad ferroviaria? (Working Paper). Fundacion BBVA.

Escolano Paul, J. (1998). La "vía en placa" en la DB AG. Revista De Obras Públicas, 3382, 31-34.

European Commision. (2008). Cost-Benefit Analysis of Transport Investment Projects. Structural Funds, Cohesion Fund and Instrument for Pre-Accession. Brussels, july 2008.

European Commission. (2014). Cost-Benefit Analysis of Investment Projects: Economic Appraisal Tool for Cohesion Policy 2014-2020. Brussels, diciembre 2014.

Fairburn, J., & Prof Pugh, G. (2006). An assessment of the carbon footprint of the M6 toll motorway in the UK. (Tech. Rep). Institute for Enviromental Sustainability and Regeneration, Staffordshire University.

Fernández Arévalo, F. J. (2013). Bases económicas para la regulación del canon por el uso de la infraestructura ferroviaria. Madrid: Aula de Formación Ferroviaria de la Fundación de Ferrocarriles Españoles. 13-14 Marzo 2013.

Fernández Arévalo, F. J., & Vázquez, J. (2012). Costes de las líneas de alta velocidad internalizados en la contabilidad del administrador de la infraestructura. 360.ave.Revista De Alta Velocidad, 2, 5-22.

Fernández Jáñez, J. (2012). Análisis de la cuota captable por el tren de alta velocidad al avión en españa. Proyecto Optired. (Tech. Rep). Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid.

Fernández Jáñez, J. (2015). Una visión actualizada de la competencia entre el tren de alta velocidad y el avión. 360.AVE.Revista de Alta Velocidad, 3, 17-29.

Fröidh, O. (2012). HSLdim: Demand, cost and benefit calculations. (Tech. Rep). KTH Architecture and the Built Environment.

Fröidh, O. (2014). Design speed for new high-speed lines. Journal of Rail Transport Planning & Management, 4(3), 59-69.

doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jrtpm.2014.09.002

Fundación de los Ferrocarriles Españoles. (2008). Plan de explotación de la línea de alta velocidad Madrid-Levante (LAV de Levante). (Tech. Rep). Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Madrid, Julio 2008.

Fundación de los Ferrocarriles Españoles. (2012). Observatorio del ferrocarril en españa: Informe 2011. (Tech. Rep). Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Madrid. doi: http://www.observatorioferrocarril.es/informes_ofe.php

García Álvarez, A. (1986). La velocidad. (Tech. Rep). Gire Renfe, Madrid.

García Álvarez, A. (2008). La demanda en el transporte de viajeros. Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios. Asignatura: Regulación y Economía del Sector Ferroviario, Madrid.

García Álvarez, A. (2010a). Modelo multipropósito de estimación de los consumos de energía y emisiones en el transporte. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid.

García Álvarez, A. (2010b). Relationship between rail service operating costs and speed. 2010 Highspeed, Beiging, China. , II 959-973.

García Álvarez, A. (2010c). Relationship between rail service operating direct costs and speed. (Tech. Rep). Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Union International des Chemis de Fer (UIC).

García Álvarez, A. (Ed.). (2011a). Costes Operativos de los servicios de transporte de viajeros por ferrocarril: Parte I. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

García Álvarez, A. (2011b). Dinámica de los trenes en alta velocidad. (8ª edición ed.). Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

García Álvarez, A. (2011c). Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril. (3ª ed.). Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

García Álvarez, A. (2012). Contribución al estudio del efecto de la alta velocidad en el consumo de energía y en los costes de explotación del ferrocarril. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

García Álvarez, A., Barrón de Angoiti, I., Puente Domínguez, F., & Martín Cañizares. Mª.P. (2009). Alta Velocidad en España, líneas y trenes. Colección monografías Vía Libre (1). Introducción a la alta velocidad ferroviaria en España. (1ª ed.). Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

García Álvarez, A., & et al. (2012). Operación de trenes de viajeros: claves para la gestión avanzada del ferrocarril. (2ª ed.). Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

García Álvarez, A., & Fernández Arévalo, F. J. (2011). El canon por el uso de la infraestructura ferroviaria. Madrid: Aula de Formación de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 18-19 marzo 2011.

García Álvarez, A., González Franco, I., & Rubio García, A. (2015). El efecto perverso de la predeterminación de la tarifa en el Análisis Coste Beneficio de las nuevas infraestructuras de alta velocidad. 360.ave.Revista De Alta Velocidad, 3, 3-16.

García Mateo, J. L., Jiménez Vega, M., & Cuéllar Villar, D. (2004). Inventario de puentes ferroviarios de españa. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid: Ediciones Doce Calles.

Goh, C. J., Chew, E. P., & Fwa, T. F. (1988). Discrete and continuous models for computation of optimal vertical highway alignment. Transportation Research Part B: Methodological, 22B(6), 399-409. doi:10.1016/0191-2615(88)90021-5

González Franco, I., García-Álvarez, A., & Pérez-Martínez, P. J. (2012). Energy consumption and carbon dioxide emissions in rail and road freight transport in spain: A case study of car carriers and bulk petrochemicals. Journal of Intelligent Transportation Systems, doi:10.1080/15472450.2012.719456

HEATCO. (2004). Developing harmonised european approaches for transport costing and project assessment. sixt framework programme, priority SSP 3.2: The development of tools, indicators and operational parameters for assessing sustainable transport and energy systems performance (economic, enviromental and social) . (Tech. Rep). IER, Germany. doi:http//heatco.ier.uni-stuttgart.de;

Hidalgo González, I. (2005). Introducción a los modelos de sistemas energéticos, económicos y medioambientáles: Descripción y aplicaciones del modelo poles. Revista De Economía Mundial, 13, 33-75.

INFRAS/IWW. (2004). External costs of transport: Update study. (Tech. Rep). Universitaet Karlsruhe, Zürich/Karlsruhe.

Kang, M., Jha, M., & Buddharaju, R. (2012). A rail transit route optimization model for rail infrastructure planning and design: Case study of Saint Andrews, Scotland. Journal of Transportation Engineering, 140(1), 1-11.

Kottenhoff, K. (2003). Evaluation of passenger train concepts: Practical methods for measuring traveller's preferences in relation to costs. KTH- Journal of Royal Institute of Tecnology, 1-23.

Lee, Y., & Cheng, J. (2001). Optimizing highway grades to minimize cost and maintain traffic speed. Journal of Transportation Engineering, 127(4), 303-310.

Lichtberger, B. (2005). Track compendium: Formation, permanent way, maintenance, economics. Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. KG, Hamburg, Germany.

Linkerhägner, M. (1985). Paramètres des lignes nouvelles et leur optimisation sous des aspects micro-économiques. Les Aspects Socio-Économiques Des Trains à Grand Vitesse. Paris. 60-81.

López Fernández, C. (2012). Planificación, proyecto y construcción de túneles de gran longitud. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

López Pita, A. (2007). De la planificación a la explotación de líneas de alta velocidad en Europa: La experienza diponible. XXI Congreso Panamericano De Ferrocarriles. Buenos Aires. Argentina. 30 Agosto-4 Septiembre.

López Pita, A. (1999). La ingeniería civil española en el siglo XX: Los ferrocarriles. OP: Ingeniería Y Territorio: Revista Del Colegio De Ingenieros De Caminos, Canales Y Puertos, II(49), 26-31.

López Pita, A. (2006). Infraestructuras ferroviarias. Barcelona: Ediciones UPC.

López Pita, A. (2008). Explotación de líneas de ferrocarril. Barcelona: Ediciones UPC.

López Pita, A. (2010). Alta velocidad en el ferrocarril. Barcelona: Ediciones UPC.

Malo Gaona, J. A. (1991). La adopción de rampas máximas en línieas de alta velocidad: Aplicación a la orografia española. Barcelona: Universidad Politecnica de Cataluña.

Malo Gaona, J. A. (1992). Adopción de rampas máximas en alta velocidad: Aplicación en tres alternativas de paso por el sistema ibérico. O.P. Obra Pública, 24, 18.

MCRIT SL. (2012). Aproximación a la cuantificación del volumen de mercado de transporte en las rutas nacionales de media y larga distancia y estimación de la posible participación del ferrocarril en función del tiempo de viaje, la frecuencia y el precio. (Tech. Rep). Barcelona.

MCRIT SL. (2013). Estudio para la cuantificación del mercado potencialmente captable por nuevas rutas AVE, y análisis de sensibilidad a tarifas y tiempos de viaje del marcado captable por las rutas existentes y nuevas. (Tech. Rep). Barcelona.

Melis Maynar, M., Jiménez Vega, M., & Cuéllar Villar, D. (2004). Inventario de túneles ferroviarios de españa. Madrid: Doce Calles Editorial.

Miarnau Montserrat, J., & López Pita, A. (1999). La via en placa como alternativa a la via sobre balasto en líneas de alta velocidad. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona.

Minayo de la Cruz, F., & García Álvarez, A. (2009). Relación entre la alta velocidad ferroviaria y los costes operativos no energéticos. Monográfico: La importancia de la velocidad en el ferrocarril., 145-163.

Ministerio de Fomento. (2013). Observatorio del transporte de viajeros por carretera. Concesiones de la Administración General del Estado

Mohring, H. (1972). Optimization and scale economics in urban bus transportation. American Economic Review, 62(4), 591-604.

Mourabit Fossas, O. (2003). La velocidad óptima del sistema rueda-carril. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Infraestructura del Transport i Territori.).

Network Rail. (2009). Comparing environmental impact of conventional and high speed rail. (Tech. Rep). New Lines Programe.

doi:http://www.networkrail.co.uk/aspx/5892.aspx

Ortúzar, J. d. D., & Willumsen, L. G. (2011). Modelling transport. Oxford: Wiley-Blackwell.

Pilo de la Fuente, E. (2003). Diseño óptimo de la electrificación de alta velocidad. Universidad Pontificia de Comillas. Madrid.

Pilo de la Fuente, E., & Pérez Arriaga, J. I. (2009). Flujos de la energía de la electricidad para el transporte. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Puertas Herranz, J. (2011). Estimación de coste y plazo de ejecución en proyectos de túneles ejecutados mediante excavación convencional y voladura. doi:http://hdl.handle.net/2099.1/12036;

Puig Gimeno, C. (2009). Previsiones de tráfico para los servicios regionales por ferrocarril de altas prestaciones. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Quandel Consultants, L. (2011). Cost estimating methodology for high speed rail on shared right-of way. Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN.

Roanes-Lozano, E., González Franco, I., Hernando, A., García Álvarez, A., & Mesa, L. E. (2013). Calculating the exploitation costs of trains in the spanish railways. Computing in Science & Engineering, 15(3), 89-95.

doi:http://dx.doi.org/10.1109/MCSE.2013.54

Sánchez Borrás, M. (2009). Impact of rail infrastructure charging systems implemented in europe on the competitiveness of high speed services Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

doi:http://hdl.handle.net/10803/30725;http://hdl.handle.net/10803/30725;

Sener. (2007). Actualización del estudio de determinación de la capacidad de autofinanciación en la construcción y explotación de la línea de alta velocidad madrid-castilla la mancha-comunidad valenciana-región de murcia. (Tech. Rep). Adif.

Stalder, O. (2002). International benchmarking of track cost. (Tech. Rep). UIC (International Union of Railways). Paris.

Steer Davies. (2004). High speed rail: International comparisons. (Tech. Rep). Commission for Integrated Transport. London 2004.

Subhash, S., & Verma, Y. (2007). Case studies-high speed rail system (>250 KMPH). (Tech. Rep).

Teixeira, P. F., & López Pita, A. (2012). INFRACHARGES: UIC study on railway infrastructure charges in europe. final report. (Tech. Rep). UIC (International Union of Railways). Noviembre 2012.

Tifsa. (1999). Análisis técnico-económico para la definición tecnológica del equipamiento de la vía para la línea de alta velocidad Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera Francesa (tramo Madrid-Lleida). (Tech. Rep). Madrid.

UIC. (1999). UIC-couts des lignes nouvelles a grande vitesse. (Tech. Rep). UIC (International Union of Railways), Paris.

UIC. (2015). Technology evolution in passenger transport. (Tech. Rep). UIC (International Union of Railways), Paris.

Wilson, A. G. (1974). Urban and regional models in geography and planning John Wiley & Sons Ltd Chichester.

Yousefi Mojir, K. (2011). A computacional model for optimal dimensional speed on new high-speed lines.

doi:http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:432728/FULLTEXT01.pdf

ANEJOS

ANEJO 1: OFERTA DE SERVICIOS EN EL CORREDOR DE LEVANTE 331

ANEJO 2: DEMANDA DE VIAJEROS EN EL CORREDOR DE LEVANTE ... 335

ANEJO 3: COSTE GENERALIZADO EN EL CORREDOR DE LEVANTE..... 341

ANEJO 4: VELOCIDAD MÁXIMA Y SU RELACIÓN CON EL RADIO DE CURVA 347

ANEJO 5: PORCENTAJE DE TÚNEL, VIADUCTO Y MOVIMIENTO DE TIERRAS EN LA RED FERROVIARIA ESPAÑOLA..... 353

ANEJO 6: DEMANDAS MENSUALES CORREDOR DE LEVANTE 359

ANEJO 7: CARACTERÍSTICAS Y COSTES DE DIFERENTES LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD 361

ANEJO 8: TABLAS Y FIGURAS..... 363

ANEJO 1: OFERTA DE SERVICIOS EN EL CORREDOR DE LEVANTE

Oferta de servicios de transporte de viajeros por carretera

El tiempo de recorrido por carretera, así como las longitudes de todas las relaciones origen destino empleadas en el caso ejemplo, se han obtenido de la página web de ViaMichelin. Han sido recogidos también los costes operativos de cada una de las rutas. La tabla que se expone a continuación (Tabla 131) muestra los datos ordenados por rutas.

Tabla 131: Kilómetros de recorrido y tiempos para el modo de carretera en los diferentes trayectos del corredor de Levante.

Origen	Destino	Distancia	T. de viaje	Costes Operativos (Cop)	Origen	Destino	Distancia	T. de viaje	Costes Operativos (Cop)
		km	h	c€/km			km	h	c€/km
ALBACETE	ALICANTE/ALACANT	168	2,05	0,12	CUENCA	ALBACETE	144	2,30	0,11
ALBACETE	ALMERÍA	358	3,97	0,11	CUENCA	ALICANTE/ALACANT	309	4,05	0,11
ALBACETE	BARCELONA	509	6,17	0,19	CUENCA	ALMERÍA	499	5,97	0,11
ALBACETE	CASTELLÓN	232	3,32	0,13	CUENCA	BARCELONA	539	6,30	0,19
ALBACETE	CUENCA	162	2,15	0,11	CUENCA	CASTELLÓN	263	3,45	0,13
ALBACETE	MADRID	254	2,92	0,12	CUENCA	MADRID	166	1,97	0,12
ALBACETE	MURCIA	147	1,72	0,12	CUENCA	MURCIA	288	3,72	0,11
ALBACETE	TARRAGONA	417	4,97	0,17	CUENCA	TARRAGONA	448	5,10	0,16
ALBACETE	VALENCIA	187	2,27	0,12	CUENCA	VALENCIA	200	2,78	0,11
ALICANTE/ALACANT	ALBACETE	169	2,02	0,12	MADRID	ALBACETE	254	2,92	0,12
ALICANTE/ALACANT	ALMERÍA	295	3,38	0,12	MADRID	ALICANTE/ALACANT	420	4,67	0,11
ALICANTE/ALACANT	BARCELONA	525	5,98	0,19	MADRID	ALMERÍA	545	6,18	0,11
ALICANTE/ALACANT	CASTELLÓN	248	3,13	0,14	MADRID	BARCELONA	620	6,95	0,16
ALICANTE/ALACANT	CUENCA	308	4,03	0,11	MADRID	CASTELLÓN	419	4,70	0,12
ALICANTE/ALACANT	MADRID	420	4,68	0,11	MADRID	CUENCA	166	1,95	0,12
ALICANTE/ALACANT	MURCIA	84	1,13	0,12	MADRID	MURCIA	399	4,33	0,11
ALICANTE/ALACANT	TARRAGONA	433	4,78	0,17	MADRID	TARRAGONA	545	6,03	0,15
ALICANTE/ALACANT	VALENCIA	170	2,23	0,13	MADRID	VALENCIA	355	4,05	0,11
ALMERÍA	ALBACETE	361	3,95	0,11	MURCIA	ALBACETE	148	1,70	0,12
ALMERÍA	ALICANTE/ALACANT	295	3,37	0,12	MURCIA	ALICANTE/ALACANT	82	1,12	0,12
ALMERÍA	BARCELONA	796	8,73	0,16	MURCIA	ALMERÍA	223	2,53	0,12
ALMERÍA	CASTELLÓN	520	5,88	0,12	MURCIA	BARCELONA	584	6,48	0,18
ALMERÍA	CUENCA	500	5,97	0,11	MURCIA	CASTELLÓN	307	3,63	0,13
ALMERÍA	MADRID	544	6,22	0,11	MURCIA	CUENCA	287	3,70	0,11
ALMERÍA	MURCIA	224	2,52	0,12	MURCIA	MADRID	399	4,35	0,11
ALMERÍA	TARRAGONA	705	7,55	0,15	MURCIA	TARRAGONA	492	5,28	0,16
ALMERÍA	VALENCIA	442	4,98	0,11	MURCIA	VALENCIA	229	2,73	0,12
BARCELONA	ALBACETE	512	6,20	0,19	TARRAGONA	ALBACETE	419	5,02	0,17
BARCELONA	ALICANTE/ALACANT	528	6,02	0,19	TARRAGONA	ALICANTE/ALACANT	435	4,83	0,17
BARCELONA	ALMERÍA	800	8,80	0,16	TARRAGONA	ALMERÍA	706	7,62	0,15
BARCELONA	CASTELLÓN	280	3,28	0,24	TARRAGONA	BARCELONA	95	1,37	0,25
BARCELONA	CUENCA	541	6,28	0,19	TARRAGONA	CASTELLÓN	187	2,10	0,20
BARCELONA	MADRID	621	6,87	0,16	TARRAGONA	CUENCA	448	5,10	0,16
BARCELONA	MURCIA	589	6,53	0,18	TARRAGONA	MADRID	545	6,03	0,15
BARCELONA	TARRAGONA	99	1,40	0,25	TARRAGONA	MURCIA	495	5,35	0,16
BARCELONA	VALENCIA	351	4,07	0,23	TARRAGONA	VALENCIA	258	2,88	0,20
CASTELLÓN	ALBACETE	233	3,35	0,15	VALENCIA	ALBACETE	187	2,22	0,12
CASTELLÓN	ALICANTE/ALACANT	249	3,15	0,14	VALENCIA	ALICANTE/ALACANT	170	2,22	0,13
CASTELLÓN	ALMERÍA	521	5,93	0,12	VALENCIA	ALMERÍA	442	5,00	0,12
CASTELLÓN	BARCELONA	278	3,30	0,24	VALENCIA	BARCELONA	349	4,05	0,23
CASTELLÓN	CUENCA	262	3,42	0,13	VALENCIA	CASTELLÓN	72	1,20	0,19
CASTELLÓN	MADRID	418	4,72	0,12	VALENCIA	CUENCA	199	2,75	0,11
CASTELLÓN	MURCIA	310	3,68	0,13	VALENCIA	MADRID	355	4,05	0,11
CASTELLÓN	TARRAGONA	186	2,10	0,21	VALENCIA	MURCIA	231	2,75	0,12
CASTELLÓN	VALENCIA	72	1,20	0,20	VALENCIA	TARRAGONA	257	2,87	0,21

Nota: Tiempo medido en horas; distancia en kilómetros; costes operativos c€/km

Fuente: Vía Michelin.

El tiempo de viaje aquí mostrado representa el tiempo estimado, pero debe tenerse en cuenta que el tiempo real está sujeto a una cierta variabilidad. Factores como la congestión (mayoritariamente en grandes núcleos de población como Madrid, Barcelona o Valencia) o la elección del recorrido influyen en esta variabilidad.

En el caso del autobús la distancia entre origen y destino es la misma en todas las relaciones que la del vehículo privado ya que se considera que hacen el mismo recorrido.

En cuanto al tiempo de viaje, se supone un 30 % mayor que el del modo vehículo privado, dato que está en línea con la diferencia de velocidades máximas que presentan ambos modos de transporte.

También es preciso determinar las frecuencias diarias que posteriormente se emplearán en el cálculo del tiempo de espera. Para ello se ha contado con la base de datos del estudio realizado por Sener en el año 2007, la cual ha sido contrastada con la base de datos del estudio (MCRIT SL, 2012).

A continuación se muestra la tabla resumen (Tabla 132) con la oferta de servicios en cada uno de los trayectos considerados para el modo autobús.

Tabla 132: Distancias, tiempos de viaje y frecuencias del autobús en los diferentes trayectos del corredor de Levante.

Origen	Destino	Distancia	T. de viaje	Frecuencias	Origen	Destino	Distancia	T. de viaje	Frecuencias
		km	*h*	diarias			*km*	*h*	diarias
ALBACETE	ALICANTE/ALACANT	168	2,67	18	CUENCA	ALBACETE	144	2,99	-
ALBACETE	ALMERÍA	358	5,16	-	CUENCA	ALICANTE/ALACANT	309	5,27	2
ALBACETE	BARCELONA	509	8,02	5	CUENCA	ALMERÍA	499	7,76	-
ALBACETE	CASTELLÓN	232	4,31	18	CUENCA	BARCELONA	539	8,19	4
ALBACETE	CUENCA	162	2,80	11	CUENCA	CASTELLÓN	263	4,49	4
ALBACETE	MADRID	254	3,79	6	CUENCA	MADRID	166	2,56	10
ALBACETE	MURCIA	147	2,23	24	CUENCA	MURCIA	288	4,83	4
ALBACETE	TARRAGONA	417	6,46	5	CUENCA	TARRAGONA	448	6,63	1
ALBACETE	VALENCIA	187	2,95	12	CUENCA	VALENCIA	200	3,62	4
ALICANTE/ALACANT	ALBACETE	169	2,62	2	MADRID	ALBACETE	254	3,79	6
ALICANTE/ALACANT	ALMERÍA	295	4,40	5	MADRID	ALICANTE/ALACANT	420	6,07	8
ALICANTE/ALACANT	BARCELONA	525	7,78	14	MADRID	ALMERÍA	545	8,04	10
ALICANTE/ALACANT	CASTELLÓN	248	4,07	15	MADRID	BARCELONA	620	9,04	20
ALICANTE/ALACANT	CUENCA	308	5,24	-	MADRID	CASTELLÓN	419	6,11	6
ALICANTE/ALACANT	MADRID	420	6,09	8	MADRID	CUENCA	166	2,54	10
ALICANTE/ALACANT	MURCIA	84	1,47	22	MADRID	MURCIA	399	5,63	23
ALICANTE/ALACANT	TARRAGONA	433	6,22	11	MADRID	TARRAGONA	545	7,84	10
ALICANTE/ALACANT	VALENCIA	170	2,90	25	MADRID	VALENCIA	355	5,27	10
ALMERÍA	ALBACETE	361	5,14	0	MURCIA	ALBACETE	148	2,21	8
ALMERÍA	ALICANTE/ALACANT	295	4,38	7	MURCIA	ALICANTE/ALACANT	82	1,45	19
ALMERÍA	BARCELONA	796	11,35	5	MURCIA	ALMERÍA	223	3,29	7
ALMERÍA	CASTELLÓN	520	7,65	5	MURCIA	BARCELONA	584	8,43	11
ALMERÍA	CUENCA	500	7,76	0	MURCIA	CASTELLÓN	307	4,72	14
ALMERÍA	MADRID	544	8,08	10	MURCIA	CUENCA	287	4,81	4
ALMERÍA	MURCIA	224	3,27	7	MURCIA	MADRID	399	5,66	23
ALMERÍA	TARRAGONA	705	9,82	6	MURCIA	TARRAGONA	492	6,87	9
ALMERÍA	VALENCIA	442	6,48	6	MURCIA	VALENCIA	229	3,55	26
BARCELONA	ALBACETE	512	8,06	3	TARRAGONA	ALBACETE	419	6,52	1
BARCELONA	ALICANTE/ALACANT	528	7,82	8	TARRAGONA	ALICANTE/ALACANT	435	6,28	5
BARCELONA	ALMERÍA	800	11,44	5	TARRAGONA	ALMERÍA	706	9,90	5
BARCELONA	CASTELLÓN	280	4,27	10	TARRAGONA	BARCELONA	95	1,78	9
BARCELONA	CUENCA	541	8,17	1	TARRAGONA	CASTELLÓN	187	2,73	2
BARCELONA	MADRID	621	8,93	20	TARRAGONA	CUENCA	448	6,63	1
BARCELONA	MURCIA	589	8,49	9	TARRAGONA	MADRID	545	7,84	10
BARCELONA	TARRAGONA	99	1,82	9	TARRAGONA	MURCIA	495	6,96	5
BARCELONA	VALENCIA	351	5,29	6	TARRAGONA	VALENCIA	258	3,75	7
CASTELLÓN	ALBACETE	233	4,36	18	VALENCIA	ALBACETE	187	2,88	5
CASTELLÓN	ALICANTE/ALACANT	249	4,10	15	VALENCIA	ALICANTE/ALACANT	170	2,88	25
CASTELLÓN	ALMERÍA	521	7,71	4	VALENCIA	ALMERÍA	442	6,50	5
CASTELLÓN	BARCELONA	278	4,29	10	VALENCIA	BARCELONA	349	5,27	34
CASTELLÓN	CUENCA	262	4,44	4	VALENCIA	CASTELLÓN	72	1,56	7
CASTELLÓN	MADRID	418	6,13	16	VALENCIA	CUENCA	199	3,58	-
CASTELLÓN	MURCIA	310	4,79	14	VALENCIA	MADRID	355	5,27	10
CASTELLÓN	TARRAGONA	186	2,73	8	VALENCIA	MURCIA	231	3,58	6
CASTELLÓN	VALENCIA	72	1,56	6	VALENCIA	TARRAGONA	257	3,73	23

- No dispone de servicio directo

Nota: Tiempo medido en horas; distancia en kilómetros

Fuente: Elaboración propia con datos de Mcrit.

Oferta de servicios de transporte de viajeros por ferrocarril

Los servicios ferroviarios que se muestran a continuación (Tabla 133) se han recopilado de las bases de datos de: (i) Renfe-Operadora y (ii) de las disponibles en la Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Tabla 133: Distancias, tiempos de viaje y frecuencias en el ferrocarril convencional en los diferentes trayectos del corredor de Levante

Origen	Destino	Distancia	T. de viaje	Frecuencias	Tarifa	Origen	Destino	Distancia	T. de viaje	Frecuencias	Tarifa
		km	*horas*	diarias	c€/km			*km*	*horas*	diarias	c€/km
ALBACETE	ALICANTE/ALACANT	181,43	1,90	16	0,12	CUENCA	ALBACETE	73,00	5,55	1	0,12
ALBACETE	ALMERÍA	540,79	6,47	4	0,12	CUENCA	ALICANTE/ALACANT	390,95	5,10	-	0,12
ALBACETE	BARCELONA	556,19	4,95	4	0,12	CUENCA	ALMERÍA	661,39	8,16	-	0,12
ALBACETE	CASTELLÓN	285,48	2,23	4	0,12	CUENCA	BARCELONA	550,99	6,64	-	0,12
ALBACETE	CUENCA	73,00	5,00	-	0,12	CUENCA	CASTELLÓN	280,28	3,92	-	0,12
ALBACETE	MADRID	284,83	3,02	6	0,12	CUENCA	MADRID	206,95	2,94	9	0,12
ALBACETE	MURCIA	182,27	1,86	10	0,12	CUENCA	MURCIA	565,74	5,20	-	0,12
ALBACETE	TARRAGONA	472,74	3,66	4	0,12	CUENCA	TARRAGONA	479,00	5,53	-	0,14
ALBACETE	VALENCIA	212,01	1,68	26	0,12	CUENCA	VALENCIA	206,80	3,37	8	0,12
ALICANTE/ALACANT	ALBACETE	181,43	1,67	16	0,12	MADRID	ALBACETE	284,83	3,02	6	0,12
ALICANTE/ALACANT	ALMERÍA	718,04	7,95	-	0,12	MADRID	ALICANTE/ALACANT	462,08	3,58	7	0,12
ALICANTE/ALACANT	BARCELONA	530,69	5,28	16	0,14	MADRID	ALMERÍA	558,57	6,42	6	0,12
ALICANTE/ALACANT	CASTELLÓN	269,00	2,47	8	0,14	MADRID	BARCELONA	616,46	4,99	7	0,12
ALICANTE/ALACANT	CUENCA	389,62	5,30	-	0,12	MADRID	CASTELLÓN	566,13	4,38	6	0,12
ALICANTE/ALACANT	MADRID	462,08	3,58	7	0,12	MADRID	CUENCA	206,95	2,94	9	0,12
ALICANTE/ALACANT	MURCIA	81,47	1,58	10	0,12	MADRID	MURCIA	462,92	3,97	10	0,12
ALICANTE/ALACANT	TARRAGONA	447,24	4,19	16	0,14	MADRID	TARRAGONA	555,96	2,55	10	0,16
ALICANTE/ALACANT	VALENCIA	196,00	1,70	10	0,14	MADRID	VALENCIA	485,56	3,41	10	0,12
ALMERÍA	ALBACETE	540,79	6,42	1	0,12	MURCIA	ALBACETE	182,27	1,83	10	0,12
ALMERÍA	ALICANTE/ALACANT	718,04	7,98	-	0,12	MURCIA	ALICANTE/ALACANT	81,47	1,39	10	0,12
ALMERÍA	BARCELONA	1167,46	10,94	1	0,14	MURCIA	ALMERÍA	722,00	7,88	0	0,12
ALMERÍA	CASTELLÓN	822,09	8,31	1	0,12	MURCIA	BARCELONA	611,23	6,55	6	0,12
ALMERÍA	CUENCA	661,39	8,09	0	0,12	MURCIA	CASTELLÓN	347,00	4,00	-	0,12
ALMERÍA	MADRID	558,57	6,42	6	0,12	MURCIA	CUENCA	565,74	5,40	-	0,12
ALMERÍA	MURCIA	718,88	8,21	-	0,12	MURCIA	MADRID	462,92	3,97	10	0,12
ALMERÍA	TARRAGONA	1009,34	9,74	1	0,12	MURCIA	TARRAGONA	527,77	5,42	6	0,12
ALMERÍA	VALENCIA	748,62	7,76	1	0,12	MURCIA	VALENCIA	262,19	2,77	10	0,12
BARCELONA	ALBACETE	556,19	4,67	4	0,12	TARRAGONA	ALBACETE	472,74	3,73	4	0,12
BARCELONA	ALICANTE/ALACANT	530,69	5,23	16	0,14	TARRAGONA	ALICANTE/ALACANT	447,24	4,22	16	0,14
BARCELONA	ALMERÍA	1092,80	10,77	-	0,14	TARRAGONA	ALMERÍA	1009,34	9,82	-	0,12
BARCELONA	CASTELLÓN	272,47	2,52	1	0,14	TARRAGONA	BARCELONA	85,00	1,25	42	0,14
BARCELONA	CUENCA	549,65	6,71	-	0,12	TARRAGONA	CASTELLÓN	189,02	1,52	15	0,14
BARCELONA	MADRID	616,46	4,99	7	0,12	TARRAGONA	CUENCA	466,20	5,76	-	0,12
BARCELONA	MURCIA	734,28	6,12	6	0,12	TARRAGONA	MADRID	555,96	2,55	10	0,14
BARCELONA	TARRAGONA	85,00	1,00	30	0,16	TARRAGONA	MURCIA	650,82	5,17	6	0,12
BARCELONA	VALENCIA	346,55	3,31	15	0,14	TARRAGONA	VALENCIA	263,09	2,37	28	0,14
CASTELLÓN	ALBACETE	285,48	2,48	4	0,12	VALENCIA	ALBACETE	212,01	1,59	26	0,12
CASTELLÓN	ALICANTE/ALACANT	269,00	2,78	8	0,14	VALENCIA	ALICANTE/ALACANT	196,00	1,83	10	0,14
CASTELLÓN	ALMERÍA	822,09	8,38	-	0,12	VALENCIA	ALMERÍA	748,62	7,69	-	0,12
CASTELLÓN	BARCELONA	272,47	2,75	14	0,14	VALENCIA	BARCELONA	346,55	3,51	28	0,14
CASTELLÓN	CUENCA	278,95	4,32	-	0,12	VALENCIA	CASTELLÓN	73,00	0,62	19	0,14
CASTELLÓN	MADRID	566,13	4,38	6	0,12	VALENCIA	CUENCA	205,47	3,63	8	0,12
CASTELLÓN	MURCIA	335,67	4,11	3	0,12	VALENCIA	MADRID	485,56	3,41	10	0,12
CASTELLÓN	TARRAGONA	189,02	1,59	15	0,14	VALENCIA	MURCIA	390,10	3,04	10	0,12
CASTELLÓN	VALENCIA	73,00	0,77	19	0,14	VALENCIA	TARRAGONA	263,09	2,22	28	0,14

- No dispone de servicio directo

Nota: Tiempo medido en horas; distancia en kilómetros y tarifa en c€/km.

Fuente: Elaboración propia con datos de Renfe.

En cuanto a las tarifas por kilómetro (parámetro que será empleado para el cálculo del coste generalizado) se ha realizado una búsqueda de precios de billete en el Observatorio del Ferrocarril, tomando para todos los casos el precio de referencia (billete medio) para una serie de relaciones en diferentes servicios AVE, AVANT, Convencional y Euromed.

Oferta de servicios de transporte de viajeros por avión con incorporación al corredor

Para el caso de las distancias en el modo avión se han utilizado distancias ortodrómicas, empleando para ello Google Earth, mientras que, para el tiempo de viaje los datos se han obtenido de las compañías que ofrecen servicio en estas relaciones. A su vez, los datos de operaciones anuales han sido recopilados de las estadísticas AENA.

Tabla 134: Operaciones, tiempos de viaje y kilómetros del avión en los diferentes trayectos del corredor de Levante.

Origen	Destino	Distancia	T. de viaje	Operaciones	Origen	Destino	Distancia	T. de viaje	Operaciones
		km	*h*				*km*	*h*	
ALICANTE/ALACANT	BARCELONA	406,80	1,08	2.418	MADRID	ALICANTE/ALACANT	360,30	1,17	3.899
ALICANTE/ALACANT	MADRID	360,30	1,25	3.902	MADRID	ALMERÍA	410,50	1,08	2.593
ALMERÍA	BARCELONA	644,20	1,33	1.467	MADRID	BARCELONA	508,30	1,25	20.394
ALMERÍA	MADRID	410,50	1,08	2.581	MADRID	MURCIA	347,90	1,08	1.029
BARCELONA	ALICANTE/ALACANT	406,80	1,17	2.420	MADRID	VALENCIA	301,40	0,92	7.272
BARCELONA	ALMERÍA	644,20	1,33	1.485	MURCIA	MADRID	347,90	1,08	1.026
BARCELONA	MADRID	508,30	1,33	20.733	VALENCIA	MADRID	301,40	0,92	7.270

Fuente: Distancias en línea recta: Google Earth, tiempos de viaje: información recogida compañías aéreas.

ANEJO 2: DEMANDA DE VIAJEROS EN EL CORREDOR DE LEVANTE

Demanda de viajes de realizados en coche y en autobús

La encuesta de Movilia2007 aporta datos de flujos entre las distintas comunidades autónomas españolas, pero no aporta tráficos entre las diferentes provincias. La delimitación (zonificación) del caso ejemplo, precisa de mayor grado de detalle, esto significa que se precisan datos de tráficos entre provincias. Por lo tanto, los flujos entre comunidades autónomas deben de ser desagregados entre provincias.

Para esta desagregación se utiliza una metodología, contrastada en diferentes estudios de demanda, entre los que se puede citar el informe (MCRIT SL, 2012). Este informe afirma que el tráfico entre provincias puede ser obtenido mediante la siguiente expresión:

$$V_{AiBj} = V_{AB} \times \frac{\left(\frac{P_i \times P_j}{D_{ij}}\right)}{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} \left(\frac{P_i \times P_j}{D_{ij}}\right)} \qquad (2.\ 43)$$

Dónde:

- V_{AiBj}: Viajes entre la provincia "i" de la comunidad autónoma "A" y la provincia "j" de la comunidad autónoma "B".
- V_{AB}: Viajes entre la comunidad "A" y la comunidad "B".
- P_i, P_j: Población de la provincia "i" y "j" respectivamente.
- n: Número de provincias de la comunidad autónoma "A".
- *m*: Número de provincias de la comunidad autónoma "B".
- *D: Distancia entre ambas provincias (km).*

Esta metodología también se puede aplicar para determinar los viajes según modo de transporte, es decir, tras desagregar los datos entre comunidades a datos entre provincias, es posible determinar también la cantidad de viajes que se realizan en cada uno de los modos de transporte que compiten en cada uno de los trayectos estudiados. Esto permite una validación posterior, ya que determinados modos pueden ser contrastados con otras bases de datos disponibles, tales como las bases de datos de Renfe y de AENA.

A continuación, se muestra en tablas un ejemplo del tráfico existente entre la Comunidad de Madrid, Castilla la Mancha y la Comunidad Valenciana, datos que son obtenidos de la encuesta de Movilia2007. Se indica no sólo el tráfico total entre ambas comunidades sino también el tráfico para los diferentes modos de transporte.

Tabla 135: Flujo entre la Comunidad de Madrid y la Comunidad de Castilla la Mancha para los diferentes modos de transporte.

	Total		Coche		Autobús		Tren		Avión	
C.Madrid-Castilla la Mancha	**Un sentido**	**Viaje de vuelta**	**Un sentido**	**Viaje de vuelta**	**Un sentido**	**Viaje de vuelta**	**Un sentido**	**Viaje de vuelta**	**Un sentido**	**Viaje de vuelta**
C.Madrid-Castilla	16015	16015	11689	11689	2508,8	2508,8	1818	1818	0	0
Castilla-Madrid	11271	11271	8691,4	8691,4	1631,3	1631,3	948,3	948,3	0	0
Total de viajes en 2 sentidos	**54.572**		**40.761**		**8.280**		**5.533**		**0**	

Fuente: Elaboración propia (datos empleados Movilia2007).

Tabla 136: Flujo entre la Comunidad de Madrid y la Comunidad de Valencia para los diferentes modos de transporte.

	Total		Coche		Autobús		Tren		Avión	
Madrid - C.Valenciana	**Un sentido**	**Viaje de vuelta**	**Un sentid**	**Viaje de vuelta**	**Un sentid**	**Viaje de vuelta**	**Un sentido**	**Viaje de vuelta**	**Un sentido**	**Viaje de vuelta**
Madrid-C.Valenciana	3201,79	3201,79	2474	2474	380,9	380,9	339	339	7	7
C.Valenciana-Madrid	1422,83	1422,83	928,2	928,2	129,3	129,3	318,4	318,4	47	47
Total de viajes en 2 sentidos	**9.249**		**6.805**		**1.020**		**1.315**		**108**	

Fuente: Elaboración propia (datos empleados Movilia2007).

A continuación, se muestra, a modo de ejemplo, el cálculo realizado entre las comunidades de Madrid y Castilla la Mancha y entre la Comunidad de Madrid y la Comunidad Valenciana.

Tabla 137: Desagregación de los flujos entre la comunidad de Madrid y la comunidad de Castilla la Mancha en miles de viajes entre las diferentes provincias y según modo de transporte.

Madrid	**Distancia**	**Pob. prov Origen**	**Pob. prov Destino**	**Prov O*Prov D / Dist**	**Ponderación**
Albacete	258,5	6.081.689	392.110	9.224.932.105	9%
Ciudad Real	213,5	6.081.689	500.060	14.243.539.804	15%
Cuenca	168,7	6.081.689	211.375	7.621.988.820	8%
Guadalajara	55,5	6.081.689	203.737	22.319.062.465	23%
Toledo	82,7	6.081.689	598.256	44.013.342.056	45%

Caso Madrid-Albacete

	Viajes
Viajes Coche	3.798
Viajes Bus	771

Caso Madrid-Ciudad Real

	Viajes
Viajes Coche	5.978
Viajes Bus	1.214

Caso Madrid-Cuenca

	Viajes
Viajes Coche	3.147
Viajes Bus	639

Caso Madrid-Guadalajara

	Viajes
Viajes Coche	9.367
Viajes Bus	1.903

Caso Madrid-Toledo

	Viajes
Viajes Coche	18.471
Viajes Bus	3.752

Tabla 138: Desagregación de los flujos entre la comunidad de Madrid y la comunidad de Valenciana en miles de viajes entre las diferentes provincias y según modo de transporte.

Madrid	Distancia	Pob prov O	Pob prov D	Prov O * Prov D / Dist	Ponderación
Alicant	434,6	6.081.689	1.825.264	25.539.489.405	34%
Castellón	428,6	6.081.689	573.282	8.134.336.013	11%
Valencia	359,0	6.081.689	2.486.483	42.119.323.033	56%

Caso Madrid-Alicante

	Viajes
Viajes Coche	2.293
Viajes Bus	344

Caso Madrid-Castellón

	Viajes
Viajes Coche	730
Viajes Bus	110

Caso Madrid-Valencia

	Viajes
Viajes Coche	3.782
Viajes Bus	567

Fuente: Elaboración propia.

Esta metodología es aplicada para todos los pares origen-destino del caso ejemplo, lo que permite determinar el tráfico total entre provincias de diferentes comunidades, pero no sirve para la determinación de flujos entre provincias de la misma comunidad ya que la encuesta de Movilia2007 no ofrece datos de estas relaciones.

Para ello se accede a otra base de datos, el estudio realizado por Sener para Adif (Sener, Julio 2007). En él se describe y cuantifica la oferta de transporte para el año 2007 en el corredor Madrid-Castilla La Mancha-Comunidad Valenciana-Región de Murcia.

En este estudio se calcula la demanda de viajes en coche y en autobús en el año 2004 para las distintas relaciones origen-destino del corredor de Levante. Para ello, emplean los datos estadísticos del Mapa de Tráfico (Ministerio de Fomento). Los datos de tráfico que presentan proporcionan en su conjunto una buena imagen del nivel en el que se encontraba la oferta de servicios en 2004.

Conocida la evolución del tráfico en España entre 2000 y 2010 (Tabla 139), es posible determinar el volumen de tráfico para el año empleado de referencia 2007.

Tabla 139: Tráfico en la red interurbana de carreteras

AÑOS	Administración Central			Comunidades Autónomas (2)			Diputaciones Provinciales (2)			Total (1)	
	millones veh-km	% total	% pesados	millones veh-km	% total	% pesados	millones veh-km	% total	% pesados	millones veh-km	% pesados
2000	104.933	50,3%	17,3	90.308	43,3%	10,3	13.267	6,4%	9,6	208.508	13,8
2001	110.941	51,0%	17,4	93.499	43,0%	10,7	13.242	6,1%	11,7	217.682	14,2
2002	114.851	50,3%	17,0	98.053	43,0%	9,8	15.268	6,7%	9,0	228.172	13,4
2003	119.634	50,6%	17,0	100.906	42,7%	9,9	15.815	6,7%	11,4	236.355	13,6
2004	122.645	50,7%	16,9	104.354	43,2%	9,4	14.716	6,1%	8,5	241.715	13,2
2005	125.823	51,3%	17,0	104.453	42,6%	9,2	14.797	6,0%	9,5	245.073	13,2
2006	129.121	52,1%	16,4	103.400	41,7%	9,4	15.356	6,2%	9,4	247.877	13,0
2007	133.313	51,9%	17,0	107.252	41,8%	9,5	16.095	6,3%	10,3	256.660	13,4
2008 (3)	128.702	51,1%	15,6	107.700	42,8%	9,2	15.347	6,1%	9,9	251.749	12,5
2009	126.194	50,6%	14,3	104.940	42,1%	8,6	18.237	7,3%	9,1	249.371	11,4
2010	123.620	51,3%	13,6	101.752	42,2%	8,4	15.759	6,5%	8,8	241.131	11,1

(*) La unidad empleada en Ingeniería de Tráfico es el Vehículo-km aunque en realidad son km.

Fuente: Subdirección General de Explotación y Gestión de Red. D.G.C. Ministerio de Fomento.

Conocida la evolución del tráfico entre 2004 y 2007 (incremento de un 5,82 %) y entre 1996 y 2007 (21,30%), la demanda de viajes en vehículo privado y autobús para las relaciones entre provincias de la misma comunidad que son ámbito de estudio aquí, queda cuantificada y se muestran en la siguiente tabla (Tabla 140).

Tabla 140: Evolución del tráfico para las relaciones del caso ejemplo que están en las mismas comunidades autónomas.

	Demanda coche 1996	Demanda autobus 1996	Demanda-Coche 2004	Demanda-Autobus 2004	Crecimiento desde 1996/2004 a 2007	Demanda Coche 2007	Demanda Autobus 2007
Albacete-Cuenca	-	-	105.482	1.672	5,82%	111.624	1.769
Alicante-Valencia	-	-	3.755.857	160.525	5,82%	3.974.556	169.872
Alicante-Castellón	-	-	192.008	10.240	5,82%	203.188	10.836
Taragona-Barcelona	3.266.343	317.566	-	-	21,30%	3.456.538	336.057

Fuente: Elaboración propia.

La estimación de la demanda de viajeros en el caso del ferrocarril y del avión es más sencilla que en el caso de carretera, debido a la existencia de bases de datos elaboradas por las empresas que ofrecen estos servicios.

Demanda de servicios de transporte de viajes por ferrocarril

Los datos referentes a la demanda de viajeros por ferrocarril entre las distintas relaciones origen-destino del corredor (diferenciándose Larga (LD) y Media Distancia (MD)), han sido proporcionados por Renfe y validados con las bases de datos de Adif (véase Tabla 141), a las que se ha tenido acceso.

Tabla 141: Demanda de viajeros por ferrocarril convencional en el año 2007 para las relaciones origen destino del corredor de Levante

Origen	Destino	Demanda LD	Demanda MD	Origen	Destino	Demanda LD	Demanda MD
ALBACETE	ALICANTE/ALACANT	27.677	16.720	CUENCA	ALBACETE	0	0
ALBACETE	ALMERÍA	130	0	CUENCA	ALICANTE/ALACANT	0	0
ALBACETE	BARCELONA	12.265	0	CUENCA	ALMERÍA	0	0
ALBACETE	CASTELLÓN	3.435	0	CUENCA	BARCELONA	0	0
ALBACETE	CUENCA	0	0	CUENCA	CASTELLÓN	0	0
ALBACETE	MADRID	137.968	40.840	CUENCA	MADRID	0	80.210
ALBACETE	MURCIA	11.137	0	CUENCA	MURCIA	0	0
ALBACETE	TARRAGONA	2.281	0	CUENCA	TARRAGONA	0	0
ALBACETE	VALENCIA	53.145	31.298	CUENCA	VALENCIA	0	46.534
ALICANTE/ALACANT	ALBACETE	26.096	19.334	MADRID	ALBACETE	138.120	39.602
ALICANTE/ALACANT	ALMERÍA	0	0	MADRID	ALICANTE/ALACANT	478.776	0
ALICANTE/ALACANT	BARCELONA	139.368	0	MADRID	ALMERÍA	45.077	0
ALICANTE/ALACANT	CASTELLÓN	18.899	0	MADRID	BARCELONA	381.857	0
ALICANTE/ALACANT	CUENCA	0	0	MADRID	CASTELLÓN	36.189	0
ALICANTE/ALACANT	MADRID	470.443	0	MADRID	CUENCA	0	65.296
ALICANTE/ALACANT	MURCIA	2.739	4.794	MADRID	MURCIA	229.482	0
ALICANTE/ALACANT	TARRAGONA	20.965	0	MADRID	TARRAGONA	193.192	0
ALICANTE/ALACANT	VALENCIA	132.043	100.076	MADRID	VALENCIA	406.277	25.910
ALMERÍA	ALBACETE	87	0	MURCIA	ALBACETE	11.231	0
ALMERÍA	ALICANTE/ALACANT	0	0	MURCIA	ALICANTE/ALACANT	2.680	8.600
ALMERÍA	BARCELONA	2.929	0	MURCIA	ALMERÍA	0	0
ALMERÍA	CASTELLÓN	188	0	MURCIA	BARCELONA	44.049	0
ALMERÍA	CUENCA	0	0	MURCIA	CASTELLÓN	4.606	0
ALMERÍA	MADRID	43.509	0	MURCIA	CUENCA	0	0
ALMERÍA	MURCIA	0	0	MURCIA	MADRID	225.723	0
ALMERÍA	TARRAGONA	404	0	MURCIA	TARRAGONA	7.623	0
ALMERÍA	VALENCIA	388	0	MURCIA	VALENCIA	20.739	37.334
BARCELONA	ALBACETE	12.808	0	TARRAGONA	ALBACETE	2.289	0
BARCELONA	ALICANTE/ALACANT	143.184	0	TARRAGONA	ALICANTE/ALACANT	20.506	0
BARCELONA	ALMERÍA	2.922	0	TARRAGONA	ALMERÍA	520	0
BARCELONA	CASTELLÓN	157.668	3.016	TARRAGONA	BARCELONA	22.442	1.029.748
BARCELONA	CUENCA	0	0	TARRAGONA	CASTELLÓN	24.672	1.436
BARCELONA	MADRID	376.266	0	TARRAGONA	CUENCA	0	0
BARCELONA	MURCIA	44.188	0	TARRAGONA	MADRID	193.537	0
BARCELONA	TARRAGONA	23.249	987.976	TARRAGONA	MURCIA	7.441	0
BARCELONA	VALENCIA	429.152	8.766	TARRAGONA	VALENCIA	60.069	4.056
CASTELLÓN	ALBACETE	3.571	0	VALENCIA	ALBACETE	52.498	30.926
CASTELLÓN	ALICANTE/ALACANT	19.307	0	VALENCIA	ALICANTE/ALACANT	129.696	111.336
CASTELLÓN	ALMERÍA	252	0	VALENCIA	ALMERÍA	401	0
CASTELLÓN	BARCELONA	151.725	6.464	VALENCIA	BARCELONA	423.655	19.602
CASTELLÓN	CUENCA	0	0	VALENCIA	CASTELLÓN	27.400	6.706
CASTELLÓN	MADRID	37.292	0	VALENCIA	CUENCA	0	55.090
CASTELLÓN	MURCIA	4.634	0	VALENCIA	MADRID	406.727	10.990
CASTELLÓN	TARRAGONA	24.520	1.652	VALENCIA	MURCIA	20.248	38.790
CASTELLÓN	VALENCIA	25.006	7.210	VALENCIA	TARRAGONA	59.995	3.090

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos aportados por Renfe

Demanda de servicios nacionales de transporte de viajeros por avión

Los datos referentes a la demanda de viajeros en la modalidad avión que se presentan a continuación (Tabla 142) han sido obtenidos de las estadísticas de tráfico publicadas por AENA.

Tabla 142: Demanda de viajeros en el modo avión en el año 2007 para las relaciones origen destino del corredor de Levante.

Origen	Destino	Demanda	Origen	Destino	Demanda
ALICANTE/ALACANT	BARCELONA	216.543	MADRID	ALICANTE/ALACANT	426.740
ALICANTE/ALACANT	MADRID	433.158	MADRID	ALMERÍA	154.854
ALMERÍA	BARCELONA	58.023	MADRID	BARCELONA	2.402.492
BARCELONA	ALICANTE/ALACANT	223.958	MADRID	MURCIA	69.660
BARCELONA	ALMERÍA	60.466	MADRID	VALENCIA	528.530
BARCELONA	MADRID	2.335.224	MURCIA	MADRID	43.520
			VALENCIA	MADRID	530.628

*Fuente: Estadísticas AENA (*http://www.aena.es/csee/Satellite?pagename=Estadisticas/Home*).*

ANEJO 3: COSTE GENERALIZADO EN EL CORREDOR DE LEVANTE

Los valores empleados en esta tesis para la determinación del coste generalizado de cada ruta y para cada modo han sido obtenidos del informe elaborado por Mcrit (MCRIT SL, 2012). A continuación, se muestran los valores empleados desglosados por tipo de modo de transporte.

Vehículo privado

En el caso del vehículo privado los valores necesarios para calcular el coste generalizado se muestran en la siguiente tabla (Tabla 143):

Tabla 143: Coste generalizado en el caso del automóvil.

Coste generalizado en el caso del coche (Cgm)		
Coste directo inicial de acceso al modo de transporte (€)	Cdini	0
Coste directo final de dispersión del modo de transporte (€)	Cdfin	10
Costes operativos de funcionamiento del vehículo privado (€/km)	COp	
Coste del peaje de las autopistas (euros/km)	Peaje	
Ocupación (para el vehículo privado)	pax/veh	1,3
Tarifa kilométrica del modo de transporte	€/km	0
Longitud del recorrido	L	
Tiempo de espera según disponibilidad de servicio (horas)	Tdisp	0
T. de llegada a la estación/aeropuerto y el inicio del servicio (horas)	Tantelación	0
Tiempo de a bordo del modo de transporte (horas)	Tabordo	
Tiempo de acceso y dispersión al modo (horas)	TAiD	0,167
Valor del tiempo, para el tiempo de espera	VoTdisp	30
Valor del tiempo, para el tiempo entre llegada e inicio del servicio	VoTantelación	30
Valor del tiempo, para el tiempo abordo	VoTabordo	15
Valor del tiempo, para el tiempo de acceso y dispersión al modo	VoTAiD	15
Factor de comodidad	Kcom	1,3
Datos que dependen del recorrido		

Fuente: Elaboración propia.

En el vehículo privado la frecuencia de viajes es infinita por eso el tiempo de espera (T_{disp}) se considera cero. Además, el viajero se desplaza de "puerta a puerta" por lo que el tiempo de acceso y dispersión (T_{AiD}) se puede considerar casi nulo (existe un cierto tiempo de aparcamiento que en este estudio se ha tomado 10 minutos).

El viajero en este modo de transporte no necesita salir antes de tiempo, sale realmente en el momento que desea hacer el viaje, por lo tanto, el tiempo de antelación ($T_{antelación}$) también es considerado nulo. A partir de estos datos se llega a la conclusión de que el tiempo de viaje es prácticamente el tiempo de abordo (T_{abordo}).

En cuanto a los parámetros de longitud (L), el tiempo a bordo (T_{abordo}) y el coste operativo (C_{op}), dependen del trayecto y ya han sido especificados en Tabla 131 del Anejo 1. Para el factor de comodidad se toma como referencia el valor 1 para el modo avión así que puede afirmarse que viajar en vehículo privado supone una incomodidad mayor para el viajero, de ahí que se tome un valor más alto (k_{conf}= 1,3).

Autobús

En el caso del autobús los valores utilizados se muestran en la siguiente tabla (Tabla 144):

Tabla 144: Coste generalizado en el caso del autobús.

Coste generalizado en el caso del autobús(Cgm)		
Coste directo inicial de acceso al modo de transporte (€)	Cdini	5
Coste directo final de dispersión del modo de transporte (€)	Cdfin	5
Costes operativos de funcionamiento del vehículo privado (€/km)	COp	0
Coste del peaje de las autopistas	Peaje	0
Ocupación (para el vehículo privado)		1
Tarifa kilométrica del modo de transporte	€/km	0,066
Longitud del recorrido	L	
Tiempo de espera según disponibilidad de servicio (horas)	Tdisp	
T. de llegada a la estación/aeropuerto y el inicio del servicio (horas)	Tantelación	0,25
Tiempo de a bordo del modo de transporte (horas)	Tabordo	
Tiempo de acceso y dispersión al modo (horas)	TAiD	0,5
Valor del tiempo, para el tiempo de espera	VoTdisp	30
Valor del tiempo, para el tiempo entre llegada e inicio del servicio	VoTantelación	30
Valor del tiempo, para el tiempo abordo	VoTabordo	15
Valor del tiempo, para el tiempo de acceso y dispersión al modo	VoTAiD	15
Factor de comodidad	Kcom	1,2

Datos que dependen del recorrido

Variables que son nulas para el modo de transporte analizado

Fuente: Elaboración propia

Para la determinación de la tarifa por kilómetro se toma el valor determinado en el estudio Mcrit, el cual realiza una búsqueda de precios para 15 itinerarios interregionales, obteniendo así que el precio medio del billete es de 0,066€/kilómetro.

Los diferentes tiempos de viaje toman valores diferentes que el caso del vehículo privado. En primer lugar, el tiempo de espera (T_{disp}) depende de la frecuencia del servicio y debe calcularse para cada relación (de ahí que no se incluya un valor numérico en la tabla). Tanto los tiempos de antelación ($T_{antelación}$) como el de acceso y dispersión (T_{AiD}) son mayores porque el viajero debe salir antes de su domicilio y debe "consumir" un tiempo para llegar a la estación.

En cuanto al factor de comodidad, la percepción de incomodidad de un viaje en bus se valora negativamente en relación a viajar en avión por lo tanto toma el valor de 1,2.

Ferrocarril convencional

El ferrocarril convencional toma los siguientes valores:

Tabla 145: Coste generalizado en el caso del ferrocarril convencional.

Coste generalizado en el caso del ferrocarril convencional (Cgm)		
Coste directo inicial de acceso al modo de transporte (€)	Cdini	5
Coste directo final de dispersión del modo de transporte (€)	Cdfin	5
Costes operativos de funcionamiento del vehículo privado (€/km)	COp	0
Coste del peaje de las autopistas	Peaje	0
Ocupación (para el vehículo privado)		1
Tarifa kilométrica del modo de transporte	€/km	
Longitud del recorrido	L	
Tiempo de espera según disponibilidad de servicio (horas)	Tdisp	
T. de llegada a la estación/aeropuerto y el inicio del servicio (horas)	Tantelación	0,25
Tiempo de a bordo del modo de transporte (horas)	Tabordo	
Tiempo de acceso y dispersión al modo (horas)	TAiD	0,5
Valor del tiempo, para el tiempo de espera	VoTdisp	30
Valor del tiempo, para el tiempo entre llegada e inicio del servicio	VoTantelación	30
Valor del tiempo, para el tiempo abordo	VoTabordo	15
Valor del tiempo, para el tiempo de acceso y dispersión al modo	VoTAiD	15
Factor de comodidad	Kcom	1,1

Datos que dependen del recorrido

Variables que son nulas para el recorrido analizado

Fuente: Elaboración propia

La tarifa kilométrica, la distancia y el tiempo a bordo (T_{abordo}) dependen de la relación origen-destino (véase Tabla 133).

Al igual que sucede en el autobús, los tiempos de viaje difieren según las rutas y son mayores que el caso del vehículo privado. Esto es debido a que el viajero necesita salir con antelación y planificarse para ir de viaje, por lo tanto, no dispone de independencia para viajar, sino que está sometido a la localización de la estación y la frecuencia del servicio.

Modo aéreo

El cálculo de coste generalizado para el modo aéreo se nutre de los siguientes valores:

Tabla 146: Coste generalizado en el caso del avión

Coste generalizado en el caso del Avión (Cgm)		
Coste directo inicial de acceso al modo de transporte (€)	Cdini	15
Coste directo final de dispersión del modo de transporte (€)	Cdfin	20
Costes operativos de funcionamiento del vehículo privado (€/km)	COp	
Coste del peaje de las autopistas	Peaje	
Ocupación (para el vehículo privado)		
Tarifa kilométrica del modo de transporte	€/km	
Longitud del recorrido	L	
Tiempo de espera según disponibilidad de servicio (horas)	Tdisp	
T. de llegada a la estación/aeropuerto y el inicio del servicio (horas)	Tantelación	1
Tiempo de a bordo del modo de transporte (horas)	Tabordo	
Tiempo de acceso y dispersión al modo (horas)	TAiD	0,33
Valor del tiempo, para el tiempo de espera	VoTdisp *(€/h)*	30
Valor del tiempo, para el tiempo entre llegada e inicio del servicio	VoTantelación *(€/h)*	30
Valor del tiempo, para el tiempo abordo	VoTabordo *(€/h)*	15
Valor del tiempo, para el tiempo de acceso y dispersión al modo	VoTAiD *(€/h)*	15
Factor de comodidad	Kcom	1
Datos que dependen del recorrido y que están recogidos en tablas en las hojas siguientes		
Se considera solo para vehículo privado		

Fuente: Elaboración propia.

La tarifa kilométrica aquí empleada distingue según tipo de aeropuerto desde el que se viaja o al que se viaja:

- 0,13 €/km entre dos aeropuertos importantes (más de un millón de pasajeros con la mayor parte del tráfico entre aeropuertos nacionales).
- 0,18 €/km tarifa en el que uno de los aeropuertos es importante.
- 0,25 €/km tarifa entre dos aeropuertos no importantes.

En cuanto a los diferentes tiempos de viaje, el tiempo de espera (T_{disp}) depende de las salidas entre dos servicios con el mismo destino, por lo que es un dato dependiente del trayecto en el que se calcule. Por otro lado, el tiempo de antelación ($T_{antelación}$) y el tiempo de acceso y dispersión (T_{AiD}) son mayores que en los demás modos de transporte debido a la posición de los aeropuertos con respecto al centro de las ciudades.

Alta velocidad

La expresión que permite estimar el coste generalizado toma como inputs los siguientes valores:

Tabla 147: Coste generalizado en el caso tren de alta velocidad

Varibles necesarias para la comparación con un mismo modo de transporte		
Coste generalizado en el caso del ferrocarril AV (Cgm)		
Coste directo inicial de acceso al modo de transporte (€)	Cdini	5
Coste directo final de dispersión del modo de transporte (€)	Cdfin	5
Costes operativos de funcionamiento del vehículo privado (€/km)	COp	0
Coste del peaje de las autopistas	Peaje	0
Ocupación (para el vehículo privado)		0
Tarifa kilométrica del modo de transporte	€/km	0,18
Longitud del recorrido	L	
Tiempo de espera según disponibilidad de servicio (horas)	Tdisp	1,667
T. de llegada a la estación/aeropuerto y el inicio del servicio (horas)	Tantelación	0,25
Tiempo de a bordo del modo de transporte (horas)	Tabordo	
Tiempo de acceso y dispersión al modo (horas)	TAiD	0,5
Valor del tiempo, para el tiempo de espera	VoTdisp	30
Valor del tiempo, para el tiempo entre llegada e inicio del servicio	VoTantelación	30
Valor del tiempo, para el tiempo abordo	VoTabordo	15
Valor del tiempo, para el tiempo de acceso y dispersión al modo	VoTAiD	15
Factor de comodidad	Kcom	0,8

Datos que dependen del recorrido

Variables que son nulas para el recorrido analizado

Fuente: Elaboración propia.

Se puede destacar el factor de comodidad (K_{com} = 0,8), magnitud relativamente inferior que el valor de referencia (avión), debido a que se considera que el tren de alta velocidad ofrece un mayor confort (asientos más amplios…) y la posibilidad de aprovechar el tiempo de viaje para realizar otras tareas.

La longitud de las infraestructuras de alta velocidad es un parámetro que depende de la relación analizada, no conocido antes de la planificación ni, por supuesto, de la construcción de la infraestructura, pero para ello, se ha accedido a un estudio desarrollado para INECO-Tifsa (Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Julio 2008) que analiza la explotación de la línea de Madrid a Levante en tres escenarios diferentes, caracterizados por el distinto grado de avance en la construcción de las infraestructuras, utilizando como base de datos los diferentes estudios informativos existentes. A partir de este estudio es conocida la longitud que finalmente tendrán las distintas rutas analizadas en esta tesis.

Una vez conocida la longitud y considerando que la velocidad comercial de un tren de alta velocidad toma un valor de 220km/h (posteriormente se variará esta velocidad para analizar la influencia de este parámetro en el reparto modal), se determinan los tiempos de viaje (T_{abordo}) para cada uno de los trayectos.

A continuación se muestra una tabla (Tabla 148) en la que se especifica la longitud y el tiempo de viaje para cada uno de los trayectos.

Tabla 148: Distancias en kilómetros de alta velocidad para las diferentes relaciones del corredor de Levante

Origen	Destino	Distancia	T. de viaje	Origen	Destino	Distancia	T. de viaje
		km	*horas*			*km*	*horas*
ALBACETE	ALICANTE/ALACANT	168,80	0,77	CUENCA	ALBACETE	125,90	0,57
ALBACETE	ALMERÍA	410,70	1,87	CUENCA	ALICANTE/ALACANT	294,70	1,34
ALBACETE	BARCELONA	535,75	2,44	CUENCA	ALMERÍA	536,60	2,44
ALBACETE	CASTELLÓN	255,24	1,16	CUENCA	BARCELONA	548,05	2,49
ALBACETE	CUENCA	125,90	0,57	CUENCA	CASTELLÓN	267,54	1,22
ALBACETE	MADRID	314,00	1,43	CUENCA	MADRID	188,10	0,86
ALBACETE	MURCIA	210,70	0,96	CUENCA	MURCIA	336,60	1,53
ALBACETE	TARRAGONA	435,20	1,98	CUENCA	TARRAGONA	447,54	2,03
ALBACETE	VALENCIA	190,60	0,87	CUENCA	VALENCIA	202,90	0,92
ALICANTE/ALACANT	ALBACETE	168,80	0,77	MADRID	ALBACETE	314,00	1,43
ALICANTE/ALACANT	ALMERÍA	277,90	1,26	MADRID	ALICANTE/ALACANT	482,80	2,19
ALICANTE/ALACANT	BARCELONA	537,55	2,44	MADRID	ALMERÍA	724,70	3,29
ALICANTE/ALACANT	CASTELLÓN	257,04	1,17	MADRID	BARCELONA	736,15	3,35
ALICANTE/ALACANT	CUENCA	294,70	1,34	MADRID	CASTELLON	455,64	2,07
ALICANTE/ALACANT	MADRID	482,80	2,19	MADRID	CUENCA	188,10	0,86
ALICANTE/ALACANT	MURCIA	77,90	0,35	MADRID	MURCIA	524,70	2,39
ALICANTE/ALACANT	TARRAGONA	437,04	1,99	MADRID	TARRAGONA	635,64	2,89
ALICANTE/ALACANT	VALENCIA	192,40	0,87	MADRID	VALENCIA	391,00	1,78
ALMERÍA	ALBACETE	410,70	1,87	MURCIA	ALBACETE	210,70	0,96
ALMERÍA	ALICANTE/ALACANT	277,90	1,26	MURCIA	ALICANTE/ALACANT	77,90	0,35
ALMERÍA	BARCELONA	779,45	3,54	MURCIA	ALMERÍA	200,00	0,91
ALMERÍA	CASTELLÓN	498,94	2,27	MURCIA	BARCELONA	579,45	2,63
ALMERÍA	CUENCA	536,60	2,44	MURCIA	CASTELLÓN	298,94	1,36
ALMERÍA	MADRID	724,70	3,29	MURCIA	CUENCA	336,60	1,53
ALMERÍA	MURCIA	200,00	0,91	MURCIA	MADRID	524,70	2,39
ALMERÍA	TARRAGONA	678,94	3,09	MURCIA	TARRAGONA	478,94	2,18
ALMERÍA	VALENCIA	434,30	1,97	MURCIA	VALENCIA	234,30	1,07
BARCELONA	ALBACETE	535,75	2,44	TARRAGONA	ALBACETE	435,20	1,98
BARCELONA	ALICANTE/ALACANT	537,55	2,44	TARRAGONA	ALICANTE/ALACANT	437,04	1,99
BARCELONA	ALMERÍA	779,45	3,54	TARRAGONA	ALMERÍA	678,94	3,09
BARCELONA	CASTELLÓN	280,51	1,28	TARRAGONA	BARCELONA	100,51	0,46
BARCELONA	CUENCA	548,05	2,49	TARRAGONA	CASTELLÓN	180,00	0,82
BARCELONA	MADRID	736,15	3,35	TARRAGONA	CUENCA	447,54	2,03
BARCELONA	MURCIA	579,45	2,63	TARRAGONA	MADRID	635,64	2,89
BARCELONA	TARRAGONA	100,51	0,46	TARRAGONA	MURCIA	478,94	2,18
BARCELONA	VALENCIA	345,15	1,57	TARRAGONA	VALENCIA	244,64	1,11
CASTELLÓN	ALBACETE	255,24	1,16	VALENCIA	ALBACETE	190,60	0,87
CASTELLÓN	ALICANTE/ALACANT	257,04	1,17	VALENCIA	ALICANTE/ALACANT	192,40	0,87
CASTELLÓN	ALMERÍA	498,94	2,27	VALENCIA	ALMERÍA	434,30	1,97
CASTELLÓN	BARCELONA	280,51	1,28	VALENCIA	BARCELONA	345,15	1,57
CASTELLÓN	CUENCA	267,54	1,22	VALENCIA	CASTELLÓN	64,64	0,29
CASTELLÓN	MADRID	455,64	2,07	VALENCIA	CUENCA	202,90	0,92
CASTELLÓN	MURCIA	298,94	1,36	VALENCIA	MADRID	391,00	1,78
CASTELLÓN	TARRAGONA	180,00	0,82	VALENCIA	MURCIA	234,30	1,07
CASTELLÓN	VALENCIA	64,64	0,29	VALENCIA	TARRAGONA	244,64	1,11

Fuente: Elaboración propia con datos de (Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Julio 2008).

ANEJO 4: VELOCIDAD MÁXIMA Y SU RELACIÓN CON EL RADIO DE CURVA

Relación entre la velocidad máxima y el radio de curva

Para que un tren circule a una determinada velocidad en una curva con un radio y un peralte determinado, tiene que respetar los siguientes condicionantes (López Pita, 2006):

- confort del viajero,
- resistencia transversal de la vía y
- posibilidad de descarrilamiento o vuelco.

El nivel de confort está determinado por la aceleración a la que está sometido el viajero. El valor admisible de esta aceleración es un parámetro convencional que puede no ser el mismo si el viajero viaja sentado o de pie.

A continuación se muestra una tabla (Tabla 149), desarrollada de acuerdo con las experiencias de los ferrocarriles franceses, en la que se muestran los valores de aceleración lateral admisible por el viajero dependiendo del nivel de confort.

Tabla 149: Valores de aceleración admisibles por el viajero de acuerdo con la experiencia de los ferrocarriles franceses.

	Posición del viajero	
	Sentado	De pie
Nivel de Confort	m/s^2	m/s^2
Muy Bueno	1	0,85
Bueno	1,2	1
Aceptable	1,4	1,2
Excepcionalmente	1,5	1,4

Fuente: (López Pita, 2006).

Sin embargo, es necesario distinguir entre la aceleración sufrida en el plano del viajero y la sufrida en el plano de la vía, debido a que ambos planos no suelen estar paralelos (en el paso por curva las cajas del vehículo tienen un momento de rotación respecto a las ruedas).

Aceleración del tren en el plano de la vía

La aceleración trasversal del tren en el plano de la vía se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\gamma_{sc} = \frac{V^2}{R} \times \frac{h}{s} \times g \qquad \text{(A.4. 1)}$$

Donde:

- *V: Velocidad de circulación del vehículo (km/h).*
- *R: Radio de la curva (m).*
- *h: Peralte existente en la vía (mm).*
- *s: Distancia entre ejes de ejes de vía (Ancho de vía en mm + 70 mm).*
- *g: aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).*

Evidentemente, un peralte elevado puede llegar a compensar la fuerza centrífuga que surge en el tren al circular por curva y, cuando esto sucede, se dice que el tren está en equilibrio. Como este equilibrio es distinto para cada tipo de tren y para cada radio de curva, se precisaría una altura de peralte diferente para cada uno de estos casos (para

llegar a compensar la fuerza centrífuga y por lo tanto llegar al equilibrio). Al existir trenes lentos y trenes rápidos, que circulan en la misma infraestructura, puede darse el caso de que uno de ellos se parase en medio de una curva peraltada. Este hecho hace que se limite el máximo de peralte que, según ENV 13803-1[41], corresponde a 160mm.

Debido a que el peralte tiene un valor máximo fijo, cuando un tren circula por una curva a una velocidad mayor que la establecida por su peralte, se produce una aceleración sin compensar (γ_{sc}) surgiendo lo que se denomina *insuficiencia de peralte*. Es decir, se precisaría un peralte mayor del existente. Por ello, es indiferente hablar de insuficiencia de peralte y de aceleración centrífuga (la aceleración lateral es una consecuencia de una insuficiencia de peralte). De hecho, en muchas ocasiones se habla de insuficiencia de peralte cuando en realidad se trata de aceleración lateral. Para pasar de una variable a la otra, hay que tener en cuenta la distancia entre ejes (s).

$$I = \gamma_{sc} \times \frac{s}{g} \qquad \text{(A.4. 2)}$$

Donde:

- *I: Insuficiencia de peralte (mm).*
- *s: Distancia entre ejes de la vía (mm).*

Una vez que se establece la aceleración admitida por el viajero (fijada convencionalmente según nivel de confort, y conocido el tipo de vehículo utilizado (si es pendular/basculante o no), se calcula la aceleración en el plano de la vía. Conocidas ambas aceleraciones, el radio de curva, la distancia entre carriles y el peralte, se obtiene la velocidad máxima en la curva. La conversión de esta aceleración a velocidad, tiene un tratamiento distinto según sea vehículo convencional o un vehículo de caja inclinable.

Velocidad de circulación en curva para los vehículos convencionales

En los vehículos convencionales, la aceleración sin compensar en el plano de vía (γ_{sc}) no es, en realidad, la aceleración soportada por el viajero ya que la flexibilidad transversal de la suspensión del vehículo y la fuerza centrífuga que soporta éste hacen que la caja se incline hacia el exterior de la curva, provocando el efecto de una reducción en el peralte (el viajero sufre una inclinación menor que la que dispone la curva debido al peralte práctico). La aceleración soportada por el viajero se relaciona con la aceleración sin compensar mediante la siguiente fórmula:

$$\gamma_v = \gamma_{sc} \times (1 - \theta) + \gamma_{Defectvía} \qquad \text{(A.4. 3)}$$

Es decir,

$$\gamma_v = \left(\frac{V^2}{R} - \frac{h}{S} \times g\right) \times (1 - \theta) + \gamma_{Defectvía} \qquad \text{(A.4. 4)}$$

Donde:

- θ: es el coeficiente de souplesse o coeficiente de flexibilidad. Suele tomar valores entre 0,2 y 0,4, y
- $\gamma_{Defectvía}$: es una aceleración adicional provocada por los defectos de la vía (para una calidad de vía buena el valor es aproximadamente 0,2 m/s^2, (López Pita, 2006).

[41] UNE-ENV 13803-1:2006: Aplicaciones ferroviarias. Parámetros de proyecto del trazado de vía. Ancho de vía de 1.435mm y mayores. Parte: Plena vía

Por lo tanto, a la aceleración sin compensar de la vía se le pueden asignar valores del orden de 0,65m/s² y 1m/s² para que la aceleración soportada por el viajero no supere el 1 m/s² que se supone como buen nivel de confort.

Si se le asigna, por ejemplo, un valor de 1m/s² a la aceleración soportada por el viajero (nivel de confort muy bueno), menos 0,2m/s² de la aceleración adicional generada a causa de los defectos de la vía, conocido el ancho de vía y el peralte, se puede determinar, despejando de la ecuación anterior, la velocidad a la que puede circular el tren por la curva.

Suponiendo un peralte de 160mm, la velocidad se puede estimar a partir de las siguientes expresiones:

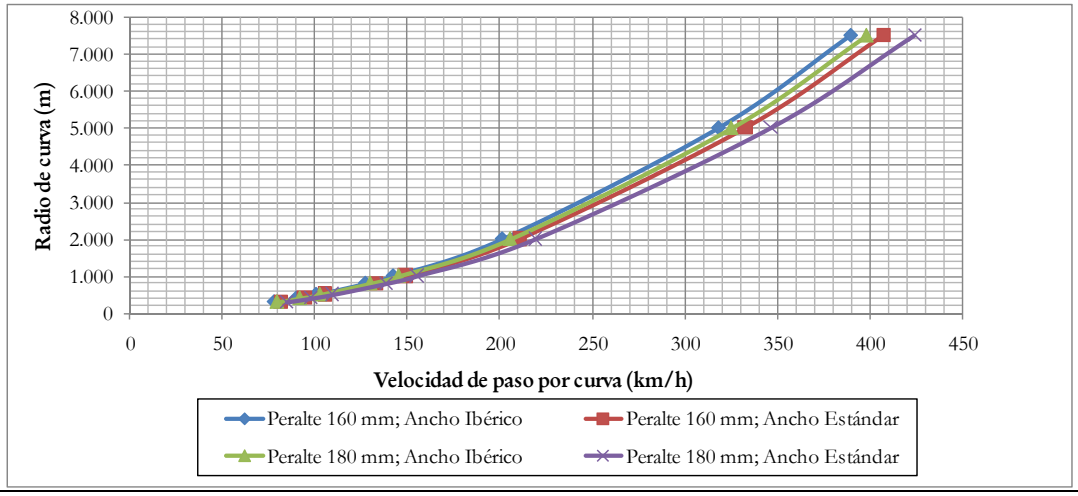
Ancho ibérico		Ancho estándar	
$V = 4{,}5\sqrt{R}$	(A.4. 5)	$V = 4{,}7\sqrt{R}$	(A.4. 6)

Con un peralte excepcional de 180mm, la velocidad se puede estimar a partir de las siguientes expresiones:

Ancho ibérico		Ancho estándar	
$V = 4{,}6\sqrt{R}$	(A.4. 7)	$V = 4{,}9\sqrt{R}$	(A.4. 8)

Tabla 150: Velocidades de paso por curva para distintos radios y distintos peraltes y anchos de vía.

Radio *(m)*	Velocidad para h=160mm *(km/h)*		Velocidad para h=180mm *(km/h)*	
	Ancho Ibérico	Ancho estándar	Ancho Ibérico	Ancho estándar
300	78	81	80	85
400	90	94	92	98
500	101	105	103	110
800	127	133	130	139
1000	142	149	145	155
2000	201	210	206	219
5000	318	332	325	346
7500	390	407	398	424



Fuente: Elaboración Propia.

Velocidad de circulación para los vehículos de cajas inclinables

En los vehículos de cajas inclinables, la caja rota (gira) hacia el interior de la curva y, por lo tanto, su efecto es el mismo que el de aumentar el peralte (al contrario que en el caso de los vehículos convencionales, en los que el coeficiente de "souplesse" provoca un efecto de disminución del peralte).

Por lo tanto, en trenes pendulares o inclinables, la aceleración percibida por el viajero es menor que la que se produce en el plano de la vía. O lo que es lo mismo, para una determinada aceleración percibida por el viajero, se puede admitir una mayor aceleración en el plano de la vía y, por ello, una mayor velocidad para el mismo radio y peralte.

Existen dos tipos de vehículos de caja inclinable:

- Los vehículos pendulares, que son los vehículos tipo Talgo con inclinación natural.
- Los vehículos basculantes, que son aquellos vehículos con inclinación forzada de la caja.

A continuación, se muestra una tabla en la que se indica el grado de inclinación de esta dependiendo del tipo de vehículo empleado.

Tabla 151: Grado de inclinación de los distintos tipos de vehículos de caja inclinable.

	Grado de inclinación	Tipo de Vehiculo (criterio Adif)
Pendulación natural	3º	B
Basculación forzada	6º	C
	8º	D

Fuente: Adif.

La aceleración aceptada por vehículo en el plano de vía, toma valores entre 1,2 y 1,8 m/s², dependiendo del grado de inclinación de la caja del vehículo, obteniéndose así aceleraciones soportadas por el viajero de 1 m/s². Para el cálculo de esta aceleración, Adif utiliza la siguiente expresión:

$$\gamma_{viajero} = \left(\frac{V^2}{R} - \frac{h}{s} \times g\right) \times \left(1 - \frac{\alpha}{10}\right) + \gamma_{Defectvía} \qquad \text{(A.4. 9)}$$

Donde:

- $\gamma_{Defectvía}$: corresponde a una aceleración adicional provocada por los defectos de vía y que suele tomar valores de 0,2 m/s² en el caso de vías de buena calidad;
- α: ángulo o grado de inclinación de la caja.

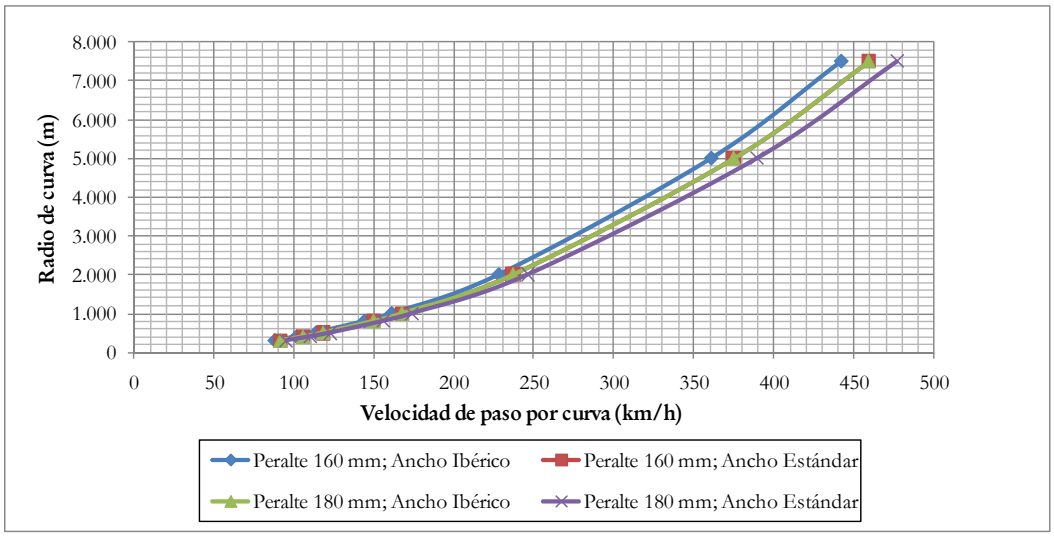
Si a la aceleración soportada por el viajero se le asigna un valor de 1m/s² (nivel de confort muy bueno), conocido el ancho de vía, el peralte y el ángulo de inclinación de la caja, se puede determinar, despejando de la ecuación anterior, la velocidad a la que puede circular el tren por curva. En el caso de trenes pendulares (3º de inclinación) y suponiendo un peralte de 160mm, la velocidad se puede calcular con las siguientes expresiones:

Ancho ibérico		Ancho estándar	
$V = 5{,}1\sqrt{R}$	(A.4. 10)	$V = 5{,}3\sqrt{R}$	(A.4. 11)

Si se supone un peralte excepcional de 180mm, la velocidad se puede calcular con las siguientes expresiones:

Ancho ibérico		Ancho estándar	
$V = 5{,}3\sqrt{R}$	(A.4. 12)	$V = 5{,}5\sqrt{R}$	(A.4. 13)

Tabla 152: Velocidades de paso por curva de los trenes pendulares para distintos radios, anchos de vía y distintos peraltes.



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de trenes basculantes (con 6º de inclinación), la expresión de la velocidad varía con respeto a los pendulares, permitiendo una mayor inclinación de la caja lo que supone mayores velocidades de paso por curva. A través de la siguiente fórmula y suponiendo los mismos parámetros que en el caso de trenes pendulares, se puede calcular la velocidad en curva de este tipo de trenes.

Para un peralte de 160 mm:

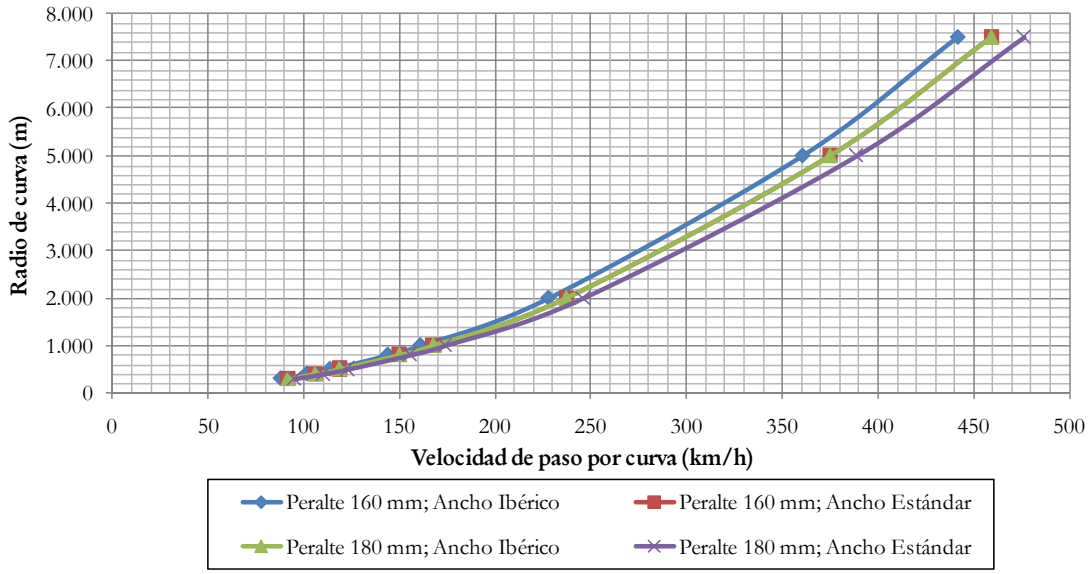
Ancho ibérico		Ancho estándar	
$V = 6{,}1\sqrt{R}$	(A.4. 14)	$V = 6{,}1\sqrt{R}$	(A.4. 15)

Para un peralte excepcional de 180 mm:

Ancho ibérico		Ancho estándar	
$V = 6{,}2\sqrt{R}$	(A.4. 16)	$V = 6{,}4\sqrt{R}$	(A.4. 17)

Tabla 153: Velocidades de paso por curva de los trenes pendulares para distintos radios, anchos de vía y distintos peraltes.

Radio *(m)*	Velocidad para h=160 mm *(km/h)*		Velocidad para h=180 mm *(km/h)*	
	Ancho Ibérico	Ancho estándar	Ancho Ibérico	Ancho estándar
300	106	109	107	111
400	122	126	124	128
500	136	141	139	143
800	173	178	175	181
1.000	193	199	196	202
2.000	273	282	277	286
5.000	431	445	438	453
7.500	528	546	537	554



Fuente: Elaboración propia.

ANEJO 5: PORCENTAJE DE TÚNEL, VIADUCTO Y MOVIMIENTO DE TIERRAS EN LA RED FERROVIARIA ESPAÑOLA

A continuación, se clasifica la gran parte de la red ferroviaria española según el tipo de relieve orografía que atraviesan.

Terreno suave

Se determinan los diferentes tramos de la red ferroviaria que están construidos sobre relieve suave o llano (pendientes medias entre: 0%< gradiente< 2,5%) y que, por lo tanto, se pueden clasificar como tramos llanos.

Para todos ellos se calcula la longitud y la velocidad máxima. Esta última se calcula como una media ponderada de todas las limitaciones de velocidad que existen en el tramo, es decir, se digitaliza el cuadro de velocidades máximas y se pondera en función de la longitud de cada punto kilométrico.

En cuanto a los porcentajes obras, se utilizan ya sea los perfiles de las líneas o el "Inventario de Túneles y Puentes Ferroviarios de España" (Melis Maynar, Jiménez Vega, & Cuéllar Villar, 2004) y (García Mateo, Jiménez Vega, & Cuéllar Villar, 2004). Se trata de dos catálogos con información geográfica (punto kilométrico) y longitud de todos los túneles y viaductos de la red ferroviaria española, actualizada al año 2004.

Tabla 154: Porcentaje de obra en terreno llano para los diferentes tramos de la red ferroviaria española.

Perfil llano							
Red de Alta Velocidad							
Linea	Tramo		Vel.	L. real	% Túnel	% Viaduct	% Mov. de
Madrid-Alicante	LAV (Bif Albacete-Albacete)	pk248,1-pk321	300	73	1,2%	0,7%	98,2%
Córdoba-Málaga	LAV (Bif Málaga-Antequera)	pk14,3-pk96,8	300	96,8	0,0%	7,2%	92,8%
Madrid-Sevilla	LAV (Tramo Córdoba-Sevilla)	pk343,6-pk470,4	250	126,8	0,39%	0,6%	99,0%
Madrid-Sevilla	LAV (Tramo Parla-Brazatortas)	pk24,4-225,4	300	201	0,0%	1,0%	99,0%
Madrid-Valladolid	LAV (Tramo Segovia AV-Valladolid)	pk68,2-pk179,3	300	111,1	2,3%	2,0%	95,8%
		Min	250	Min	0,0%	0,6%	92,8%
		Max	300	Max	2,3%	7,2%	99,0%
				Promedio	**0,8%**	**2,3%**	**96,9%**
Red Convencional							
Linea	Tramo		Vel.	L. real	% Túnel	% Viaduct	% Mov. de
León-Gijón	Tramo León-La Robla	pk122,6-pk147,6	160	25	0,0%	0,2%	99,8%
Venta de Baños-Santander	(Tramo Venta de Baños-Aguilar del Campoo)	pk 285,3-pk 394,5	160	109,2	0,2%	0,4%	99,5%
Venta de Baños-Santander	(Tramo Boo-Santander)	pk 506,9-pk 514,2	155	7,3	0,0%	0,0%	100,0%
Madrid-Hendaya	(Tramo Madrid Chamartín-Las Matas)	pk0-pk24	100	24	0,0%	1,6%	98,4%
Madrid-Hendaya	(Tramo Ávila-Burgos)	pk 120,6-pk373,4	160	252,8	0,0%	0,4%	99,6%
Palencia-A Coruña	(Tramo Palencia-Astorga)	pk297,3/0-pk174,4	160	174,4	0,0%	0,4%	99,6%
Ávila-Salamanca	(Tramo San Pedro del Arroyo-Salamanca)	pk36,1-pk111,1	155	75	0,0%	0,0%	100,0%
Madrid-Barcelona (por Caspe)	(Tramo Zaragoza-Zaida Sástago)	pk340,9-pk396,8	140	55,9	0,0%	0,1%	99,9%
Barcelona-Maçanet	(Tramo Malgrat de Mar-Maçanet)	pk55,7-pk75,3	150	19,6	0,2%	1,1%	98,7%
Barcelona-Sant Joan de les Abadeses	(Tramo Taradell-Torelló)	pk63,1-p85,1		22	0,0%	0,9%	99,1%
Huesca-Canfranc	(Tramo Bifurcación Canfranc-Ayerbe)	pk0-pk35	160	35	0,0%	0,0%	100,0%
Caminreal-Zaragoza	(Tramo Carriñena-bif Teruel)	pk70,7-pk113,6	200	42,9	0,0%	0,1%	99,9%
Tarragona-Port Bou (Cerbére)	(Tramo Celrá-Vilajuiga)	pk318,7-pk362,9	160	44,2	0,0%	2,0%	98,0%
Zaragoza-Barcelona por Lleida	(Tramo Miraflores-Sariñena)	pk0-pk90,9	160	90,9	0,0%	1,3%	98,7%
Zaragoza-Barcelona por Lleida	(Tramo Lleida Pirineus-Cervera)	pk183,6-pk240,1	155	56,5	0,0%	0,0%	100,0%
Zaragoza-Barcelona por Lleida	(Tramo Sabadell- Barcelona Sants)	pk345,8-pk369,9	140	24,1	0,0%	0,1%	99,9%
Lleida-Pobla del Segur	(Tramo Lleida-Balaguer)	Pk0-pk26,1	110	26,1	0,0%	0,2%	99,8%
Lleida-Reus	(Tramo Lleida-Les Borges Blanques)	pk0-pk24,6	160	24,6	0,0%	1,0%	99,0%
Reus-Tarragona	(Tramo Reus-Tarragona)	pk89,5-pk107,6	140	18,1	0,0%	0,0%	100,0%
Madrid-Alicante	(Tramo Madrid-Albacete)	pk0-pk278,7	200	278,7	0,0%	0,1%	99,9%
Aranjuez-Valencia	(Tramo Aranjuez-Cuenca)	pk0-pk151,5	140	151,5	0,0%	0,0%	100,0%
Aranjuez-Valencia	(Tramo Chiva-Valencia Nord)	pk318,7-pk355,4	140	36,7	0,0%	2,0%	98,0%
La Encina-Valencia	(Tramo Xátiva-Valencia Nord)	pk 48,4-pk112,7	160	64,3	0,0%	1,6%	98,4%
Caseta-Bilbao	(Tramo Casetas-Castejón de Ebro)	pk 15,4-pk93,7	160	78,3	0,0%	0,5%	99,5%
Calatayud-Valencia	(Tramo Caminreal-Teruel)	pk68,3-pk132,2	200	63,9	0,0%	0,0%	100,0%
Calatayud-Valencia	(Tramo Segorbe-Sagunto)	pk238,4-pk299,2	95	60,8	0,0%	0,6%	99,4%
Chinchilla-Cartagena	(Tramo Chinchilla-Hellín)	pk297,7-pk347,6	160	49,9	0,0%	0,1%	99,9%
Chinchilla-Cartagena	(Tramo Murcia-Cartagena)	pk460-pk524,6	160	64,6	0,0%	0,3%	99,7%
Sevilla-Cadiz	(Tramo Sevilla Santa Justa-Cadiz)	pk0-pk158,1	200	158,1	1,4%	1,1%	97,5%
Alcazar de San Juan-Sevilla	(Tramo Alcazar de San Juan-Manzanares)	pk148,1-pk197,3	160	49,2	0,0%	0,1%	99,9%
Alcazar de San Juan-Sevilla	(Tramo Almodovar-Sevilla)	pk463,1-pk571,1	160	108	0,0%	0,4%	99,6%
Campo Real (Puente Genil)-Linares	(Tramo Jaén - Espeluy)	pk119,2-pk152,1	140	32,9	0,0%	0,6%	99,4%
Córdoba-Málaga	(Tramo Córdoba-Bobadilla)	pk0-pk123,1	155	123,1	0,0%	0,5%	99,5%
Mérida-Los Rosales	(Tramo Mérida-Zafra)	pk0-pk65,2	155	65,2	0,0%	0,9%	99,1%
Zafra-Huelva	(Tramo Calañas-Huelva)	pk129,8-pk180,9	140	51,1	0,0%	0,6%	99,4%
Bobadilla(Antequera)-Algeciras	(Tramo Jimena de la Frontera-Algeciras)	pk134,6-pk176,2	125	41,6	0,0%	0,9%	99,1%
Bobadilla(Antequera)-Algeciras	(Tramo Bobadilla-Ronda)	pk0-pk70,4	140	70,4	0,0%	0,3%	99,7%
Linares (Baeza)-Almería	(Tramo Huercal-Almería)	pk243,9-pk250,6	110	6,7	0,0%	0,0%	100,0%
Madrid-Badajoz	(Tramo Almorchón-Badajoz)	pk331,7-pk512,3	160	180,6	0,1%	1,0%	98,9%
Madrid-Valencia de Alcántara	(Tramo Bifurcación Planetario-Monfragüe)	pk 3,7-pk255,4	160	251,7	0,1%	0,3%	99,7%
Medina del Campo-Zamora	(Tramo Medina del Campo-Zamora)	pk 0-pk89,5	140	89,1	0,0%	0,3%	99,7%
Bif Los Naranjos-Huelva Término	(Tramo Bif Los Naranjos-Huelva Término)	pk 0-pk109,1	140	109,1	0,0%	3,2%	96,8%
Alicante-El Reguerón	(Tramo Alicante-El Reguerón)	pk 0-pk63,6	140	63,6	0,0%	0,5%	99,5%
Aljucén-Cáceres	(Tramo Aljucén-Cáceres)	pk 0-pk66,0	140	66	0,0%	0,2%	99,8%
Madrid-Valencia de Alcántara	(Tramo Bifurcación Cáceres-Valencia de Alcántara)	pk 332,8-pk420	90	87,2	0,0%	0,2%	99,8%
		Min	90	Min	0,0%	0,0%	96,8%
		Max	200	Max	1,4%	3,2%	100,0%
				Promedio	**0,04%**	**0,6%**	**99,4%**

Fuente: Elaboración propia.

Terreno semillano

La caracterización de los tramos que transcurren en terreno semillano, se realiza de la misma manera que en los tramos llanos. Por tanto, se emplean: (i) los *"Cuadros de Velocidades Máximas"* y los perfiles pertenecientes a Adif y (ii) los inventarios, tanto de túneles como de puentes de la red ferroviaria española. La mayor parte de estos tramos corresponden a partes de líneas ferroviarias que en realidad atraviesan zonas montañosas, pero como su velocidad máxima no es excesivamente elevada, son capaces de "escapar" de esas cadenas montañosas y trazar su infraestructura por zonas con menores gradientes, de ahí el bajo porcentaje de túneles y puentes construidos para salvar esas dificultades orográficas.

A continuación se muestran los diferentes tramos considerados como semillanos y la cantidad de obra que ha sido necesario construir (Tabla 155).

Tabla 155: Porcentaje de obra en terreno semillano para los diferentes tramos de la red ferroviaria española.

Perfil Semillano							
Red de Alta Velocidad							
Linea	**Tramo**		**Vel.**	**L. real**	**% Túnel**	**% Viaducto**	**% Mov. de**
Madrid-Valencia	LAV (bif torrejón de Velasco-Cuenca)	pk35,191-pk195,1	350	160,7	8,3%	5,2%	86,5%
Madrid-Sevilla	LAV (Tramo Madrid-Parla)	pk0-pk24,4	270	24,4	1,6%	3,1%	95,2%
Madrid-Barcelona	LAV (Tramo Madrid-Guadalajara)	pk0-pk64,4	350	64,4	6,5%	9,7%	83,8%
La Sagra-Toledo	LAV (La Sagra-Toledo)	pk0-pk20,8	220	20,8	0,0%	9,8%	90,2%
Madrid-Barcelona	LAV(Ricla-Les Borges Blanques)	pk251,1-pk456,9	350	205,8	4,1%	7,3%	88,6%
		Min	220	Min	0,0%	3,1%	83,8%
		Max	350	Max	8,3%	9,8%	95,2%
				Promedio	**4,1%**	**7,0%**	**88,9%**
Red Convencional							
Linea	**Tramo**		**Vel.**	**L. real**	**% Túnel**	**% Viaducto**	**% Mov. de**
Betanzos-Ferrol	(Tramo Betanzos-Ferrol)	pk 0-pk 42,9	100	42,9	3,0%	0,8%	96%
Madrid-Hendaya	(Tramo Las Matas-El Escorial)	pk 24-pk 50,3	160	26,3	1,0%	0,0%	99%
Madrid-Hendaya	(Tramo Burgos-Altsasu)	pk 373,4-pk 535,5	200	162,1	1,9%	0,5%	97,6%
Madrid-Burgos	(Tramo Tres Cantos- Soto del Real)	pk15-pk43,3	130	28,3	1,9%	0,6%	97,5%
Madrid-Burgos	(Tramo Riaza-Bif. Aranda)	pk121-pk280,6	130	159,6	1,8%	0,3%	97,9%
Castejón-Bilbao	(Tramo Castejón-Miranda del Ebro)	pk0-pk146	140	146	0,8%	0,5%	98,7%
Palencia-A Coruña	(Tramo Monforte de Lemos-A Coruña)	pk361,2-pk550,8	160	189,6	2,3%	0,4%	97,3%
Zamora-A Coruña	(Tramo Zamora-Puebla de Sanabria)	pk0-pk106,9	125	106,9	2,0%	0,9%	97,1%
Zamora-A Coruña	(Tramo Santiago de Compostela-A Coruña)	pk378,5-pk439,2	200	60,4	32,7%	3,1%	78,8%
Ávila-Salamanca	(Tramo Ávila-San Pedro del Arroyo)	pk0-pk36,1	155	36,1	3,8%	0,4%	95,7%
Monforte de Lemos-Vigo	(Tramo Monforte-Vigo)	pk0-pk177,8	160	177,8	2,8%	0,6%	96,6%
Redondela-Santiago	(Tramo Redondela-Santiago)	pk0-pk92	140	92	2,2%	0,6%	97,2%
Villabona-San Juan de Nieva	(Tramo Tudela Villabona-Avilés)	pk 0-pk17,7	140	17,7	2,8%	0,0%	97,2%
Madrid-Barcelona (por Caspe)	(Tramo Madrid Atocha Cercanías-Zaragoza)	pk0-pk340,9	160	340,9	3,4%	0,6%	96,0%
Barcelona-Maçanet	(Tramo Barcelona Sagrera-Malgrat del Mar)	pk0,9-pk55,7	140	54,8	2,3%	0,7%	97,0%
Barcelona-Sant Joan de les Abadeses	(Tramo Barcelona-Taradell)	pk0-pk63,1	-	63,1	0,8%	1,6%	97,6%
Huesca-Canfranc	(Tramo Ayerbe-Jaca)	pk35-pk110,2	120	75,2	3,3%	0,7%	96,0%
Caminreal-Zaragoza	(Tramo Caminreal-Villarreal de Huerva)	pk0- pk45,6	200	45,6	1,8%	0,2%	98,0%
Tarragona-Port Bou (Cerbére)	(Tramo Tarragona-Celrá)	pk0-pk318,7	160	318,7	1,1%	1,3%	97,5%
Zaragoza-Barcelona por Lleida	(Tramo Sariñena- Lleida Pirineus)	pk90,9-pk183,6	160	92,7	2,2%	0,4%	97,4%
Lleida-Reus	(Les Borges Blanques-L´Espluga)	pk24,6-pk53,1	160	28,5	2,5%	0,0%	97,5%
Madrid-Alicante	(Tramo Albacete-Alicante)	pk278,7-pk454,7	200	176	0,3%	0,5%	99,3%
Valencia-Tarragona	(Tramo Valencia Nord-Tarragona)	pk0-pk275,6	220	275,6	4,2%	1,4%	94,4%
Aranjuez-Valencia	(Tramo Aranjuez-Cuenca)	pk0-pk151,5	140	151,5	0,0%	0,0%	100,0%
Calatayud-Valencia	(Tramo Teruel-Segorbe)	pk132,2-pk238,4	140	106,2	1,5%	0,9%	97,6%
Chinchilla-Cartagena	(Tramo Hellín-Murcia)	pk347,6-pk460	160	112,4	1,4%	0,4%	98,2%
Alcazar de San Juan-Sevilla	(Tramo Manzanares-Almodovar)	pk197,3-pk463,1	160	265,8	2,0%	0,5%	97,5%
Linares (Baeza)-Almería	(Tramo Linares-La Calahorra)	pk0-pk163,1	140	163,1	0,9%	1,5%	97,6%
Mérida-Los Rosales	(Tramo Zafra-Los Rosales)	pk65,2-pk204,3	100	139,1	0,7%	0,6%	98,7%
Zafra-Huelva	(Tramo Zafra-Cumbres Mayores)	pk0-pk63	130	63	0,1%	0,1%	99,7%
Zafra-Jerez de los Caballeros	(Tramo Zafra-Jerez de los Caballeros)	pk0-pk46,7	70	46,7	3,1%	0,0%	96,9%
Silla-Gandía	(Tramo Silla-Gandía)	pk0-pk50,8	140	50,8	3,4%	0,1%	96,5%
Madrid-Badajoz	(Tramo Ciudad Real-Almorchón)	pk175-pk331,7	140	156,7	0,2%	0,4%	99,4%
Madrid-Valencia de Alcántara	(Tramo Monfraüe-Cáceres)	pk255,4-pk332,8	155	77,4	4,7%	1,8%	93,5%
Moreda-Granada	(Tramo Moreda-Granada)	pk0-pk56,7	140	56,7	0,6%	0,8%	98,6%
Castejón de Ebro-Alsasua	(Tramo Castejón de Ebro-Alsasua)	pk93,7-pk232,9	140	139,2	0,1%	1,2%	98,7%
Águilas-Murcia Cargas	(Tramo Águilas-Alcantarilla)	pk0-pk232,10	140	108,1	0,1%	1,6%	98,3%
Bobadilla-Granada	(Tramo Bobadilla-Granada)	pk0-pk122,3	155	122,3	0,0%	1,2%	98,8%
		Min	70	Min	0,0%	0,0%	78,8%
		Max	220	Max	20,9%	1,8%	100,0%
				Promedio	**2,3%**	**0,7%**	**97,0%**

Fuente: Elaboración propia.

Terreno Montañoso

Los tramos de línea ferroviaria considerados montañosos son los siguientes (Tabla 156):

Tabla 156: Porcentaje de obra en terreno montañoso para los diferentes tramos de la red ferroviaria española.

Perfil Montañoso							
Red de Alta Velocidad							
Linea	Tramo		Vel.	L. real	% Túnel	% Viaducto	% Mov. de tierras
Madrid-Valencia	LAV (Cuenca-Chiva)	pk195,1-pk373,5	300	178,4	13,67%	6,04%	80,28%
Madrid-Barcelona	LAV (Tramo Guadalajara-Ricla)	pk64,4-pk251,1	310	186,7	9,18%	5,20%	85,62%
Madrid-Barcelona	LAV (Les Borges Blanques-Barcelona Sants)	pk456,9-pk621,4	300	164,5	10,42%	5,90%	83,68%
Madrid-Sevilla	LAV (Tramo Brazatortas-Córdoba)	pk225,4-pk343,6	270	118,2	13,29%	4,08%	82,62%
Córdoba-Málaga	(Tramo Antequera Santa Ana-Málaga)	pk96,8-pk154,6	300	57,8	31,69%	8,09%	60,22%
Orense-Santiago	LAV (Orense-Santiago)	pk0-pk82,06	300	82,06	33,11%	23,69%	43,19%
		Min	270	Min	9,2%	4,1%	43,2%
		Max	310	Max	33,1%	23,7%	85,6%
				Promedio	**18,6%**	**8,8%**	**72,6%**
Red Convencional							
Linea	Tramo		Vel.	L. real	% Túnel	% Viaducto	% Mov. de tierras
Venta de Baños-Santander	Puerto Pozazal (Tramo Aguilar de Campoo-Boó)	pk 394,5-pk506,9	155	112,4	6,64%	0,82%	92,54%
León-Gijón	(Tramo Pola de Lena-Oviedo)	pk 230,7-pk261,7	130	31	18,79%	1,24%	79,97%
León-Gijón	(Tramo Oviedo-Gijón)	pk 261,7-pk 293,59	140	31,89	5,9%	1,2%	93%
Madrid-Hendaya	Puerto de la Cañada (Tramo El Escorial-Ávila)	pk 50,3-pk120,6	160	69,6	6,52%	0,45%	93,03%
Villalba-Segovia	Paso de Tablada (Tramo Villalba-Segovia)	pk0-pk62,7	100	62,7	5,52%	0,00%	94,48%
Castejón-Bilbao	Rampa de Orduña (Tramo Miranda de Ebro-Bilbao)	pk146 -pk249,2	140	103,2	3,31%	1,16%	95,53%
Palencia-A Coruña	(Tramo Astorga-Monforte de Lemos)	pk 174,4-pk 361,2	160	186,8	9,01%	0,71%	90,28%
Bif. Tudela- El Entrego	(Bif. Olloniego- El Entregto)	pk 2,3-pk 21,5	130	19,2	3,88%	1,01%	95,11%
Zamora-A Coruña	(Tramo Paderne-Santiago de Compostela)	pk224,85-pk379,15	140	154,3	14,68%	0,92%	84,40%
Madrid-Barcelona (por Caspe)	(Tramo Zaida Sástago-Barcelona Sants)	pk396,8-pk677,9	140	281,1	13,42%	1,24%	85,34%
Barcelona-Sant Joan de les Abadesses	(Tramo Torelló-Sant Joan de les Abadesses)	p85,1-pk110	80	24,9	5,29%	1,97%	92,74%
Caminreal-Zaragoza	(Tramo Villarreal de Huerva-Cariñena)	pk45,6-pk70,7	200	25,1	8,89%	0,48%	90,63%
Zaragoza-Barcelona por Lleida	(Tramo Cervera- Manresa)	pk240,1-pk301,7	155	61,6	4,3%	0,0%	95,7%
Zaragoza-Barcelona por Lleida	(Tramo Manresa-Sabadell)	pk 301,7-pk345,8	160	44,1	18,89%	2,02%	79,09%
Lleida-Reus	(Tramo L´Espluga-Reus)	pk53,1-pk89,5	130	36,4	3,87%	1,12%	95,01%
Aranjuez-Valencia	(Tramo Cuenca-Chiva)	pk151,5-pk318,7	140	167,2	7,33%	1,27%	91,40%
La Encina-Valencia	(Tramo La Encina-Xátiva)	pk0-pk 48,4	220	48,4	6,26%	5,55%	88,19%
Xátiva-Alcoy	(Tramo Xátiva-Alcoy)	pk0-pk63,7	90	63,7	5,17%	0,41%	94,41%
Linares (Baeza)-Almería	(Tramo La Calahorra-Huercal)	pk163,1-pk243,9	110	80,8	3,44%	1,57%	94,99%
Zafra-Huelva	(Tramo Cumbres Mayores-Calañas)	pk63-pk129,8	85	66,8	7,66%	0,62%	91,72%
Torralba-Castejón de Ebro	(Tramo Soria-Castejón de Ebro)	pk0-pk93,7	120	93,7	4,4%	0,2%	95,5%
Bobadilla(Antequera)-Algeciras	(Tramo Ronda-Jimena de la Frontera)	pk70,4-pk134,6	125	64,2	5,83%	0,31%	93,87%
		Min	80	Min	3,3%	0,0%	79,1%
		Max	220	Max	18,9%	5,6%	95,7%
				Promedio	**7,7%**	**1,1%**	**91,2%**

Fuente: Elaboración propia

Terreno muy montañoso

En la red ferroviaria española no existen una gran cantidad de tramos ya construidos considerados muy montañosos porque el propio sistema ferroviario permite trazados más sinuosos reduciéndose la velocidad máxima al paso por relieves tan accidentados. Pero, en algunos casos, es ineludible el paso por zonas muy montañosas, más aún si se habla de líneas con altas velocidades máximas que, como consecuencia de esto, ven limitados sus radios de curva.

A continuación se muestran aquellos casos o tramos que son muy montañosos (Tabla 157) según la clasificación topográfica definida anteriormente:

Tabla 157: Porcentaje de obra en terreno muy montañoso para los diferentes tramos de la red ferroviaria española.

Perfil Muy Montañoso							
Red de Alta Velocidad							
Linea	**Tramo**		**Vel.**	**L. real**	**% Túnel**	**% Viaducto**	**% Mov. de**
León-Gijón AV	(Tramo La Robla-TúnelesPajares-Pola de Lena)	pk2,9-pk49,7	300	46,7	86,6%	3,9%	9,5%
Madrid-Valladolid	(Tramo Madrid-Segovia AV)	pk0-pk68,2	300	68,2	60,4%	5,4%	34,2%
		Min	300	Min	60,4%	3,9%	9,5%
		Max	300	Max	86,6%	5,4%	34,2%
				Promedio	**73,5%**	**4,6%**	**21,9%**
Red Convencional							
Linea	**Tramo**		**Vel.**	**L. real**	**% Túnel**	**% Viaducto**	**% Mov. de**
León-Gijón	Puerto de Pajares	pk 147,6-pk 230,7	105	83,1	41,0%	1,2%	57,8%
Madrid-Hendaya	Rampa de Alasuna	pk 535,5-pk641,6	100	106,1	13,5%	1,3%	85,2%
Madrid-Burgos	(Tramo Soto del Real-Riaza)	pk 43,3-pk121	80	77,7	21,3%	1,7%	76,9%
Zamora-A Coruña	Alto del Padornelo	pk106,9-pk224,8	80	117,95	36,7%	0,1%	63,1%
Soto de Rey-Bif. Olloniego	(Tramo Soto delRey-Bif. Olloniego)	pk 0-pk 2,3	80	2,3	31,30%	0,00%	68,70%
Bilbao-Santurtzi	(Tramo Bilbao-Santurtzi)	pk0-pk13,3	70	13,3	38,33%	0,51%	61,16%
Huesca-Canfranc	(Tramo Jaca-Canfranc)	pk0-pk24,7	120	24,7	38,1%	1,8%	60,1%
Tarragona-Port Bou (Cerbére)	(Tramo Vilajuiga-Port Bou)	pk362,9-377,1	90	14,2	26,2%	1,7%	72,0%
Tudela Veguín-Lugo de Llanera	(Tramo Tudela Veguín-Lugo de Llanera)	pk 0-pk14,1	100	14,1	27,6%	0,7%	71,7%
Lleida-Pobla del Segur	(Tramo Balaguer-Pobla de Segur)	pk26,1-pk 89,8	60	63,7	22,9%	1,1%	76,0%
Ripoll-Puigcerdá	(Tramo Ripoll-Puigcerdá)	pk0-pk 48,6	60	48,6	21,7%	0,8%	77,6%
Córdoba-Málaga	(Tramo Bobadilla-Málaga)	pk123,1-pk187,7	160	64,6	19,6%	1,4%	79,0%
Málaga-Fuengirola	(Málaga M. Zambrano-Fuengirola)	pk0-pk30,2	135	30,2	17,3%	5,9%	76,8%
		Min	60	Min	13,5%	0,0%	57,8%
		Max	160	Max	41,0%	5,9%	85,2%
				Promedio	**27,3%**	**1,4%**	**71,3%**

Fuente: Elaboración propia

ANEJO 6: DEMANDAS MENSUALES CORREDOR DE LEVANTE

A continuación se muestra la demanda en el corredor de Levante en el año 2011 desagregado por meses (Tabla 158):

Tabla 158: Demandas por relaciones origen-destino en 2011.

Origen	Destino	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total anual
Madrid	Cuenca	5.820	5.839	6.927	7.656	6.979	5.774	4.830	3.934	4.855	5.855	5.029	5.301	68.799
Madrid	Valencia	68.508	75.009	89.168	85.547	84.098	88.063	80.839	55.964	75.424	77.246	76.797	70.419	927.082
Madrid	Castellón	2.709	2.856	3.296	3.725	3.553	3.734	3.635	3.328	3.268	3.536	3.476	4.142	41.258
Madrid	Albacete	11.006	11.901	13.531	13.147	13.176	12.840	10.677	7.823	12.348	12.406	12.236	12.965	144.056
Madrid	Alicante	19.590	18.749	22.870	29.656	24.033	31.464	41.031	37.394	28.704	24.952	23.977	27.563	329.983
Madrid	Murcia	9.368	9.389	10.417	11.665	10.931	10.739	10.587	8.718	10.513	10.698	10.351	12.187	125.563
Cuenca	Valencia	2.754	2.498	4.263	3.629	3.696	2.980	2.654	2.713	2.706	2.677	2.543	2.491	35.604
Cuenca	Castellón	82	43	79	76	93	48	79	65	49	55	38	68	775
Cuenca	Albacete	1.801	2.041	2.235	1.899	2.072	1.957	939	556	1.340	1.552	1.653	1.691	19.736
Cuenca	Alicante	335	331	368	403	465	472	622	624	442	394	288	390	5.134
Valencia	Castellón	483	485	624	557	607	485	468	504	469	628	621	473	6.404
Albacete	Alicante	1.904	1.899	2.270	2.586	2.648	3.024	3.258	2.728	2.867	2.361	2.324	2.191	30.060
Albacete	Murcia	268	282	344	378	403	350	459	318	480	473	406	455	4.616
Cuenca	Madrid	6.304	5.840	6.999	7.580	7.276	5.727	4.921	4.002	4.939	6.090	5.428	5.172	70.278
Valencia	Madrid	67.002	74.335	87.067	82.429	83.393	84.971	78.884	54.876	75.356	76.250	77.610	69.552	911.725
Castellón	Madrid	2.642	2.885	3.420	3.537	3.632	3.628	3.837	3.651	3.514	3.684	3.469	4.060	41.959
Albacete	Madrid	11.940	11.846	13.634	12.483	13.240	12.753	10.411	7.656	11.995	12.006	12.591	11.726	142.281
Alicante	Madrid	19.387	18.062	21.890	26.454	24.174	27.447	36.393	38.722	31.100	24.765	24.994	26.992	320.380
Murcia	Madrid	9.805	9.426	10.252	10.998	11.611	10.654	10.317	8.245	10.630	10.427	11.035	11.244	124.644
Valencia	Cuenca	2.471	2.477	4.255	3.933	3.438	3.180	3.031	2.993	2.777	2.862	2.462	2.833	36.712
Castellón	Cuenca	86	58	66	71	81	60	79	63	49	44	48	70	775
Albacete	Cuenca	1.880	2.138	2.234	1.951	2.118	2.017	999	537	1.422	1.638	1.865	1.586	20.385
Alicante	Cuenca	306	329	357	423	357	526	647	607	449	431	286	398	5.116
Castellón	Valencia	500	514	682	550	582	523	511	564	583	516	504	496	6.525
Alicante	Albacete	1.789	1.906	2.321	2.599	2.433	2.794	3.032	2.885	3.170	2.591	2.218	2.452	30.190
Murcia	Albacete	253	310	362	387	353	335	424	319	494	477	387	485	4.586

Fuente: Elaboración propia con datos de Adif.

ANEJO 7: CARACTERÍSTICAS Y COSTES DE DIFERENTES LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD

A continuación, se muestran diferentes características y costes de diferentes líneas de alta velocidad planificadas y construidas en diferentes países de la Unión Europea:

Tabla 159: Líneas de alta velocidad europeas: características y costes.

	Año 1997					
	BV/SJ	BV/SJ	DB AG	DB AG	DB AG	FS
	Hamstad-Angelholm	**Flemingberg-Jarna**	**Nunberg-Ingolstadt**	**Cologne-Rhein/Main**		**Rome-Naples**
	Troninge-Bastard	pk16,5-pk52,7	Nunberg-Ingolstadt	Cologne-Rhein/Main	Hufelden-Hattersheim	Sección 2-3-4
Puesta en servicio	-	-	-	-	-	2002
km de explotación	23	35	89	204	49	222,4
Velocidad máxima de diseño (km/h)	250	250	300	300	300	300
Tipo de tráfico	Mixto	Mixto		Viajeros	Viajeros	Mixto
Rampa máxima línea	10	10	20	40	38,5	21
Volumen de terraplenes (Mm^3)	0,75	1,75	35	6,53	1,6	13,88
Volumen de trincheras (Mm^3)	1	1,75	40	13,02	3,35	8,65
Volumen terraplén/kilómetro de línea (Mm^3/km)	0,033	0,050	0,393	0,032	0,033	0,062
Volumen de trinchera/kilómetro de línea (Mm^3/km)	0,043	0,050	0,449	0,064	0,068	0,039
Longitud puentes y viaductos (m)	444	3.325	2.000	9.360	2.043	55.260
Longitud túneles (m)	0	6.780	25.000	38.924	12.976	38.999
% túnel	0,00%	19,37%	28,09%	19,08%	26,48%	17,54%
% Viaducto	1,93%	9,50%	2,25%	4,59%	4,17%	24,85%
% Movimiento de tierras	98,07%	71,13%	69,66%	76,33%	69,35%	57,62%
Coste total (M€)	92,03	288,44	1519	4355,04	864,319	3513,15
Costes Ingeniería Civil	38,0	202,1	683,5	1620,4	552,5	2317,9
Coste por kilómetro (M€/km)	**4,0**	**8,2**	**17,1**	**21,3**	**17,6**	**15,8**

	Año 1997						
	GIF	GIF	GIF	GIF	RENFE	SNCB	SNCF
	Madrid-Barcelona	**Madrid-Barcelona**	**Madrid-Barcelona**	**Madrid-Barcelona**	**Madrid-Sevilla**	**Bruxelles-Frontiere FR**	**TGV Mediterranee**
	Gajanejos-Calatayud	Calatayud-Ricla	Zaragoza-Lleida	Infraestructura (50%)	Getafe-Córdoba	Tubize (km 17)-Frontiere	Valence-Marseille
Puesta en servicio	-	-	-	-	-	1.997	2.001
km de explotación	128,8	35,0	138,8	302,6	311,9	74,3	217,0
Velocidad máxima de diseño (km/h)	350,0	350,0	350,0	350,0	270,0	320,0	350,0
Tipo de tráfico	-	-	-	-	-	Viajeros	Viajeros
Rampa máxima línea	25,0	25,0	25,0	25,0	14,9	21,0	35,0
Volumen de terraplenes (Mm^3)	12,5	5,4	18,5	36,4	28,7	4,2	39,7
Volumen de trincheras (Mm^3)	19,0	5,7	20,5	45,2	35,0	9,5	30,0
Volumen terraplén/kilómetro de línea (Mm^3/km)	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
Volumen de trinchera/kilómetro de línea (Mm^3/km)	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Longitud puentes y viaductos (m)	2.700	1.175	37	7.612	4.461	2.912	27.666
Longitud túneles (m)	7.615	9.354	2.832	19.801	9.542	626	14.025
% túnel	0,1	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
% Viaducto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
% Movimiento de tierras	0,9	0,7	1,0	0,9	1,0	1,0	0,8
Coste total (M€)	324,4	174,3	364,0	862,7	1.114,8	657,6	2.990,0
Costes Ingeniería Civil	312,0	170,7	352,2	834,9	730,5	333,5	1.334,7
Coste por kilómetro (M€/km)	**2,5**	**5,0**	**2,6**	**2,9**	**3,6**	**8,9**	**13,8**

	Año 1995						
	DB AG	DB AG	DB AG	FS	FS	FS	FS
	Mannheim-Stuttgart	**Hannover-Wurzburg**	**Cologne-Frankfurt**	**Turin-Milan**	**Milan-Bologne**	**Bologne-Florence**	**Rome-Naples**
	-	S1-S2-S3	-	-	-	-	S1-S2-S3
Puesta en servicio	-	-	-	-	-	-	-
km de explotación	106,5	309,3	110,7	129,4	212,9	76,9	224
Velocidad máxima de diseño (km/h)	250	250	300	300	300	300	300
Tipo de tráfico	Mixto	Mixto	-	-	-	-	-
Rampa máxima línea	12,5	12,5	40	15	18	18	21
Volumen de terraplenes (Mm^3)	14	40,22	5,1	17,55	16,2	5	14
Volumen de trincheras (Mm^3)	8	22,54	11,13	4,31	5	0,26	9,5
Volumen terraplén/kilómetro de línea (Mm^3/km)	0,131	0,130	0,046	0,136	0,076	0,065	0,063
Volumen de trinchera/kilómetro de línea (Mm^3/km)	0,075	0,073	0,101	0,033	0,023	0,003	0,042
Longitud puentes y viaductos (m)	5.000	24.700	7.030	17.790	2.500	2.320	43.480
Longitud túneles (m)	15.000	124.400	24.000	0	0	68.370	30.500
% túnel	0,1	0,4	0,2	0,0	0,0	0,9	0,1
% Viaducto	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2
% Movimiento de tierras	0,8	0,5	0,7	0,9	1,0	0,1	0,7
Coste total (M€)	2.520,6	6.062,8	2.350,0	1.775,3	2.528,0	1.873,0	3.117,0
Costes Ingeniería Civil	1.807,4	4.722,8	1.757,0	1.202,0	1.711,0	1.557,7	2.228,8
Coste por kilómetro (M€/km)	**23,7**	**19,6**	**21,2**	**13,7**	**11,9**	**24,4**	**13,9**

	Renfe	SNCB	SNCB	SNCF	SNCF	SCNF	SCNF
	Madrid-Sevilla	**Bruxelles-Frontiere F.**	**Bruxelles-A. La Chapelle**	**Rhone-Alpes**	**Paris-Nord**	**Paris-Est**	**Paris-Mediterranee**
	S2-S3	S1	S2-S3	-	S1-S2	S1-S2	S1-S2
Puesta en servicio	-	-	-	-	-	-	-
km de explotación	457,1	74,3	85,6	116,2	335,9	443	314
Velocidad máxima de diseño (km/h)	300	300	300/220	300	300	300	300
Tipo de tráfico	-	-	-	-	-	-	-
Rampa máxima línea	12,5	21	15/20	35	25	35	35
Volumen de terraplenes (Mm^3)	37,91	7,8	9,69	18,1	28,4	49,6	32,2
Volumen de trincheras (Mm^3)	47,3	11,21	8,84	25	27	82,3	33,7
Volumen terraplén/kilómetro de línea (Mm^3/km)	0,083	0,105	0,113	0,156	0,085	0,112	0,103
Volumen de trinchera/kilómetro de línea (Mm^3/km)	0,103	0,151	0,103	0,215	0,080	0,186	0,107
Longitud puentes y viaductos (m)	7640	2900	3640	4430	5600	5870	13710
Longitud túneles (m)	15660	0	6100	5370	0	3930	10500
% túnel	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
% Viaducto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
% Movimiento de tierras	0,9	1,0	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9
Coste total (M€)	2.511,5	623,9	1.001,0	1.011,3	2.128,2	3.486,6	3.622,0
Costes Ingeniería Civil	1.445,8	354,7	755,2	760,5	1.432,6	2.358,9	2.621,0
Coste por kilómetro (M€/km)	**5,5**	**8,4**	**11,7**	**8,7**	**6,3**	**7,9**	**11,5**

ANEJO 8: TABLAS Y FIGURAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fases del proceso analítico necesario para la evaluación de la viabilidad de una nueva infraestructura ferroviaria. 14

Figura 2. Influencia de las variables gestionables en un ACB. 15

Figura 3. Factores que afectan al cálculo de la velocidad óptima. 19

Figura 4. Diferentes velocidades máximas por tramos de una línea que suponen diferentes ingresos y costes. 20

Figura 5. Metodología de cálculo empleado en la tesis. 22

Figura 6. Ejemplo de red ferroviaria para aplicación de metodología. 25

Figura 7. Aplicación del modelo en una única ruta del ejemplo ilustrativo considerado. 27

Figura 8. Aplicación del modelo en un corredor, considerando diferentes rutas dentro del ejemplo ilustrativo expuesto. 28

Figura 9. Aplicación del modelo en un corredor, considerando diferentes rutas dentro del ejemplo ilustrativo expuesto. 29

Figura 10. Proceso de evaluación de un proyecto correspondiente a una nueva línea ferroviaria. 35

Figura 11. Evaluación financiera teniendo en cuenta el flujo neto de caja para el conjunto (gestor y operador). 36

Figura 12. Evaluación socio-económica de los proyectos de infraestructuras ferroviarias 38

Figura 13. Parámetros de los que depende el “valor de la infraestructura”. 40

Figura 14. Evolución de la velocidad media en diferentes países. 43

Figura 15. Evolución de los tiempos de viaje desde Madrid. 46

Figura 16. Curva característica del tren hibrido de la serie 730 de Talgo. 47

Figura 17. Cuadro de velocidades máximas para el tramo de la línea de AV Valencia-Bif. Torrejón de Velasco 48

Figura 18. Combinaciones de velocidades máximas que aportan la misma velocidad media estática. 50

Figura 19. Velocidades comerciales para distintas velocidades máximas por trazado 51

Figura 20. Relación entre la velocidad comercial, la velocidad media estática y la velocidad máxima combinada. 51

Figura 21. Diferentes alternativas de trazados que unen las ciudades A y B 52

Figura 22. Diferentes combinaciones de velocidades máximas para un mismo trazado (L1) con rentabilidades diferentes. 53

Figura 23. Representación del comportamiento de un tren ante una limitación de velocidad. 54

Figura 24. Representación gráfica del proceso de deceleración. 55

Figura 25. Representación gráfica del proceso de aceleración. 57

Figura 26. Representación gráfica del tiempo perdido en proceso de deceleración. 62

Figura 27. Representación gráfica del tiempo perdido en proceso de aceleración. 64
Figura 28. Representación gráfica del tiempo perdido en una parada 65
Figura 29. Modelo clásico de transporte de cuatro etapas. 72
Figura 30. Corredor de Levante de Alta Velocidad. 73
Figura 31. Porcentaje de demanda inducida debido a la reducción de tiempo que supone la puesta en servicio del tren de alta velocidad en una ruta determinada. 92
Figura 32. Influencia de la velocidad media en la cuota de mercado en alguna de las relaciones del corredor de Levante. 94
Figura 33. Elasticidad de la demanda al precio 95
Figura 34. Elasticidad de la demanda al tiempo de viaje. 95
Figura 35. Reparto modal según la distancia 96
Figura 36. Tiempo objetivo en determinadas rutas europeas. 97
Figura 37. Elasticidades de la demanda a la distancia de recorrido derivada de incrementar un 10% cada concepto. 98
Figura 38. Elasticidad con respecto al tiempo de viaje encontrada 98
Figura 39. Elasticidad de la demanda al tiempo de viaje en función de la longitud del recorrido 99
Figura 40. Variación anual de la demanda en función del PIB. 103
Figura 41. Ingresos (M€) para diferentes tarifas. 112
Figura 42. Ingresos (M€) para diferentes velocidades. 112
Figura 43. Elasticidad del ingreso del operador en relación a la tarifa 113
Figura 44. Relación entre el canon y la velocidad comercial 119
Figura 45. Curva característica del tren de la serie 102 de Talgo 142
Figura 46. Precio del tren en función de la velocidad media. 144
Figura 47. Distancia anual recorrida en función de la velocidad media y del tiempo de rotación 145
Figura 48. Elasticidad del coste de amortización, del coste de capital y del coste por daños propios y a terceros en relación a la velocidad media. 146
Figura 49. Relación entre el desgaste del diferentes materiales del tren y la velocidad media del servicio 147
Figura 50. Elasticidad de los costes de mantenimiento y limpieza en relación a la velocidad media. 149
Figura 51. Coste total de la energía de tracción en función de la velocidad media. .. 152
Figura 52. Coste total del personal de abordo en relación a la velocidad media. 153
Figura 53. Estructura de costes de explotación en diferentes velocidades medias ... 154
Figura 54. Efecto de la velocidad en el coste de explotación para diferentes tarifas y considerando un canon marginal. 159
Figura 55. Efecto de la velocidad en el coste de explotación para diferentes tarifas y considerando un canon variable. 159
Figura 56. Coste de construcción de líneas de alta velocidad (I) 161
Figura 57. Coste de construcción de líneas de alta velocidad (II) 162

Figura 58. Relación entre la velocidad de diseño de la infraestructura y el coeficiente de trayectoria. 169

Figura 59. Mapa de pendientes medias de Europa y Norte de África. 171

Figura 60. Modelo digital del terreno: Mapa de altitudes España. 172

Figura 61. Modelo digital del terreno: Mapa de pendientes (derecha) de la península ibérica. 173

Figura 62. Relación entre el coste de construcción y la presencia de túneles y viaductos en líneas de alta velocidad. 174

Figura 63. Sección tipo plataforma. 181

Figura 64. Red ferroviaria española superpuesta sobre el mapa de pendientes....183

Figura 65. Tramo Astorga-Monforte de Lemos. 184

Figura 66. Tramo León-Gijón. 184

Figura 67. Tramo Madrid-Segovia. 185

Figura 68. Porcentaje de túnel y viaducto en función de la velocidad máxima en tramos suaves. 185

Figura 69. Porcentaje de túnel y viaducto en función de la velocidad máxima en tramos semillanos. 186

Figura 70. Porcentaje de túnel y viaducto en función de la velocidad máxima en tramos montañosos. 187

Figura 71. Porcentaje de túnel y viaducto en función de la velocidad máxima en tramos muy montañosos. 187

Figura 72. Perfil de línea Paris-Sud Est y porcentaje de obras. 189

Figura 73. Perfil de la línea Mannheim-Stuttgart....190

Figura 74. Relación entre el coste por kilómetro y la rampa máxima de diferentes líneas europeas. 191

Figura 75. Porcentaje de túnel para diferentes velocidades máximas, considerando pendientes máximas de 35‰ y 12,5‰. 192

Figura 76. Porcentaje de viaducto para diferentes velocidades máximas, considerando pendientes máximas de 35‰ y 12,5‰. 193

Figura 77. Variación de la sección trasversal con la velocidad....194

Figura 78. Coste por metro lineal en función de la sección trasversal de túnel (m^2) ..194

Figura 79. Costes por kilómetro en función de la sección trasversal de un túnel 195

Figura 80. Coste de la capa de forma y del subbalasto en función de la velocidad máxima. 198

Figura 81. Coste por kilómetro de obra civil, capa de forma, subbalasto y drenaje en terrenos llanos, semillanos, montañosos y muy montañoso, considerando sección única de túnel 199

Figura 82. Coste por kilómetro de obra civil, capa de forma, subbalasto y drenaje en los diferentes tipos de terreno y considerando que a partir de 370km/h se construye túnel bitubo. 199

Figura 83. Sección trasversal de vía y disposición del balasto. 201

Figura 84. Sección trasversal de la vía. 203

Figura 85. Coste por kilómetro de la capa de balasto en función de la velocidad máxima de diseño. 204

Figura 86. Relación entre velocidad máxima y costes de montaje de desvíos. 209

Figura 87. Coste total del montaje de vía en función de la velocidad máxima de diseño (año 2011). 210

Figura 88. Estructura de la electrificación considerada. 213

Figura 89. Comparativa económica entre la electrificación a 1x25 kV y a 2x25 kV. .. 214

Figura 90. Subestaciones y potencia de la red ferroviaria de alta velocidad española 218

Figura 91. Relación entre el coste y la potencia de una serie de transformadores de tracción 219

Figura 92. Configuración trasversal de la catenaria 223

Figura 93. Costes totales de electrificación en función de la velocidad máxima de diseño (año 2011). 226

Figura 94. Costes de catenaria que dependen de la velocidad 227

Figura 95. Coste de inversión en superestructura por kilómetro (M€/km) en función de la velocidad. 232

Figura 96. Diferentes tipos de suelo para el caso Español según información del CLC 236

Figura 97. Cinco tipos de suelo diferentes para el caso Español 237

Figura 98. Costes totales de inversión por kilómetro en función de la velocidad máxima en los diferentes tipos de terreno considerando sección de túnel para vía doble. 240

Figura 99. Costes totales de inversión por kilómetro en función de la velocidad máxima en los diferentes tipos de terreno considerando túnel bitubo a partir de 370km/h. 240

Figura 100. Costes de inversión por kilómetro estimado en diferentes líneas de alta velocidad española y en función de la velocidad. 242

Figura 101. Costes totales de mantenimiento por kilómetro y año en función de la velocidad máxima para los diferentes tipos de terreno identificados 243

Figura 102. Costes de mantenimiento por kilómetro y año estimado en diferentes líneas de alta velocidad española y en función de la velocidad 245

Figura 103. Valor residual (V_T) de un proyecto de transporte. 246

Figura 104. Factores de corrección que transforma los precios de mercado en precios sombra. 252

Figura 105. Excedente neto del consumidor asociado a la construcción de una nueva infraestructura 253

Figura 106. Excedente neto del consumidor (M€/año) en función de la velocidad media 255

Figura 107. Ahorros netos de tiempo de viaje (M€/año) en función de la velocidad media 256

Figura 108. Ahorros netos en costes de operación (M€/año) en función de la velocidad media. 258

Figura 109. Ahorros netos en costes de accidentes (M€/año) en función de la velocidad. 260

Figura 110. Ciclos de vuelo. 264

Figura 111. Consumo de energía del modo avión en los últimos sesenta años. 265

Figura 112. Costes Unitarios de CO2 en €/tCO2. 270

Figura 113. Ahorros en costes neto por impacto en el cambio climático (M€/año) en función de la velocidad media.....272

Figura 114. Ahorros netos en costes por impacto del ruido (M€/año) en función de la velocidad media. 275

Figura 115. Ahorros netos en costes por en la polución atmosférica (M€/año) en función de la velocidad media. 277

Figura 116. Ahorros netos en costes por impacto en la naturaleza y paisaje (M€/año) en función de la velocidad media.....279

Figura 117. Ahorros netos en costes por efecto urbano (M€/año) en función de la velocidad media. 281

Figura 118. Ahorro total en costes externos debido a la construcción de la línea de alta velocidad Madrid-Valencia en función de la velocidad media.....282

Figura 119. Desglose de cada uno de los diferentes ahorros en costes externos y en tiempos de viaje. 282

Figura 120. Situación en la red del caso ejemplo teórico analizado. 286

Figura 121. Líneas de Alta Velocidad (LAV) y líneas convencionales adaptadas a alta velocidad que existen en España, tanto en servicio (trazado continuo) como en obras (trazado discontinuo). (3 de mayo de 2015). 291

Figura 122. Relación entre la velocidad media y los costes de inversión. 293

Figura 123. Ingresos, Ahorros en costes externos y tiempos de viaje y viajeros en relación a la velocidad comercial y precio del billete. 295

Figura 124. Costes de operación (M€) para las diferentes tarifas consideradas en el caso ejemplo. 296

Figura 125. VAN Socio-económico y financiero para una tarifa de 9c€/vkm. 297

Figura 126. VAN Socio-económico y financiero para una tarifa de 12c€/vkm. 298

Figura 127. VAN Socio-económico y financiero para una tarifa de 18c€/vkm. 298

Figura 128. VAN Socio-económico y financiero para una tarifa de 20c€/vkm. 299

Figura 129. Mejores y peores escenarios en términos de rentabilidad socio-económica para una velocidad media de 200 km/h. 301

Figura 130. Mejores y peores escenarios en términos de rentabilidad socio-económica para una velocidad media de 250 km/h. 302

Figura 131. Mejores y peores escenarios en términos de rentabilidad socio-económica para una velocidad media de 300km/h. 303

Figura 132. Mejores y peores escenarios en términos de rentabilidad socio-económica para una velocidad media óptima (342km/h). 304

Figura 133. VAN Socio-económico máximo para las diferentes tarifas empleadas en el caso ejemplo. 306

Figura 134. VAN Socio-económico máximo sujeto a unas restricciones (coste de inversión y VAN financiero) para una tarifa de 9c€/vkm. 307

Figura 135. VAN Socio-económico máximo sujeto a unas restricciones (coste de inversión y VAN financiero) para una tarifa de 12c€/vkm. 308

Figura 136. VAN Socio-económico máximo sujeto a unas restricciones (coste de inversión y VAN financiero) para una tarifa de 18c€/vkm. 309

Figura 137. VAN Socio-económico máximo sujeto a unas restricciones (coste de inversión y VAN financiero) para una tarifa de 20c€/vkm. 310

Figura 138. Velocidad comercial máxima que obtiene el VAN Socio-económico máximo sujeto a las limitaciones de coste de inversión y VAN financiero. 311

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de los datos de entrada en los modelos de coste beneficio en función de su carácter. 15

Tabla 2. Rutas, tramos y subtramos del ejemplo ilustrativo. 26

Tabla 3. Periodo de evaluación recomendado por la Comisión Europea para diferentes tipos de proyectos. 37

Tabla 4. Velocidad máxima por trazado y velocidad media estática en diferentes líneas de alta velocidad españolas. 49

Tabla 5. Tiempo y longitud de frenada desde una velocidad inicial (V_1) de 100km/h según perfil de línea y velocidad final (V_2). 56

Tabla 6. Tiempo y espacio recorrido en el proceso de aceleración desde distintas velocidades iniciales (V2) hasta alcanzar una velocidad final (V3), con una aceleración de 0,8m/s2 58

Tabla 7. Tiempo y espacio recorridos en una parda según deceleración y perfil de línea. 59

Tabla 8. Tipos de aceleración y deceleración medias orientativas según tipo de tren 60

Tabla 9. Tiempo de frenada y espacio recorrido en el proceso de deceleración de una parada para distintos tipos de trenes 60

Tabla 10. Tiempo y espacio recorrido en el proceso de aceleración de una parada ... 61

Tabla 11. Tiempo y longitud de aceleración orientativo según tipo de tren 61

Tabla 12. Tiempo y distancia recorrida en el proceso de deceleración y de aceleración según tipo de tren 62

Tabla 13. Velocidad media y tiempo de viaje para cada una de las combinaciones de velocidad máxima definidas 67

Tabla 14. Matriz de viajes interregionales en el corredor de Levante. Millones de viajes al año 75

Tabla 15. Evolución de las variables socio-económicas seleccionadas para el modelo de distribución espacial. 78

Tabla 16. Coste generalizado (euros) para cada relación y cada modo de transporte. 81

Tabla 17. Valores estimados de los coeficientes que calibran el modelo gravitatorio empleado para estimar la demanda en el corredor de Levante. 83

Tabla 18. Resultados de la calibración del modelo gravitatorio en el corredor de Levante. 84

Tabla 19. Demanda estimada de todos los modos de transporte para el año 2011 en el corredor de Levante. 85

Tabla 20. Reparto modal (sin actuación) 88

Tabla 21. Reparto modal (con actuación). 89

Tabla 22. Número de viajeros por modo de transporte para el año 2011 (sin actuación). 90

Tabla 23. Número de viajeros por modo de transporte para el año 2011 (con actuación). 91

Tabla 24. Demanda total contabilizando la demanda inducida.....93

Tabla 25. Número de viajeros por modo de transporte para el año 2011.....101

Tabla 26. Previsiones del PIB en España.....104

Tabla 27. Previsión de demanda para la línea de alta velocidad Madrid-Valencia.....104

Tabla 28. Evolución de los ingresos, viajeros kilómetros y percepción media de los trenes españoles con velocidades medias mayores que 150km/h.....107

Tabla 29. Ingresos en el corredor de Levante para 220km/h y para 230km/h.....108

Tabla 30. Demanda del modo tren de alta velocidad en la línea Madrid-Valencia (un sentido) en función del precio del billete y de la velocidad comercial.....110

Tabla 31. Ingresos (M€) del operador en función de la velocidad comercial y del precio del billete.....111

Tabla 32. Valor del canon en función de la velocidad comercial. 120

Tabla 33. Principales características de algunos trenes de alta velocidad o velocidad alta mayoritariamente utilizados en España. 123

Tabla 34. Densidad de plazas por metro de pasillo y coeficiente de confort.....124

Tabla 35. Coeficiente de plazas en función de la anchura de la caja.....125

Tabla 36. Características básicas del tren en función del número de pisos.....125

Tabla 37. Longitud tanto de los coches extremos como de los coches intermedios según tipo de articulación 126

Tabla 38. Masa en toneladas de los diferentes elementos de la rodadura.....128

Tabla 39. Principales características de los trenes de alta velocidad obtenidas a partir del modelo 129

Tabla 40: Coeficientes de estacionalidad del corredor de Levante 2011. 131

Tabla 41: Comprobación del modelo de estacionalidad propuesto. 132

Tabla 42: Coeficientes de estacionalidad medios para el corredor de Levante.....132

Tabla 43. Demanda diaria a partir de los coeficientes de estacionalidad.....135

Tabla 44. Ocupaciones objetivo en los diferentes periodos del año.....135

Tabla 45. Servicios diarios y anuales ofrecidos por el operador para atender la demanda. 136

Tabla 46. Plazas ofertadas por el operador para cada demanda. 136

Tabla 47. Número de trenes necesarios para atender la demanda en la línea Madrid-Valencia y para diferentes velocidades comerciales. 137

Tabla 48. Número de trenes necesarios para atender la demanda en la línea Madrid-Valencia y en función de la velocidad y el precio.....137

Tabla 49. Valores orientativos del coste de mantenimiento (incluido la gran reparación pero no la limpieza.....148

Tabla 50. Valores aproximados de coste de mantenimiento de un tren de alta velocidad de 200 metros de longitud. 149

Tabla 51. Valores fijos para el cálculo del coste de personal a bordo.....153

Tabla 52. Costes incurridos por el operador debido a la venta de billetes. (Euros 2011) 155

Tabla 53. Costes incurridos por el operador debido a la atención al cliente.....155

Tabla 54. Costes de explotación en M€ del operador en función de la velocidad y del precio del billete, considerando un canon marginal de 2€/tren-km. 157

Tabla 55. Costes de explotación en M€ del operador en función de la velocidad y del precio del billete, considerando un canon variable en función de la velocidad comercial 158

Tabla 56. Costes de inversión de las diferentes líneas de alta velocidad españolas. 163

Tabla 57. Importancia de cada componente de una línea de alta velocidad sobre la inversión total.. 165

Tabla 58. Tramos o líneas representativas y su diferencia entre la línea real y la línea recta. 168

Tabla 59. Precios por m^3 para las diferentes unidades de excavación (año 2011). .. 176

Tabla 60. Precios por m^3 para las diferentes unidades de terraplén (año 2011). 177

Tabla 61. Precio por kilómetro de las diferentes estructuras (año 2011). 178

Tabla 62. Precios medios por kilómetro para diferentes estructuras (año 2011). 179

Tabla 63. Precio por kilómetro de túnel, actualizados año 2011..... 179

Tabla 64. Coste de mantenimiento de estructuras..... 180

Tabla 65. Porcentajes de obra y costes en dos líneas diferentes con la adopción primero de gradientes máximos de 12,5‰ y después 35‰..... 189

Tabla 66. Reducción de costes en dos líneas (Hannover-Würzburg y Mannhelm-Stuttgart) con la adopción de rampas con gradientes de 35‰. 190

Tabla 67. Porcentaje de túnel y viaducto en relación a la longitud total de cada alternativa analizada. 190

Tabla 68. Valores de entrevía en distintas líneas europeas de alta velocidad. 196

Tabla 69. Distancias mínimas entre ejes de vía en función de las velocidades máximas permitidas. 197

Tabla 70. Distancia mínima de entreeje para velocidades superiores a 350km/h. 198

Tabla 71. Costes de inversión de la subestructura según relieve y velocidad máxima 200

Tabla 72. Cuadro de precios en el montaje de vía. (año 2011) 202

Tabla 73. Comparación de costes de montaje de vía en cuatro países europeos. ... 205

Tabla 74. Recomendaciones en cuanto al tipo de vía según la velocidad máxima de diseño. 206

Tabla 75. Coste de suministro y montaje de desvíos en líneas de alta velocidad (año 2011). 207

Tabla 76. Distancia media entre dependencias de la red de alta velocidad española. 208

Tabla 77. Distancia entre dos dependencias consecutivas, tipología y número de desvíos en función de la velocidad máxima y media de la línea..... 209

Tabla 78. Costes de mantenimiento de vía..... 212

Tabla 79. Rango de tensiones admisibles según la norma UIC-600 214

Tabla 80. Coste fijo de una subestación de tracción en euros (año 2011). 215

Tabla 81. Coste fijo de una subestación de tracción (año 2011). 216

Tabla 82. Relación entre la velocidad máxima y la potencia de determinados trenes. 216

Tabla 83. Potencia de la subestación en función de la velocidad máxima del tren. ...218

Tabla 84. Coste de una subestación en función de la velocidad máxima de diseño. .220

Tabla 85. Potencia necesaria del autotransformador en función de la velocidad máxima del tren. 221

Tabla 86.Costes en M€ de la subestación más la acometida a la red y de los centros de auto-transformación por kilómetro (año 2011). 222

Tabla 87. Costes fijos asociados a la construcción de la catenaria (año 2011). 224

Tabla 88. Tipos de catenaria y de los diferentes elementos que la componen) según velocidad máxima 225

Tabla 89. Velocidad máxima y costes de catenaria. 226

Tabla 90. Costes por kilómetro del sistema de señalización (año 2011). 230

Tabla 91. Costes por kilómetro atribuible a las comunicaciones (año 2011). 231

Tabla 92. Costes por kilómetro del sistema de señalización y comunicaciones en función de la velocidad máxima (año 2011). 231

Tabla 93. Longitud media de los túneles españoles según relieve del tramo y velocidad máxima. 234

Tabla 94. Número de hectáreas y porcentajes de los diferentes tipos de suelo para el caso español. 237

Tabla 95. Tabla Precios medios por m2 de los diferentes tipos de suelo. 238

Tabla 96: Costes asociados a la construcción de las estaciones 239

Tabla 97: Rango de costes por kilómetro para cada tipo de terreno y en función de la velocidad. 241

Tabla 98: Porcentaje del total de la línea según el tipo de relieve que atraviesan (llana, semillana, montañosa y muy montañosa)....241

Tabla 99: Diferencia en coste total de inversión por kilómetro entre los valores estimados y los valores reales 242

Tabla 100: Diferencia en costes totales incluyendo los costes de impacto ambiental y los atribuibles a los estudios de planificación y evaluación de proyectos 243

Tabla 101: Rango de costes por kilómetro para cada tipo de terreno y en función de la velocidad. 244

Tabla 102: Horizonte temporal de referencia en años por sector. 247

Tabla 103: Vida útil y valor residual como porcentaje del valor inicial (inversión) de cada uno de los elementos de una infraestructura ferroviaria. 247

Tabla 104: Vida útil de los distintos sistemas de la infraestructura....248

Tabla 105. Costes de operación asociados a los diferentes modos de transporte de viajeros. 257

Tabla 106: Costes medio de accidentes según modo de transporte. 259

Tabla 107: Factores medios de emisión de GEI por vehículo y kilómetros recorridos. 262

Tabla 108: Factores medios de emisión de GEI por vehículo y kilómetros recorridos. 263

Tabla 109: Emisiones medias de GEI por kilómetro de carretera construido 263

Tabla 110: Consumo de energía (gr-keroseno/plazas-kilómetro) y emisiones en función de la distancia 264

Tabla 111: Factores de emisión medios para el cálculo de GEI atribuibles al acceso terrestre al aeropuerto. 266

Tabla 112: Factores de emisión medios actuales por unidad transportada (pasajero o tonelada) y kilómetro de recorrido. 266

Tabla 113: Pérdidas red Transporte/Distribución. 267

Tabla 114: Pérdidas red eléctrica ferroviaria. 267

Tabla 115: Emisiones de CO_2 por unidad de energía eléctrica producida. 268

Tabla 116: Coeficientes empleados para transformar emisiones de CO_2 a emisiones de CO_2e. 268

Tabla 117: Emisiones de CO_2 y consumo por construcción y ampliación de las líneas de alta velocidad Valence-Marseille y Tours-Bordeux. 269

Tabla 118: Emisiones medias de GEI por construcción y ampliación de infraestructuras ferroviarias en el caso español. 269

Tabla 119: Valores de referencia por persona afectada en Alemania y en euros por dB(A) reducido. 273

Tabla 120: Costes medio provocado por el ruido y la contaminación acústica según modo de transporte. 274

Tabla 121: Disposición a pagar. Valores medios europeos basados en la evaluación de los costes de la salud debido a la contaminación atmosférica. (Precios 1995). 276

Tabla 122: Costes medio asociado a la polución atmosférica según modo de transporte. 276

Tabla 123: Costes medio asociado a la naturaleza y paisaje según modo de transporte. 278

Tabla 124: Costes medio asociado a efectos urbanos según modo de transporte. .. 280

Tabla 125: Tipos de terreno seleccionados para el trazado del caso ejemplo. 288

Tabla 126: Combinación de velocidades máximas para cada escenario propuesto. 289

Tabla 127: Inputs de entrada en el modelo de determinación de las características de los trenes. 290

Tabla 128: Parámetros comunes en la metodología ACB empleada en el caso ejemplo. 290

Tabla 129: Demanda total de las rutas que componen el corredor de Levante y porcentaje de demanda de la ruta Madrid-Valencia sobre el total. 292

Tabla 130: Combinación de velocidades máximas por subtramo y velocidad comercial a la que se debe construir la línea del caso ejemplo analizado. 312

Tabla 131: Kilómetros de recorrido y tiempos para el modo de carretera en los diferentes trayectos del corredor de Levante. 331

Tabla 132: Distancias, tiempos de viaje y frecuencias del autobús en los diferentes trayectos del corredor de Levante. 332

Tabla 133: Distancias, tiempos de viaje y frecuencias en el ferrocarril convencional en los diferentes trayectos del corredor de Levante 333

Tabla 134: Operaciones, tiempos de viaje y kilómetros del avión en los diferentes trayectos del corredor de Levante. 334

Tabla 135: Flujo entre la Comunidad de Madrid y la Comunidad de Castilla la Mancha para los diferentes modos de transporte. 335

Tabla 136: Flujo entre la Comunidad de Madrid y la Comunidad de Valencia para los diferentes modos de transporte. 336

Tabla 137: Desagregación de los flujos entre la comunidad de Madrid y la comunidad de Castilla la Mancha en miles de viajes entre las diferentes provincias y según modo de transporte. 336

Tabla 138: Desagregación de los flujos entre la comunidad de Madrid y la comunidad de Valenciana en miles de viajes entre las diferentes provincias y según modo de transporte. 337

Tabla 139: Tráfico en la red interurbana de carreteras 337

Tabla 140: Evolución del tráfico para las relaciones del caso ejemplo que están en las mismas comunidades autónomas 338

Tabla 141: Demanda de viajeros por ferrocarril convencional en el año 2007 para las relaciones origen destino del corredor de Levante 338

Tabla 142: Demanda de viajeros en el modo avión en el año 2007 para las relaciones origen destino del corredor de Levante 339

Tabla 143: Coste generalizado en el caso del automóvil 341

Tabla 144: Coste generalizado en el caso del autobús. 342

Tabla 145: Coste generalizado en el caso del ferrocarril convencional. 342

Tabla 146: Coste generalizado en el caso del avión 343

Tabla 147: Coste generalizado en el caso tren de alta velocidad 344

Tabla 148: Distancias en kilómetros de alta velocidad para las diferentes relaciones del corredor de Levante 345

Tabla 149: Valores de aceleración admisibles por el viajero de acuerdo con la experiencia de los ferrocarriles franceses 347

Tabla 150: Velocidades de paso por curva para distintos radios y distintos peraltes y anchos de vía. 349

Tabla 151: Grado de inclinación de los distintos tipos de vehículos de caja inclinable. 350

Tabla 152: Velocidades de paso por curva de los trenes pendulares para distintos radios, anchos de vía y distintos peraltes. 351

Tabla 153: Velocidades de paso por curva de los trenes pendulares para distintos radios, anchos de vía y distintos peraltes. 352

Tabla 154: Porcentaje de obra en terreno llano para los diferentes tramos de la red ferroviaria española. 354

Tabla 155: Porcentaje de obra en terreno semillano para los diferentes tramos de la red ferroviaria española. 356

Tabla 156: Porcentaje de obra en terreno montañoso para los diferentes tramos de la red ferroviaria española. 357

Tabla 157: Porcentaje de obra en terreno muy montañoso para los diferentes tramos de la red ferroviaria española 358

Tabla 158: Demandas por relaciones origen-destino en 2011. 359

Tabla 159: Líneas de alta velocidad europeas: características y costes. 361

FUNDACIÓN DE LOS FERROCARRILES ESPAÑOLES