



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE MÁSTER DE INGENIERÍA AVANZADA DE
PRODUCCIÓN, LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO**

EL TRANSPORTE INTERMODAL DE MERCANCÍAS: ANÁLISIS CRÍTICO DE LA LITERATURA

AUTORA: MARÍA ZAMORA FORTES

TUTOR: ÁNGEL ORTIZ BAS

CURSO ACADÉMICO: 2018/2019

RESUMEN

En los últimos años la investigación del transporte intermodal de mercancías ha crecido notablemente. Este sistema de transporte es una alternativa al transporte unimodal en tanto que permite aprovechar las potencialidades de cada modo.

Por otro lado, el crecimiento del comercio internacional ha propiciado un aumento en el uso del transporte intermodal, debido a la necesidad de disminuir la congestión en las carreteras y, en consecuencia, las emisiones de gases contaminantes. Además de tratarse de un transporte que busca la sostenibilidad, ofrece también ventajas en términos de seguridad, costes y tiempo.

Con este trabajo se pretende examinar la evolución y uso del transporte intermodal para la distribución de mercancías mediante un análisis crítico de la literatura. Para ello, se investiga y estructura la información en base al desarrollo del concepto de transporte intermodal y otros términos utilizados en el mismo ámbito, las características que presentan las redes intermodales y los problemas de transporte intermodal existentes. Finalmente, se extraen unas conclusiones y se realiza un análisis de vacíos y propuestas de líneas futuras de investigación.

Palabras clave: transporte intermodal, multimodalidad, intermodalidad, mercancías, terminal intermodal.

RESUM

En els últims anys la investigació del transport intermodal de mercaderies ha crescut notablement. Este sistema de transport és una alternativa al transport unimodal en tant que permet aprofitar les potencialitats de cada mode.

D'altra banda, el creixement del comerç internacional ha propiciat un augment en l'ús del transport intermodal, a causa de la necessitat de disminuir la congestió en les carreteres i, en conseqüència, les emissions de gasos contaminants. A més de tractar-se d'un transport que busca la sostenibilitat, oferix també avantatges en termes de seguretat, costos i temps.

Amb este treball es pretén examinar l'evolució i ús del transport intermodal per a la distribució de mercaderies per mitjà d'una anàlisi crítica de la literatura. Per a això, s'investiga i estructura la informació basant-se en el desenrotllament del concepte de transport intermodal i altres termes utilitzats en el mateix àmbit, les característiques que presenten les xarxes intermodals i els problemes de transport intermodal existents. Finalment, s'extrauen unes conclusions i es realitza una anàlisi de buits i propostes de línies futures d'investigació.

Paraules clau: transport intermodal, multimodalitat, intermodalitat, mercaderies, terminal intermodal.

ABSTRACT

In the last few years there has been significant growth in research on intermodal freight transportation. This transport system is an alternative to unimodal transport as long as it allows exploiting the potentialities of each mode.

On the other hand, the growth of international trade has led to an increase in the use of intermodal transport, due to the necessity of reduce congestion on the roads and, consequently, emissions of polluting gases. Besides being a transport that seeks sustainability, it also offers advantages in terms of safety, costs and time.

This paper aims to examine the evolution and use of intermodal transport in freight distribution through a critical literature review. To this end, the existing information is researched and structured based on the development of intermodal transport concept and other terms used in the same field, the characteristics of intermodal networks and the intermodal transport problems. Finally, conclusions are drawn and analysis of gaps and proposals for future lines of research is presented.

Keywords: intermodal transport, multimodality, intermodality, freight, intermodal terminal.

ÍNDICE

Resumen.....	1
Resum.....	2
Abstract.....	3
Índice de figuras.....	6
Índice de tablas.....	7
1. Introducción.....	8
1.1. Objeto.....	9
1.2. Motivación.....	9
1.3. Justificación.....	9
1.4. Estructura.....	10
2. Antecedentes y conceptos.....	11
2.1. Evolución de la intermodalidad.....	11
2.2. Conceptos clave.....	12
3. Metodología de revisión.....	14
4. Taxonomía.....	19
4.1. Conceptualización del transporte intermodal.....	21
4.2. Red de transporte intermodal.....	21
4.3. Problemas de transporte intermodal.....	22
5. Análisis de la literatura revisada.....	24
5.1. Conceptualización del transporte intermodal.....	24
5.2. Red de transporte intermodal.....	30
5.2.1. Modos de transporte.....	32
5.2.2. Ámbito.....	39
5.2.3. Tipos de productos.....	41
5.2.4. UTI.....	44
5.3. Problemas de transporte intermodal.....	48
5.3.1. Tipología y métodos de resolución.....	51
5.3.2. Parámetros.....	57
5.3.3. Objetivos.....	63

6. Innovaciones en el transporte de mercancías	69
7. Conclusiones.....	76
8. Análisis de vacíos y futuras líneas de investigación	78
9. Bibliografía.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de referencias según revista	17
Figura 2. Número de referencias por año	18
Figura 3. Categorías definidas para la revisión	19
Figura 4. Red intermodal formada por arcos y nodos.	30
Figura 5. Red de transporte intermodal.....	31
Figura 6. Factores para la elección entre el transporte intermodal y por carretera	33
Figura 7. Red intermodal carretero-ferroviaria.....	35
Figura 8. Características básicas de cada modo de transporte.....	38
Figura 9. Combinación de modos de transporte según el tipo de producto	42
Figura 10. Clasificación de problemas de transporte intermodal.....	49
Figura 11. Función de costes para una red intermodal	64
Figura 12. Costes unitarios de transporte según modo de transporte.....	65
Figura 13. Costes de fricción según modo de transporte	66
Figura 14. Camión autónomo Volvo.....	70
Figura 15. Bicicleta de carga DHL	71
Figura 16. Vehículo eléctrico Scoobic.....	73
Figura 17. Dron de DHL para entrega de mercancías	74
Figura 18. Amazon scout	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión para la investigación	15
Tabla 2. Número de referencias por revista	15
Tabla 3. Estructura detallada de la taxonomía	20
Tabla 4. Definiciones de transporte intermodal en la literatura revisada.....	24
Tabla 5. Aspectos distintivos de los tipos de transporte investigados	29
Tabla 6. Clasificación de artículos según la combinación de modos de transporte	32
Tabla 7. Clasificación de artículos según el ámbito geográfico de la red intermodal	39
Tabla 8. Clasificación de artículos según tipo de producto transportado	41
Tabla 9. Clasificación de artículos según la UTI utilizada	44
Tabla 10. Clasificación de artículos según tipo de problema y métodos de resolución	51
Tabla 11. Clasificación de artículos según parámetros y tipología de problemas	57
Tabla 12. Clasificación de artículos según objetivos para problemas de transporte intermodal	63

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento del comercio internacional ha propiciado un aumento en el uso del transporte intermodal, ligado también al interés por conseguir cadenas de transporte cada día más competitivas. Como resultado, la investigación del transporte intermodal y su aplicación a la distribución de mercancías ha crecido notablemente, concentrándose la mayor cantidad de publicaciones desde los años noventa hasta la actualidad.

Sin embargo, la existencia del transporte intermodal en España tiene lugar en los años 70 con la construcción de una excelente red ferroviaria y un extensivo uso de las vías navegables. Dado el cambio en los procesos productivos y estándares de consumo, los modelos de producción tradicionales se han visto transformados en modelos de producción en red, haciendo que el transporte por carretera cobre una mayor importancia: realizar la distribución inicial y final, recorridos a los que se denominan primera y última milla, respectivamente.

El transporte intermodal busca optimizar el transporte puerta a puerta (Crainic & Kim, 2007) y, además, conjuga los diferentes modos de transporte aprovechando las ventajas competitivas de cada uno de ellos. Se trata de un transporte eficiente, seguro, ágil y sostenible.

Si los países involucrados en el transporte intermodal de mercancías son miembros de la Unión Europea, el término utilizado por la Comisión Europea para designar el transporte intermodal en el cual los recorridos principales se realizan habitualmente por ferrocarril, vía navegable o travesía marítima, y con el mínimo recorrido posible por carretera, es transporte combinado (Ministerio de Fomento, 2017a).

El desarrollo del transporte intermodal está relacionado con la aparición de un recipiente donde albergar la mercancía: el contenedor. Este resulta de gran relevancia tanto para el avance del transporte intermodal como para el comercio internacional, siendo la Unidad de Transporte Intermodal (UTI) más utilizada.

Según la (Comisión de Transporte del Colegio de Ingenieros de Caminos, 2005), la intermodalidad se puede evaluar también como un indicador de calidad de nivel de integración entre los diferentes modos de transporte que intervienen a lo largo de la cadena, en el sentido de que cuanto mayor sea la intermodalidad más complementariedad existirá entre los diferentes modos. Es por ello por lo que algunos autores exponen que la intermodalidad se centra principalmente en el transporte de superficie (Jar, 2007), dejando de lado el transporte aéreo (Bontekoning & Macharis, 2004) por su incompatibilidad en el uso de las mismas unidades de transporte que el resto de modos de transporte.

1.1. Objeto

El presente trabajo tiene como objeto desarrollar una revisión del estado actual del transporte intermodal de mercancías y su evolución, presentar las tendencias actuales y su uso en el comercio nacional e internacional atendiendo a las principales características que definen la red de transporte intermodal.

Otro objeto específico que se persigue con este trabajo es la identificación de los principales tipos de problema desarrollados para el transporte intermodal, así como sus parámetros de entrada y objetivos perseguidos.

1.2. Motivación

En la actualidad, debido al auge del mundo digital los tiempos de entrega de los productos son cada vez más estrictos. Es por ello por lo que el transporte de mercancías se cataloga hoy en día como un pilar fundamental en la mayoría de las empresas que realizan actividades de comercio, tanto a nivel nacional como internacional.

La principal motivación del presente estudio es principalmente ampliar el conocimiento en el sector del transporte intermodal de mercancías y exponer un análisis que permita conocer las funcionalidades y ventajas que ofrece la intermodalidad en términos de costes, tiempo y sostenibilidad medioambiental.

1.3. Justificación

La justificación del presente proyecto es tanto académica como investigadora. Desde un punto de vista académico, se aplican conceptos estudiados en varias asignaturas cursadas en el Máster Universitario en Ingeniería Avanzada de Producción, Logística y Cadena de Suministro.

Desde un punto de vista de investigación, a través del proyecto se pretende mostrar la importancia que tiene actualmente la adecuada elección y gestión del sistema de transporte en la distribución de mercancías.

Además, se profundizará en los problemas de transporte intermodal caracterizados por los objetivos que persiguen y que se relacionan con las estrategias logísticas que buscan las principales empresas de transporte: minimización de costes, distancias y tiempo, además de fomentar la seguridad vial y competitividad del transporte.

1.4. Estructura

La estructura que se sigue para el desarrollo del trabajo es la siguiente. En el capítulo 2 se exponen los antecedentes y conceptos clave del transporte intermodal con el fin de aportar coordinación y coherencia a la investigación desarrollada. En el capítulo 3 se detalla el procedimiento seguido para la revisión literaria mediante la definición de los criterios de búsqueda utilizados, revistas y bases de datos analizadas. En el capítulo 4 se presenta la taxonomía, donde se categorizan los resultados obtenidos en la revisión.

En el capítulo 5 se desarrolla un análisis detallado de la literatura investigada según la taxonomía propuesta. En el capítulo 6 se presentan las principales innovaciones que han tenido lugar en la distribución de mercancías. En el capítulo 7 se establecen las conclusiones derivadas del análisis realizado y, por último, en el capítulo 8 se presenta un análisis de vacíos y las futuras líneas de investigación a desarrollar a partir de los trabajos considerados.

2. ANTECEDENTES Y CONCEPTOS

Como antecedentes a esta investigación se encuentran numerosas publicaciones acerca del transporte intermodal de mercancías en todas sus vertientes. (Agamez-Arias & Moyano-Fuentes, 2017) presentan una revisión literaria del transporte intermodal dividida en tres líneas de investigación: principios básicos del transporte intermodal, mejoras en el funcionamiento del sistema de transporte y problemas de transporte intermodal.

Por otro lado, (Crainic, Perboli, & Rosano, 2018) exponen una taxonomía donde categorizan la literatura existente sobre el transporte intermodal y muestran los principales hallazgos, tendencias y análisis futuros de este sistema de transporte. Otros como (Bontekoning, Macharis, & Trip, 2004) y (Pinto, Mistage, Bilotta, & Helmers, 2018) centran sus publicaciones en el transporte intermodal carretero-ferroviario, siendo esta la combinación de modos de transporte más utilizada.

A medida que los patrones en la intermodalidad cambian, numerosos autores e instituciones han propuesto diferentes definiciones para los términos “intermodalidad” y “transporte intermodal”, por lo que no existe un consenso en la definición de dichos términos. También se han desarrollado recientemente diferentes tipologías de problemas para el transporte intermodal en los que destacan, principalmente, objetivos como la reducción de tiempos (Chang, 2008), disminución en el uso de energía y emisiones (Taylor, Broadstreet, Meinert, & Usher, 2002) y, en mayor medida, la reducción de costes, tanto sociales (Ricci & Black, 2005) como infraestructurales (Ministerio de Fomento, 2017b).

2.1. Evolución de la intermodalidad

El transporte de carga se ha considerado tradicionalmente como una serie de viajes independientes que utiliza los diferentes modos de transporte. En 1780, en Inglaterra ya se utilizaban contenedores de madera para transportar carbón utilizando la combinación de los modos carretero-ferroviario. En España, entre 1870 y 1950 se mejoró la red ferroviaria y se potenció el uso de las vías navegables, convirtiendo así al transporte ferroviario y marítimo en los modos de transporte más utilizados en dicha época.

Por aquel entonces, el transporte intermodal no podía realizarse debido a grandes problemas de operaciones en las terminales, elevada manipulación de la mercancía, altos costes y numerosas averías. El mundo del transporte cambió drásticamente en los años 50 con la aparición del contenedor intermodal, creado por Malcolm McLean y que nace con el fin de mejorar la eficiencia en las operaciones de carga y descarga en el transporte intermodal.

Posteriormente, entre 1968 y 1970, la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) publicó unos estándares para los contenedores con el fin de asegurar el intercambio entre los diferentes modos de transporte.

Además, el auge del comercio exterior ha desencadenado que cada vez más el transporte de mercancías se considere como un movimiento constante entre un origen y un destino, denominado transporte puerta a puerta, formando una red donde los arcos y nodos están conectados. Esto da paso al nacimiento de cadenas de transporte que utilizan varios modos de transporte y en las que la mercancía se transvasa de un modo a otro de forma eficiente y rentable: nace así el concepto de transporte intermodal.

2.2. Conceptos clave

En este apartado se expone la definición de una serie de conceptos relacionados con el transporte intermodal y que se utilizarán de manera recurrente a lo largo del documento.

- **Modo de transporte:** tipología particular de transportar bienes o personas. De forma genérica se distinguen tres modos de transporte: aéreo, marítimo y terrestre (Ministerio de Fomento, 2017a).
- **Unidad de Transporte Intermodal (UTI):** es el contenedor, caja móvil o semirremolque adecuado para el transporte intermodal (Ministerio de Fomento, 2017a).
- **Transbordo:** consiste en el movimiento de las UTIs de un modo de transporte a otro.
- **Red de transporte:** secuencia de modos de transporte y nodos para el movimiento de la mercancía desde su origen a su destino, con uno o más transbordos. En una red integrada de transporte los modos conectan entre sí a través de los nodos (Ministerio de Fomento, 2017a).
- **Transporte multimodal:** porte de mercancía por, al menos, dos modos de transporte diferentes, en virtud de un contrato de transporte multimodal desde un lugar situado en un país en que el operador de transporte multimodal toma la mercancía bajo su custodia hasta otro lugar designado para su entrega, situado en un país diferente (ECMT & United Nations, 1997).
- **Transporte marítimo de corta distancia:** transporte marítimo de mercancías y viajeros integrado en una cadena intermodal con puertos de origen y destino final en Europa o en países ribereños (Ministerio de Fomento, 2011).

- **Transporte combinado:** designación de la Comisión Europea para referirse al transporte intermodal de mercancías entre miembros de la UE en el que los recorridos principales se realizan en tren, vía navegable o travesía marítima, con el mínimo recorrido posible por carretera, exclusivamente en la etapa inicial y final (Ministerio de Fomento, 2011).
- **Operador Intermodal:** operador de transporte (compañía naviera, operador de ferrocarril, transitario, etc.) que ofrece un servicio de transporte "puerta a puerta" y emite un documento de transporte único, respondiendo ante el cargador tanto de las mercancías como de la correcta ejecución del transporte, asumiendo también todas las responsabilidades (Ministerio de Fomento, 2011).
- **Cargador:** persona o compañía que confía a terceros el "cuidado" de las mercancías con tal de ser entregadas al destinatario (Ministerio de Fomento, 2017a).
- **Transportista:** persona responsable del movimiento de mercancías, ya sea directamente o a través de una tercera parte (subcontrata) (Ministerio de Fomento, 2017a).
- **Destinatario:** persona encargada de recoger las mercancías (Ministerio de Fomento, 2017a).
- **Transitario:** intermediario que toma las disposiciones necesarias y/o proporciona servicios complementarios para el transporte de mercancías y otros servicios en representación del emisor (Ministerio de Fomento, 2017a).
- **Terminal intermodal:** instalación que permite el intercambio de UTIs entre dos modos de transporte. Las terminales cuentan con zonas de recepción/expedición de UTIs, aparcamiento y servicios. Además, disponen de los medios adecuados para la transferencia de la carga entre modos (grúas, rampas, equipos especiales de manipulación, etc.) (Ministerio de Fomento, 2017a).
- **Titular de una terminal intermodal:** entidad sobre la que recae la propiedad de la instalación (Ministerio de Fomento, 2017a).
- **Explotador de una terminal intermodal:** el explotador de una terminal intermodal es aquel que gestiona la terminal y presta los servicios a los diferentes usuarios (ya sea directa o indirectamente). El explotador puede ser el mismo titular u otra entidad (Ministerio de Fomento, 2017a).

3. METODOLOGÍA DE REVISIÓN

En el presente apartado se detalla el proceso de selección de artículos para la revisión literaria presentada acerca del transporte intermodal de mercancías. Con ello se pretende dar a conocer cuál es el estado actual al que se ha llegado mediante las investigaciones realizadas.

Para realizar la revisión literaria se ha empleado la metodología propuesta por (Seuring & Müller, 2008), que se compone de los siguientes cuatro pasos: recolección del material, análisis descriptivo, selección de categorías y evaluación del material. Los dos primeros pasos se detallan en este capítulo y los dos últimos se explican en los capítulos 4. Taxonomía y 5. Análisis de la literatura revisada, respectivamente.

La recolección del material tiene como objetivo definir y delimitar la búsqueda del material adecuado para el desarrollo de dicho trabajo. La recopilación de artículos se ha llevado a cabo mediante una búsqueda organizada, utilizando bases de datos científicas como Google Scholar (www.scholar.google.es), Scopus (www.scopus.com), ScienceDirect (www.sciencedirect.com), ResearchGate (www.researchgate.net) y Springer (www.link.springer.com).

Las palabras clave utilizadas en este proceso han sido:

- "Intermodal transportation"
- "Intermodalism in transportation"
- "Intermodal transportation system"
- "Intermodality" AND "transport"
- "Intermodal terminal"
- "Intermodal transport problem"

Con el fin de reducir el número de trabajos a investigar se han definido los siguientes criterios de inclusión y exclusión para que las referencias analizadas estén acorde a la estructura y objetivos del presente trabajo. Los criterios de inclusión indican las características que debe cumplir un artículo para poder ser analizado, mientras que los criterios de exclusión indican qué características no deben ser incluidas en el análisis.

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión para la investigación

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Publicados desde 1996 – actualidad	Publicados antes de 1996
Artículos enfocados en el transporte intermodal/multimodal/unimodal	Artículos enfocados en otros tipos de transporte
Problemas de transporte intermodal	–
Definiciones de transporte intermodal, multimodal, sincromodal o co-modal	–
Descripción de red de transporte intermodal	–

Una vez realizada la búsqueda se han seleccionado y guardado los artículos de forma ordenada. A continuación, se ha llevado a cabo una distinción entre unos artículos y otros mediante la lectura de los títulos y “abstracts”, definiendo cuáles emplearemos para la revisión y cuáles excluirémos, según los criterios de inclusión y exclusión mostrados en la Tabla 1. Al finalizar la selección de artículos se han eliminado las duplicidades.

En esta primera búsqueda se obtuvieron pocos resultados ya que el transporte intermodal es aún un sector emergente y no cuenta con muchas investigaciones. Por ello, se ha profundizado la búsqueda seleccionando nuevos artículos entre las referencias de aquellos ya escogidos, volviendo a revisarlos de la misma forma que para la primera búsqueda.

Tras la depuración del conjunto de artículos se obtuvieron 120 referencias que debían ser analizadas con mayor profundidad, de las cuales 100 son publicaciones de revistas científicas, 4 son capítulos de libros, 4 son documentos, 1 es un glosario, 4 son informes, 4 son libros, 1 es una revista y 1 es una tesis. En la Tabla 2 se realiza una clasificación de los artículos según la revista científica en la que han sido publicados:

Tabla 2. Número de referencias por revista

Revistas	Referencias
Applied Intelligence	1
Business Research	1
Computer	1
Computer & Industrial Engineering	1
Computers and Operations Research	5
Computers in Industry	2
Encyclopedia of Social Measurement	1
Engineering Applications of Artificial Intelligence	1
Environmental Development	1

European Journal of Operational Research	5
European Journal of Transport and Infrastructure Research	2
European Management Journal	1
European Simulation and Modelling Conference	1
European Transport	1
European Transport Research Review	1
Handbooks in Operations Research and Management Science	1
IFAC	1
Interfaces	1
International Journal of Production Economics	1
Journal of Air Transport Management	1
Journal of Cleaner Production	1
Journal of Computational Science	1
Journal of Loss Prevention in the Process Industries	1
Journal of Open Innovation	1
Journal of Transport Geography	6
Logistics Information Management	1
Logistics Research	1
Mathematics and Computers in Simulation	1
Ocean and Coastal Management	1
Omega	1
Procedia - Social and Behavioural Sciences	5
Procedia Engineering	2
Research in Transportation Business and Management	6
Research in Transportation Economics	2
Revista Transporte Y Territorio	1
Supply Chain Management	1
Transport	2
Transport Policy	1
Transport Reviews	1
Transportation and Physical Distribution	1
Transportation Law Journal	2
Transportation Planning and Technology	2
Transportation Research	19
Transportation Research Procedia	5
Transportation Science	2
Total	100

A continuación, en la Figura 1 se muestra la relación del número de artículos publicados en cada revista científica, hecho que demuestra que las revistas que concentran más del 50% de artículos son:

- Computers and Operations Research
- European Journal of Operational Research
- Journal of Transport Geography
- Procedia - Social and Behavioral Sciences
- Research in Transportation Business and Management
- Transportation Research
- Transportation Research Procedia

En el siguiente gráfico se han excluido las revistas en las que se han publicado menos de dos artículos de los que se han seleccionado para el trabajo.

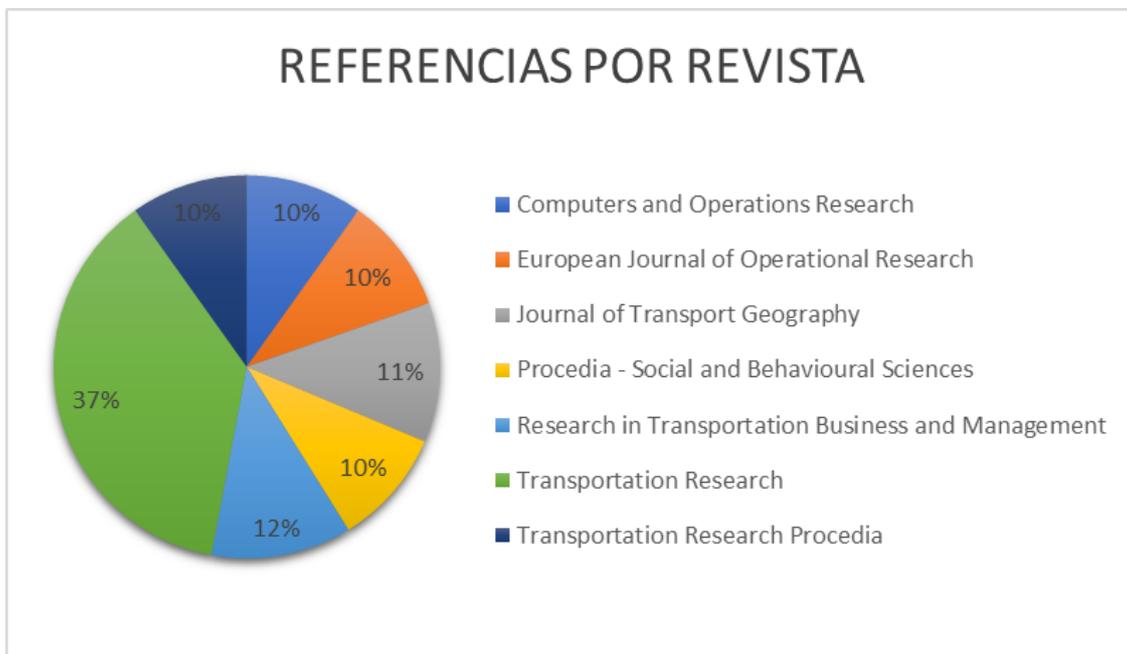


Figura 1. Porcentaje de referencias según revista

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2 se muestra la evolución de las referencias analizadas. Se identifica que la mayoría se publicaron en el periodo de tiempo comprendido por los años 2014-2019, debido a que la intermodalidad es un sistema de transporte emergente.

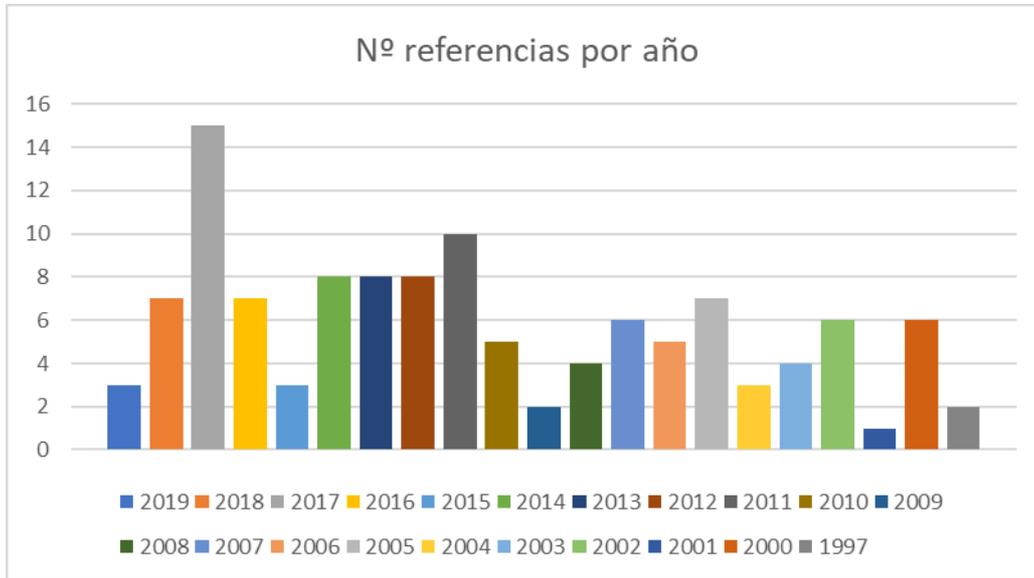


Figura 2. Número de referencias por año

Fuente: Elaboración propia

4. TAXONOMÍA

Para la construcción de la taxonomía, que permitirá analizar en profundidad los artículos seleccionados, se ha llevado a cabo la metodología propuesta por (Bailey, 2005) basada en tres niveles y que comienza con un análisis empírico (nivel C) de la literatura relacionada con el tema seleccionado.

La segunda etapa consiste en construir grupos (nivel B) que permitan categorizar las publicaciones revisadas y, por último, en la tercera etapa se debe visualizar un concepto mental de cada grupo (nivel A), generando un nombre o etiqueta para este. Esta metodología es la misma que se emplea en estudios con enfoques cualitativos pero a la inversa, es decir, se comenzaría por el nivel A y finalizaría con el nivel C (Bailey, 2005).

Para ello, en primer lugar, se ha realizado una breve exploración y comparación de la literatura existente acerca del transporte intermodal. En segundo lugar, se han definido tres categorías que permiten agrupar el conjunto de artículos analizados y que se muestran en la Figura 3, tomando como referencia principalmente las publicaciones de (Agamez-Arias & Moyano-Fuentes, 2017), (Crainic et al., 2018) y (Meisel, Kirschstein, & Bierwirth, 2013). Por último, se le ha asignado a cada categoría un nombre y se han clasificado las publicaciones para realizar posteriormente un análisis de forma estructurada.

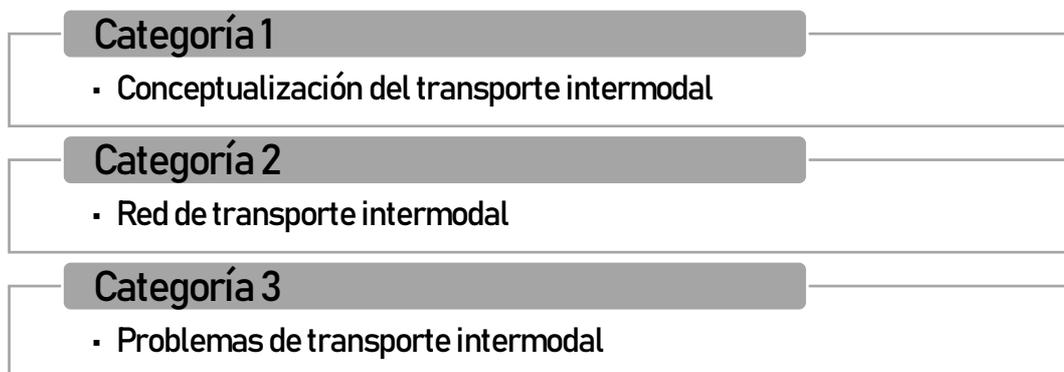


Figura 3. Categorías definidas para la revisión

Fuente: Elaboración propia

La taxonomía detallada se encuentra representada en la Tabla 3. El resto de esta sección incluye una breve descripción de cada categoría identificada y su alcance, que servirán de referencia para el posterior análisis de la literatura existente acerca del transporte intermodal.

Tabla 3. Estructura detallada de la taxonomía

Conceptualización del transporte intermodal

Red de transporte intermodal

Modos de transporte	Ámbito	Tipos de productos	UTI
Aéreo	Nacional	Perecedero	Contenedor
Carretero	Internacional	No Perecedero	Caja Móvil
Ferroviano	Urbano	Mercancía peligrosa	Semirremolque
Marítimo			

Problemas de transporte intermodal

Tipología	Métodos	Parámetros	Objetivos
Localización de instalaciones	Cualitativo		Tiempo
Diseño de red física	Heurística		Coste
Diseño de red de servicio	Metaheurística		Distancia
Distribución de tráfico	Algoritmo		Riesgo
Programación de servicios	Cuantitativo		
Enrutamiento	Caso de estudio		
Reposicionamiento			

4.1. Conceptualización del transporte intermodal

En esta categoría se analiza la evolución de la definición de transporte intermodal y su relación con otros términos utilizados en el mismo ámbito. Con ella se pretende investigar las distintas definiciones existentes y proponer una definición que abarque la mayor parte de las diferentes perspectivas con el transporte intermodal.

El factor más representativo del transporte intermodal es la interacción que se produce entre los distintos modos a lo largo de la cadena de transporte, aunque como se detallará en el siguiente capítulo, la definición de transporte intermodal difiere según el autor. Además, se observa una falta de precisión tanto en el uso de dicho término como en el de transporte multimodal y transporte combinado.

4.2. Red de transporte intermodal

Las redes de transporte surgen por la necesidad de conectar y transportar mercancías desde un punto origen hasta un punto destino. Conceptualmente, el transporte intermodal se puede entender como una red formada por arcos y nodos, siendo cada nodo el lugar donde se produce el traspaso de la mercancía de un modo de transporte a otro, sin que se produzca ruptura de carga.

A lo largo de la red de transporte aparecerán numerosos elementos entre los que destacan las infraestructuras necesarias para que se produzca el transporte. Las más frecuentes a nivel de superficie son la carretera y raíles, seguidas de los canales de vías navegables y mares. Las infraestructuras de cambio modal (aeropuertos, puertos, terminales intermodales) son las que permiten el intercambio de modos.

En esta categoría se caracterizarán también las redes de transporte descritas en la literatura investigada y categorizadas según su extensión geográfica, modos de transporte que intervienen (Crainic et al., 2018) y tipos de productos que transportan, además de las unidades de transporte intermodal utilizadas.

Debido a que la principal característica del transporte intermodal es la interacción de dos o más modos de transporte, los artículos encontrados en la literatura investigada se clasificarán según la combinación de modos de transporte detallada, así como la extensión geográfica de la red de transporte intermodal descrita.

Estas publicaciones se categorizarán también según los tipos de productos que transporte la red descrita, los cuales se han agrupado en función de su caducidad (perecederos y no perecederos) y peligrosidad. El tipo de producto será el principal condicionante para la elección del modo de transporte y, por consecuencia, de la unidad de transporte intermodal.

El transporte intermodal está ligado a la aparición y desarrollo de recipientes que albergan la mercancía y que pueden ser transportados por diferentes vehículos especializados, siendo posible su traspaso sin ruptura de carga. Por ello, se clasificarán los artículos revisados en función de las Unidades de Transporte Intermodal (UTIs) utilizadas, según sea contenedor, caja móvil o semirremolque.

El contenedor es un recipiente de carga apto para el transporte marítimo, viario y ferroviario, compuesto por una unidad estanca que protege la mercancía de la climatología. La caja móvil es una unidad pensada para el transporte de mercancías mediante los modos de transporte viario y ferroviario, pero no son una solución adecuada para el transporte marítimo; el contenedor y caja móvil son denominadas Unidades de Carga Intermodal (UCI). El semirremolque se trata de un vehículo sin motor ni eje delantero que se apoya sobre la cabeza tractora transmitiéndole su peso (Ministerio de Fomento, 2017a).

4.3. Problemas de transporte intermodal

El modelado del sistema de transporte intermodal ha crecido notablemente en los últimos años ya que permite reproducir situaciones reales con el fin de determinar patrones, métodos y procesos que respondan a los requisitos del transporte de mercancías mediante la definición de objetivos, identificación de parámetros y el reconocimiento de las limitaciones y/o restricciones en el campo de la intermodalidad (Agamez-Arias & Moyano-Fuentes, 2017).

Los modelos de transporte destacan por ser una herramienta de gran utilidad para la planificación y gestión del sistema de transporte, por lo que se realizará una división de los problemas de transporte según su tipología, como pueden ser la selección de rutas, localización de instalaciones o enrutamiento de vehículos, por ejemplo.

Los parámetros definidos para los problemas de transporte intermodal más utilizados son los costes, características de los vehículos e infraestructuras (peso, dimensiones, capacidad, cantidad), características de las unidades de transporte intermodal (capacidad, cantidad, dimensiones y peso), distancia y cantidad de mercancías transportadas, entre otros muchas más.

Algunos autores definen el sistema de transporte intermodal como un transporte sostenible, eficiente y de bajo impacto, tanto ambiental como socialmente (Prado, 2015), por lo que el objetivo relacionado con la responsabilidad medioambiental parece estar intrínseco en el propio término de intermodalidad. Además, se pretende impulsar el transporte intermodal como un modo de transporte más competitivo, teniendo en cuenta otros aspectos como son la eficiencia y fiabilidad.

Sin embargo, en la literatura revisada se observa que el principal objetivo definido en los problemas de transporte intermodal presentados son la reducción de tiempos y la minimización de costes. A lo largo de la red de transporte intermodal se incurren en numerosos costes, entre los que destacan aquellos que tienen lugar en las terminales intermodales (Arnold, Peeters, & Thomas, 2004), denominados costes de fricción, costes de amortización de los vehículos e infraestructuras, combustible (Bierwirth, Kirschstein, & Meisel, 2012), personal, seguros, mantenimiento y reparación, entre otros muchos más.

Los artículos revisados que contienen un modelo matemático para el transporte intermodal se clasificarán atendiendo a la tipología de problema que traten, según los tres niveles de planificación existentes. A su vez, se categorizarán según los métodos utilizados para la resolución de los problemas propuestos según sea cualitativo, cuantitativo o mediante la exposición de un caso de estudio, así como se especificarán los parámetros de entrada definidos y los objetivos perseguidos.

5. ANÁLISIS DE LA LITERATURA REVISADA

5.1. Conceptualización del transporte intermodal

Una de las primeras definiciones, y probablemente la que se puede designar como definición más común en el campo de la investigación del transporte intermodal fue propuesta por la Conferencia Europea de Ministros de Transportes (CEMT) y designa el transporte intermodal como “el movimiento de bienes en la misma unidad de carga o vehículo que usan sucesivamente varios modos de transporte sin descargar cosas en los trasvases” (ECMT & United Nations, 1997).

La palabra intermodalidad, al igual que otras relacionadas con avances tecnológicos (Comisión de Transporte del Colegio de Ingenieros de Caminos, 2005) como multimodalidad, co-modalidad y sincromodalidad pueden utilizarse de forma generalizada sin que se domine a la perfección el concepto y alcance del término.

En la Tabla 4 se presentan las definiciones para el transporte intermodal encontradas explícitamente en la literatura revisada. Estas revelan que existe una falta de consenso en la definición para el transporte intermodal, por lo que se puede afirmar que no hay una descripción para este término comúnmente aceptada.

Tabla 4. Definiciones de transporte intermodal en la literatura revisada

Definiciones	Referencias
Combinación de al menos dos modos de transporte en una sola cadena de transporte, sin cambiar el contenedor para las mercancías, con la mayor parte de la ruta recorrida por vía férrea, vía fluvial o marítima y con los viajes iniciales y finales lo más cortos posibles por carretera.	(Bontekoning & Macharis, 2004)
Combinación de diferentes modos de transporte con características únicas que lo distinguen de otros modos de transporte. La cadena intermodal está totalmente integrada y se puede ver como un servicio completo puerta a puerta.	(Macharis, Caris, Jourquin, & Pekin, 2011)
El transporte intermodal se refiere a cadenas o redes multimodales que involucran al menos dos modos de transporte en el cual la mercancía se transporta en un contenedor y no se maneja en los terminales intermodales en su trayecto desde el origen hasta su destino.	(Crainic et al., 2018)
Movimiento de mercancías en una misma unidad de carga o vehículo de carretera que utiliza sucesivamente dos o más modos de transporte sin manipular la mercancía en los cambios de modos.	(United Nations, 2001)
El transporte intermodal es la combinación de dos o más modos de transporte en una cadena de transporte.	(Behrends, 2012)

El transporte intermodal consiste en combinar modos de transporte, generalmente barco, camión o tren para transportar mercancías.	<i>(Newman & Yano, 2003)</i>
El transporte intermodal puede definirse generalmente como el envío de mercancías y el movimiento de personas que involucran más de un medio de transporte durante un único viaje sin interrupciones.	<i>(Jones, Cassady, & Bowden, 2000)</i>
El transporte intermodal hace referencia al transporte puerta a puerta de mercancías utilizando varios modos de transporte dentro de las unidades de carga intermodal (UCI) y sin cargar nueva mercancía en las UCIs durante el proceso de transporte.	<i>(Jar, 2007)</i>
La intermodalidad consiste en combinar y coordinar el funcionamiento de los diversos modos de transporte para ofrecer servicios continuos puerta a puerta.	<i>(Bernal, 2016)</i>
El transporte intermodal de mercancías se puede definir como el movimiento de la mercancía de origen a destino que utiliza dos o más modos de transporte como aire, aguas interiores, mar, ferrocarril y carretera. Su objetivo es proporcionar un servicio puerta a puerta sin interrupciones.	<i>(Chang, 2008)</i>
El transporte intermodal es el sistema de transporte que implica el uso sucesivo de, al menos, dos modos de transporte y en el cual la unidad de transporte intermodal no se divide para cambiar de modo.	<i>(Darabann, Stefanescu, & Crisan, 2012)</i>
El transporte intermodal es aquel en el que dos o más modos de transporte diferentes están vinculados de extremo a extremo para mover la mercancía y/o las personas desde el punto de origen al punto destino.	<i>(Southworth & Peterson, 2000)</i>
El transporte intermodal se puede considerar como un proceso para el transporte de mercancías y pasajeros mediante un sistema de redes interconectadas que involucran varias combinaciones de modos de transporte en el que todos los componentes están perfectamente vinculados y combinados de manera eficiente.	<i>(Yevdokimov, 2000)</i>
El transporte intermodal puede definirse como el transporte de mercancías que utiliza dos modos de transporte o más en la misma unidad de carga o vehículo sin que se produzca manipulación de la mercancía.	<i>(González, 2016)</i>
El transporte intermodal de carga refleja la combinación de dos o más modos de transporte (por ejemplo, carretera, ferrocarril, agua) dentro de una sola cadena de transporte. En general, se supone que la mercancía está en contenedores.	<i>(Bierwirth et al., 2012)</i>
El transporte de carga intermodal se define como el movimiento de mercancías en una unidad de carga (UCI), que utiliza sucesivamente varios modos de transporte sin el manejo de la mercancía en el transbordo entre los modos.	<i>(Ricci & Black, 2005)</i>
El transporte intermodal es un sistema de transporte que utiliza varios modos de transporte entre el origen y el destino por el cual la mercancía no se mueve individualmente de un modo de transporte a otro, sino que se mueve toda la unidad de transporte en la que se almacenan.	<i>(Ližbetin & Čaha, 2016)</i>

La principal cuestión radica en explicar por qué los diferentes autores e instituciones que han realizado publicaciones o investigaciones en el campo de la intermodalidad incluyen diferentes definiciones o, en muchos casos, variantes de las ya existentes.

Realizando un análisis de la literatura sobre el transporte intermodal se pueden encontrar algunas respuestas a esta cuestión, y es que el campo de la investigación intermodal está creciendo en las últimas décadas, por lo que parece ser que la definición aportada por la CEMT no sirve como marco general para todos los ámbitos.

En las definiciones mostradas en la Tabla 4 se puede ver cómo algunas presentan un enfoque más general, mientras otras aplican uno más específico. Por ejemplo, si se atiende a un alcance general, (Behrends, 2012) define el transporte intermodal como la combinación de dos o más modos en una cadena de transporte. Con esta definición podría darse por similares los términos multimodalidad e intermodalidad, ya que ambos tienen como base la combinación de modos de transporte.

Para ser más específicos, esta descripción debe completarse con la propuesta por la (United Nations, 2001), añadiendo que la mercancía debe viajar en una misma unidad de carga o vehículo de carretera, sin el manejo de estas en los transbordos. Además, existen diversos tipos de unidades de transporte intermodal y con multitud de configuraciones, aunque autores como (Crainic et al., 2018) o (Bierwirth et al., 2012) únicamente incluyen al contenedor como unidad de transporte.

Otros autores como (Ricci & Black, 2005) y (Jar, 2007) nombran en su definición el uso de Unidades de Carga Intermodal (UCI), concepto que incluye únicamente los contenedores y cajas móviles, por lo que no consideran los semirremolques como unidades para el transporte.

Según (Jones et al., 2000), la exclusión de la mercancía no contenerizada de algunas definiciones propuestas puede fundamentarse en la necesidad de distinguir movimientos de mercancía contenerizada y no contenerizada, debido a las diferencias en sus características y componentes. Sin embargo, si la mercancía no contenerizada se mueve a través de más de un modo de transporte, siempre que se incluya en una unidad de transporte y no se maneje en los trasvases de modo, seguirá tratándose de un transporte intermodal.

En cuanto a la distribución de modos, (Bontekoning & Macharis, 2004) destacan que el modo carretero debe unirse a los restantes para realizar la distribución inicial y final y no utilizarse como transporte principal. Este hecho hace que se caracterice y diferencie el transporte intermodal de otros medios por su nivel de seguridad, capacidad para cumplir con los plazos de entrega y minimización de costes.

En el ámbito del transporte intermodal, el transporte aéreo queda excluido en la mayoría de las ocasiones (Newman & Yano, 2003) (Bontekoning et al., 2004) debido a sus restricciones en cuanto al uso de las unidades de transporte intermodal, volumen y peso de la mercancía.

Por tanto, del análisis de las definiciones propuestas se puede extraer que el transporte intermodal implica que:

1. Se emplean dos o más modos de transporte diferentes y, por tanto, se realiza al menos un transbordo (Ricci & Black, 2005).
2. El transporte principal no se realiza por carretera sino por ferrocarril, agua o aire, mientras que los camiones se utilizan en las etapas iniciales y finales del movimiento de mercancía.
3. La mercancía debe viajar en una Unidad de Transporte Intermodal (UTI), siendo la más utilizada el contenedor.

Tras la definición propuesta para el transporte intermodal, se debe enfatizar en la diferencia entre los términos intermodalidad y multimodalidad. Según (González, 2016), el transporte internacional multimodal es el traslado de mercancías de un país a otro mediante el uso de más de un medio de transporte.

La literatura investigada sobre transporte multimodal tampoco muestra un consenso en la definición de dicho término. (Lin, Chiang, & Lin, 2014) consideran sinónimos los términos multimodal e intermodal, mientras que otros como (Harris, Wang, & Wang, 2015) afirman que el transporte intermodal es una variante del transporte multimodal.

Según el Convenio de las Naciones Unidas sobre el Transporte Multimodal, se entiende como transporte multimodal internacional “el porte de mercancías por dos modos diferentes de transporte, al menos, en virtud de un contrato de transporte multimodal, desde un lugar situado en un país en el que el Operador de Transporte Multimodal toma la mercancía bajo su custodia hasta otro lugar designado para su entrega”.

Según las Naciones Unidas, las operaciones de recogida y entrega de mercancías efectuadas en cumplimiento de un contrato de transporte unimodal, según se definan en ese contrato, no se consideran un transporte multimodal internacional. Con todo ello, el transporte multimodal internacional implica: un único contrato entre el Operador de Transporte Multimodal y su cliente, un operador calificado de transportes internacionales y un transporte internacional.

Por tanto, los términos multimodalidad e intermodalidad no son similares ni contrapuestos. Un mismo transporte puede ser catalogado como multimodal internacional e intermodal al mismo tiempo. Por ejemplo, un transporte internacional en el que no existe ruptura de carga y donde exista un único contrato entre el Operador de Transporte Multimodal y el cliente.

Según (González, 2016), el transporte intermodal, en cambio, exige una mayor planificación inicial, presenta costes frecuentemente algo superiores y necesita cumplir con requisitos formales algo más complejos (distintas cartas de porte). Sin embargo, los beneficios que genera son, por lo general, muy superiores a los del transporte multimodal.

El uso de varios modos de transporte, además de términos como multimodalidad e intermodalidad, también engloba otros conceptos como son co-modalidad y sincromodalidad. La co-modalidad se define como la “eficiencia en el uso de los modos de transporte, tanto individualmente como en el marco de una integración multimodal en el sistema de transporte europeo para alcanzar una utilización de recursos óptima y sostenible” (Ministerio de Fomento, 2011).

(Kapetanis, Psaraftis, & Spyrou, 2016) definen el transporte sincromodal como una evolución de la cadena de suministro multimodal, y como el siguiente paso después del transporte intermodal y co-modal. Según (Steadieseifi, Dellaert, Nuijten, Van Woensel, & Raoufi, 2014), la sincromodalidad implica una combinación estructurada, eficiente y sincronizada de dos o más modos de transporte, mientras que el transporte co-modal se orienta más al uso de los recursos.

(Harris et al., 2015) concluyen que el transporte multimodal se utiliza a menudo como sinónimo de transporte intermodal, co-modal y sincromodal. Sin embargo, autores como (Crainic & Kim, 2007) plantean las siguientes diferencias:

- a) Multimodalidad, si se utilizan diferentes unidades de almacenamiento móvil.
- b) Intermodalidad, cuando se utiliza una misma unidad de almacenamiento móvil.
- c) Co-modalidad, cuando es utilizado cooperativamente por más de un intermediario.
- d) Sincromodalidad, cuando la elección de los modos es flexible y depende de las circunstancias operativas.

En la Tabla 5 se presentan algunos aspectos que hacen referencia a los conceptos de multimodalidad, intermodalidad, co-modalidad y sincromodalidad, encontrados en la literatura revisada.

Tabla 5. Aspectos distintivos de los tipos de transporte investigados

Concepto	Aspectos distintivos
Multimodalidad	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Transporte de mercancías que combina al menos dos modos de transporte (ECMT & United Nations, 1997) ✓ Se realiza un único contrato de transporte (Contrato de Transporte Multimodal) (Naciones Unidas) ✓ La unidad de transporte puede ser una caja, un contenedor, una caja móvil, un vehículo de carretera, un ferrocarril o un barco (Steadieseifi et al., 2014)
Intermodalidad	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Combinación de dos o más modos de transporte en el que la mercancía viaja en una unidad de transporte intermodal y no se maneja en los trasvases de modos. ✓ La intermodalidad considera los flujos de materiales, operaciones e infraestructuras de transporte, operaciones informáticas, infraestructuras de telecomunicaciones y las actividades auxiliares vinculadas a la logística (Cambra-Fierro & Ruiz-Benitez, 2009) ✓ Los principales objetivos perseguidos son la minimización de costes y la sostenibilidad medioambiental (Cho, Kim, & Choi, 2012)
Co-modalidad	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Eficiencia en el uso de los modos de transporte, tanto individualmente, como en el marco de una integración multimodal, para alcanzar una utilización de los recursos óptima y sostenible (Ministerio de Fomento, 2011) ✓ Cada modo de transporte busca maximizar el beneficio del conjunto de modos utilizados. ✓ Lo suelen utilizar un grupo o consorcio de transportistas en una cadena de transporte (EVO, 2011)
Sincromodalidad	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Combinación estructurada, eficiente y sincronizada de dos o más modos de transporte (Steadieseifi et al., 2014). ✓ Se deben sincronizar básicamente tres aspectos: demanda del cliente, infraestructuras y terminales de transporte y modos de transporte implicados (Behdani, Fan, Wiegmans, & Zuidwijk, 2016) ✓ Los transportistas o clientes seleccionan de forma independiente y en cualquier momento el mejor modo de transporte en función de las circunstancias y/o requisitos del cliente (EVO, 2011) ✓ Se fundamenta en objetivos de coste, calidad y sostenibilidad.

5.2. Red de transporte intermodal

El transporte intermodal se puede entender conceptualmente como una red formada por arcos y nodos. Cada arco representa la utilización de un modo de transporte diferente y es en los nodos donde se produce el transbordo de la mercancía, sin ruptura de carga (Boardman, Malstrom, Butler, & Cole, 2003).

Los nodos que componen la red intermodal se denominan terminales intermodales y se tratan de infraestructuras dotadas de los servicios necesarios para permitir el trasvase de la mercancía de un modo a otro, siendo las más habituales los puertos, aeropuertos, terminales ferroviarias y plataformas logísticas.

En la Figura 4 se presenta una red intermodal formada por nodos de consolidación (A, B y C), nodos de origen y destino (nodos 1-9) y arcos (representados por flechas), donde cada modo de transporte ofrecerá su servicio. En los arcos representados se destaca el transporte principal (color azul), que utiliza habitualmente los modos marítimo y ferroviario, y la distribución inicial y final de la mercancía (color verde), para lo que se suele emplear el modo carretero.

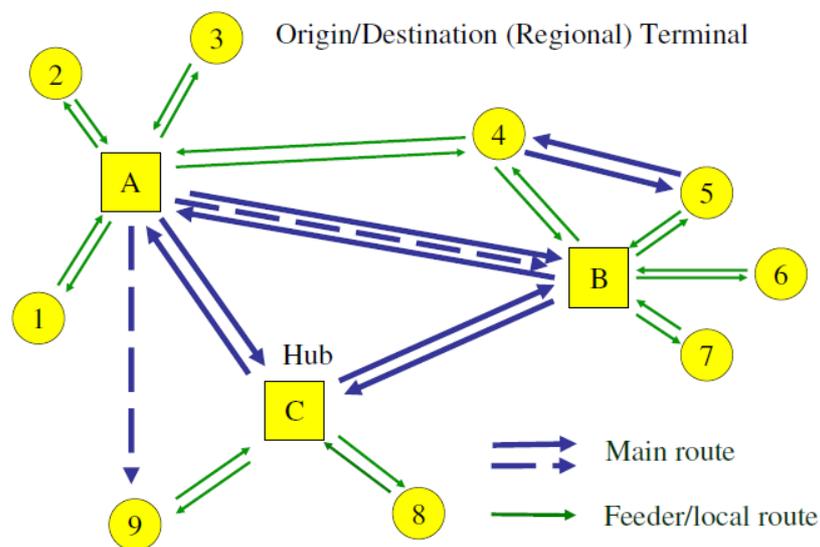


Figura 4. Red intermodal formada por arcos y nodos.

Fuente: (Crainic & Kim, 2007)

Con el objetivo de aprovechar las economías de escala, cuando se transportan bajos volúmenes de demanda, la mercancía se acumula en las terminales intermodales para ser posteriormente distribuidas hasta su destino (Crainic & Kim, 2007). Las terminales intermodales son un componente importante para el sistema del transporte intermodal y su eficiencia es vital para el desempeño de la red.

Según (Rodrigue, Comtois, & Slack, 2013), las cuatro funciones principales que define una red de transporte intermodal son las siguientes:

Composición. Proceso de consolidación de la mercancía en una terminal intermodal. La mercancía proveniente de diferentes proveedores se suele agrupar en los centros de distribución para enviarse por modos de transporte que admiten grandes cantidades, como son el marítimo y ferroviario. Este proceso se denomina “primera milla” y el transporte desde el lugar donde se encuentra la mercancía hasta la terminal intermodal se realiza habitualmente por camión, ya que ofrece servicios de flexibilidad y puerta a puerta.

Conexión. Implica un flujo de mercancía (almacenada en una unidad de transporte intermodal) mediante tren, barco o incluso camión. Esta transferencia de mercancía se lleva a cabo, al menos, entre dos terminales y puede realizarse tanto a nivel nacional como internacional.

Intercambio. El intercambio es el principal movimiento del transporte intermodal y se lleva a cabo en las terminales intermodales. Su función es trasvasar la mercancía de un modo de transporte a otro, siempre de la forma más eficiente posible.

Descomposición. Es el movimiento que hace referencia a la desconsolidación de la carga cuando llega a una terminal cercana a su destino. La carga se fragmenta y transfiere a otro modo de transporte, normalmente carretero, que se encarga de distribuirla en un ámbito local o regional. El transporte desde la terminal donde se desconsolida la carga hasta su destino final se denomina “última milla”.

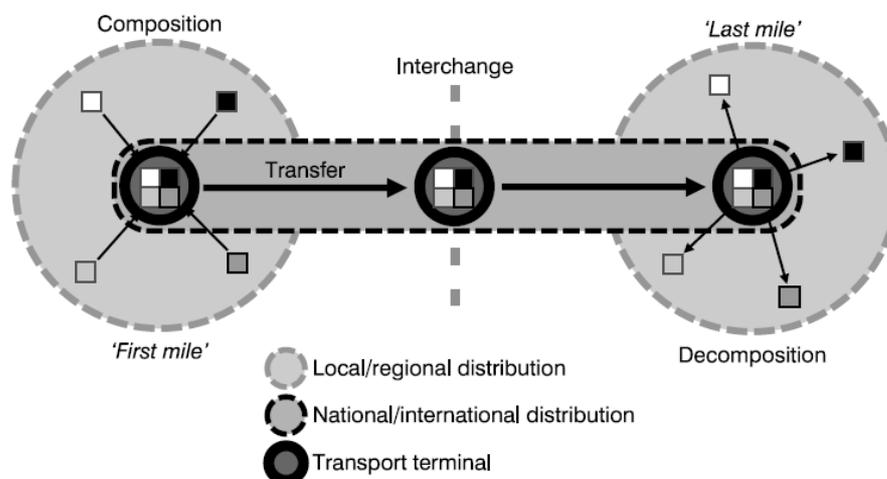


Figura 5. Red de transporte intermodal

Fuente: (Rodrigue et al., 2013)

5.2.1. Modos de transporte

La combinaci3n de modos de transporte m3s estudiada en la literatura investigada, tal y como se puede observar en la Tabla 6, son los modos carretero-ferroviario.

Tabla 6. Clasificaci3n de artculos segun la combinaci3n de modos de transporte

Combinaci3n de modos de transporte	Referencias
Carretero-ferroviario	(Macharis et al., 2011) (Bontekoning et al., 2004) (Behrends, 2017) (Heinold & Meisel, 2018) (Sommar & Woxenius, 2007) (T. Hanssen, Mathisen, & J3rgensen, 2012) (Bierwirth et al., 2012) (Pinto et al., 2018) (R. Wang, Yang, Yang, & Gao, 2018) (Arnold et al., 2004) (Limbourg & Jourquin, 2009) (Verma, Verter, & Zufferey, 2012) (Verma, Verter, & Gendreau, 2011) (Meisel et al., 2013) (Mostert, Caris, & Limbourg, 2017) (Janic, 2007) (Rizzoli, Fornara, & Gambardella, 2002)
Carretero-marítimo	(Macharis et al., 2011) (Erera, Morales, & Savelsbergh, 2005) (Arnone, Mancini, & Rosa, 2014)
Marítimo-marítimo	(Prata & Arsenio, 2017)
Ferroviario-marítimo	(Prata & Arsenio, 2017) (Arnone et al., 2014) (Erera et al., 2005) (Woxenius & Bergqvist, 2011)
Ferroviario-marítimo-aéreo	(Prata & Arsenio, 2017)
Carretero-aéreo	(Archetti & Peirano, 2019)
Carretero-ferroviario-marítimo	(Arnone et al., 2014) (Vasiliauskas, 2002)

El transporte unimodal por carretera ha sido desde hace mucho tiempo el modo más utilizado para el transporte de carga ya que ofrece mejores tiempos de tránsito. Sin embargo, su excesiva utilización para el transporte de mercancías ha provocado congestiones en las redes viales, numerosos accidentes y daños medioambientales de gran envergadura.

Por ello, uno de los factores que ha favorecido el impulso del transporte intermodal es su sostenibilidad medioambiental. (Heinold & Meisel, 2018) han realizado un estudio donde presentan un análisis comparativo de las emisiones procedentes del transporte unimodal por carretera y del transporte intermodal carretero-ferroviario, destacando que las emisiones de gases de efecto invernadero son un 90% menor cuando se utiliza la intermodalidad que cuando se utiliza el transporte unimodal por carretera, aunque estos datos varían en función del país y de otros factores, como pueden ser factores geográficos y políticos.

El estudio realizado por el Instituto Nacional de Transporte e Investigación de Seguridad presenta un análisis que incluye una serie factores para la elección entre el transporte intermodal y el transporte unimodal por carretera en función del número de respuestas obtenidas en dicho estudio (INRETS, 2000), tal y como se muestra en la Figura 6.

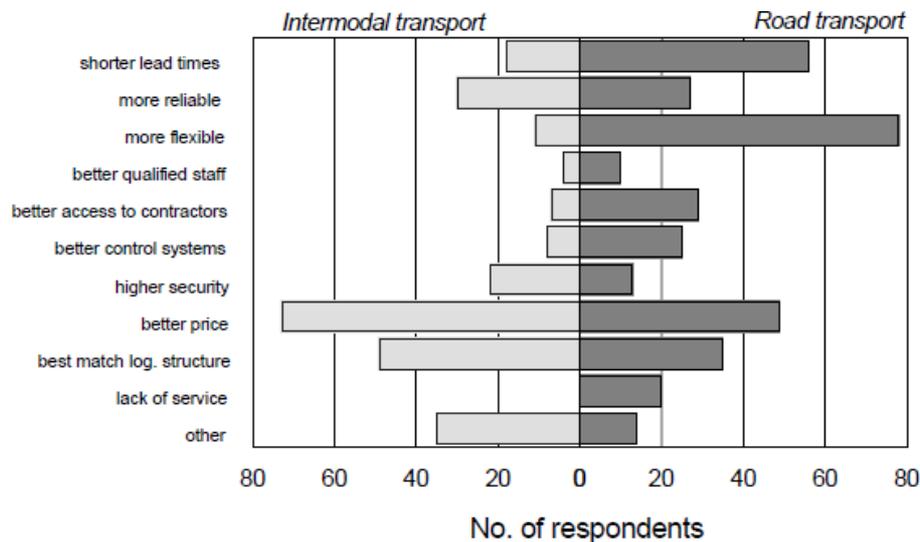


Figura 6. Factores para la elección entre el transporte intermodal y por carretera

Fuente: (INRETS, 2000)

De este se puede destacar que el coste es el uno de los factores más relevante, que las empresas adecuarán el sistema de transporte a su estructura logística y que el transporte intermodal es poco flexible, por lo que no es rentable para trayectos cortos. Por ello, el coste del transporte intermodal disminuye a medida que aumenta la carga; sin embargo, en el transporte unimodal por carretera los costes son constantes (Janic, 2007).

Aun así, los beneficios del transporte intermodal para trayectos largos siguen siendo evidentes, tanto que autores como (T. Hanssen et al., 2012) proponen medidas para favorecer el transporte intermodal frente al transporte unimodal por carretera, entre las que destacan la necesidad de aplicar una regulación más estricta de descanso para los camioneros y añadir una tasa de transporte cuando el trayecto por carretera supere cierta distancia.

Sin embargo, (Mostert et al., 2017) señalan que la introducción de impuestos o tasas viales podría desencadenar una disminución de la participación del modo carretero en el mercado, pudiendo llegar a una infrautilización del transporte intermodal, debido a que hoy por hoy es necesario el modo carretero para la mayoría de actividades de primera y última milla.

El desarrollo del transporte intermodal necesita de la presencia de suficientes infraestructuras para cada uno de los modos de transporte utilizados, además del avance de las terminales intermodales en el sentido de que permitan los transbordos de mercancías de la forma más segura y eficiente posible. Además, (Darabann et al., 2012) destacan que la eficiencia de los puertos y la situación económica de las compañías ferroviarias son dos factores de gran importancia para el impulso del transporte intermodal.

Según la definición de transporte intermodal propuesta por (Behrends, 2012), el transporte intermodal implica la combinación de diferentes modos de transporte. Sin embargo, (Bontekoning et al., 2004) señalan que el transporte intermodal de mercancías que emplea los modos carretero y ferroviario no es simplemente una mera combinación de ambos modos; sino que se debe incluir también una división del trayecto atendiendo al corto o largo recorrido y a la sincronización de los horarios.

De hecho, la combinación con los servicios ferroviarios de pasajeros dificulta el aumento de la cuota de mercado del ferrocarril en el sector del transporte de carga, ya que generalmente los trenes de carga solo pueden circular en horario nocturno, o entre trenes de pasajeros durante el día. Debido a esto, los tiempos de viaje asociados al transporte de mercancías por ferrocarril suelen ser altos, principalmente por las restricciones existentes para los viajes de carga durante el día.

Dado que los trenes de carga cuentan con muchas restricciones para operar en tramos de la mañana de mayor afluencia de pasajeros, los pocos que operan en horario diurno se conducen a velocidades algo más altas que los que operan en horario nocturno y, para garantizar la seguridad, se cargan menos. Por tanto, la mayoría de los movimientos de los trenes de carga, y particularmente los de largo recorrido, presentan altos costes y largas demoras debido al ineficiente uso de estos (Racunica & Wynter, 2005).

A la propuesta de (Bontekoning et al., 2004) se suman otros autores como (Arnold et al., 2004) añadiendo que la combinación de los modos carretero y ferroviario debe darse de forma que el transporte por carretera apoye al transporte por ferrocarril en los trayectos iniciales y finales, siendo siempre el trayecto ferroviario el de mayor longitud.

Esta división de trayectos para la red de transporte intermodal formada por la combinación de los modos carretero-ferroviario también ha sido propuesta por (R. Wang et al., 2018), (Bontekoning & Macharis, 2004) y (Limbourg & Jourquin, 2009) y se asemeja a la red intermodal definida por (Rodrigue et al., 2013) para cualquier combinación de modos, mostrada en la Figura 5. Por tanto, los tres segmentos mostrados en la Figura 7 y que definen la red intermodal formada por los modos carretero y ferroviario son los siguientes:

- Antes del recorrido (del inglés, *pre-haul*) o primera milla: proceso de recogida y transporte por camión a la terminal origen.
- Largo recorrido (del inglés, *long-haul*): transporte de la mercancía por ferrocarril desde la terminal origen a la terminal destino.
- Final del recorrido (del inglés, *end-haul*) o última milla: proceso de distribución de la mercancía mediante camión hasta el cliente final.

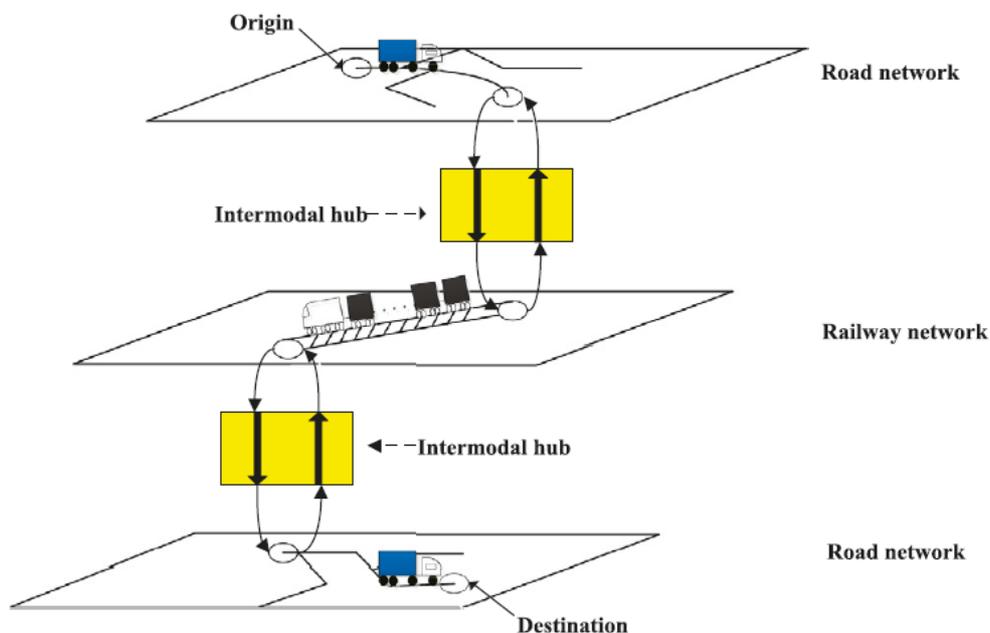


Figura 7. Red intermodal carretero-ferroviaria

Fuente: (R. Wang et al., 2018)

Para que la combinación de estos modos resulte competitiva, el transporte por ferrocarril requiere la agrupación de grandes cantidades de mercancías para reducir los costes de transporte (Bontekoning et al., 2004), además de ser significativamente más eficiente en energía que el transporte por carretera (Behrends, 2017).

Es por ello que el interés de una solución intermodal que incluya el transporte ferroviario y carretero dependerá de la medida en que los bajos costes del trayecto realizado por ferrocarril compensen los costes del transporte inicial y final por carretera y el coste en el que se incurre al realizar el transbordo de la mercancía en las terminales (T. E. S. Hanssen & Mathisen, 2011).

En definitiva, según (Bierwirth et al., 2012), para que el transporte intermodal resulte más rentable que el transporte unimodal por carretera se debe cumplir que:

1. El coste unitario por unidad de transporte y kilómetro debe ser más importante en el transporte ferroviario que en el transporte por carretera, de lo contrario el coste del transporte intermodal supera al unimodal debido a que las distancias a recorrer en una red intermodal son mucho mayores.
2. La distancia entre origen y destino debe ser superior a una determinada cifra que haga que se compense con los costes en los que se incurre en las terminales intermodales.
3. El factor tiempo no sea de relevante importancia, ya que el transporte intermodal conlleva más tiempo que el transporte unimodal por carretera.

El transporte intermodal por carretera y ferrocarril se ha convertido en un sector bien establecido para el envío de mercancías, aunque no en todos los países por igual (Arnold et al., 2004). Aquellos países que presentan una gran dependencia del transporte por carretera suelen contar con una infraestructura ferroviaria desfavorable (Pinto et al., 2018) como es el caso de Noruega, donde el ferrocarril cubre solo una parte del país, o son países donde los trenes de pasajeros tienen mucha más prioridad que los trenes de carga (T. Hanssen et al., 2012).

Para alentar al desarrollo del transporte intermodal por carretera y ferrocarril (IRRT, del inglés *Intermodal Rail-Road Transport*), (Behrends, 2017) ha desarrollado un marco conceptual que permite fomentar la integración del transporte ferroviario en los planes urbanos. A nivel europeo también se está trabajando continuamente en planes de desarrollo de transporte intermodal, a pesar de que el sistema de transporte europeo actual es fruto de una evolución marcada por iniciativas públicas y privadas contradictorias, multitud de guerras, financiaciones y políticas nacionales.

Tanto el transporte por carretera como ferroviario suelen utilizarse también para realizar la distribución inicial y final al transporte marítimo, como es el caso de la red intermodal presentada por (Arnone et al., 2014), donde se combinan los tres modos para transportar contenedores de China a Europa, cubriendo el transporte marítimo el trayecto principal. (Erera et al., 2005) también presentan una red intermodal en la que la utilización del transporte marítimo es de gran relevancia debido al carácter internacional con el que cuenta la industria química.

La combinación del modo marítimo con el transporte terrestre tiene doble finalidad: utilizar las economías de escala que presenta el transporte marítimo en largas distancias para ahorrar costes (de la misma forma que se hace con la combinación carretero-ferroviario) y dar servicio a una red internacional que, por la lejanía existente entre el origen y el destino, probablemente no sea viable utilizar el ferrocarril.

A pesar de que los costes de manejo de mercancías en los puertos son elevados por la utilización de infraestructuras especializadas (Macharis et al., 2011), las largas distancias recorridas vía marítima y las grandes capacidades que soportan las barcas hacen que el transporte intermodal marítimo-terrestre domine las actividades de comercio internacional.

El transporte intermodal que combina los modos terrestre y aéreo apenas ha sido tratado en la literatura revisada. Esto puede deberse a que la carga aérea se transporta en contenedores que han sido diseñados para adaptarse a la bodega de los aviones, por lo que no tienen las mismas medidas que los contenedores utilizados en el resto de los modos de transporte; hecho que imposibilita el trasvase de las UTIs y, por tanto, dificulta el adecuado desarrollo del transporte intermodal.

El modo aéreo se suele utilizar cuando se tienen orígenes y destinos lejanos, cuando la mercancía tiene alto ratio valor/peso o alto valor añadido o cuando se tratan de operaciones comerciales donde el factor tiempo es el más importante. Casi todas las aeronaves de pasajeros transportan mercancías en la bodega, aunque también existen aviones diseñados específicamente para el transporte de carga (Archetti & Peirano, 2019).

Las innovaciones técnicas y las implementaciones relacionadas con el material rodante y el manejo de la mercancía contribuyen en gran parte al crecimiento y desarrollo del transporte intermodal (Woxenius & Bergqvist, 2011). Todas las redes intermodales buscarán que su diseño permita que los modos de transporte que en ellas intervienen sean intercambiables sin que el sistema pierda competitividad, además de buscar la sostenibilidad medioambiental.

A modo de resumen se presenta, en la Figura 8, una comparación de las características básicas de cada modo de transporte, elaborado a partir del análisis de la literatura investigada. Para ello, se han evaluado los factores propuestos (rapidez, capacidad, seguridad y coste) del 0-4 a juicio del escritor basándose en los criterios desarrollados por los autores en la literatura revisada:

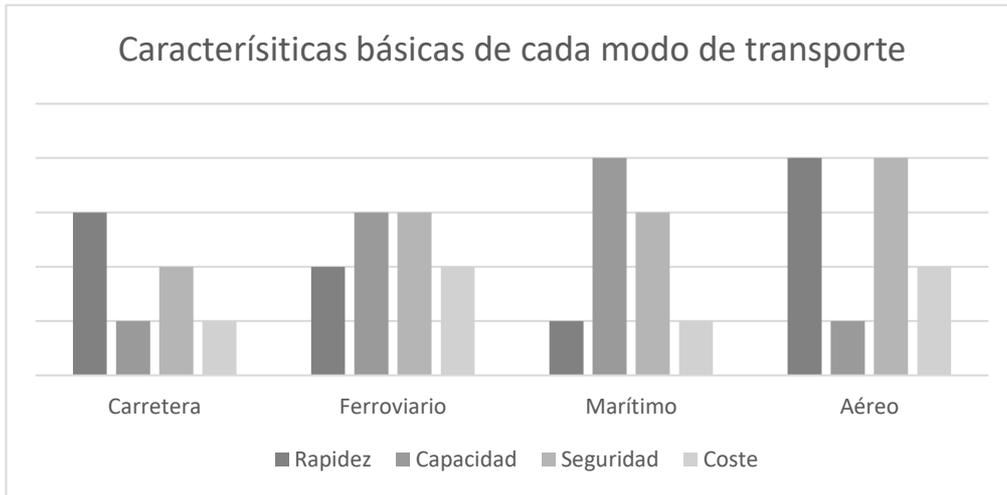


Figura 8. Características básicas de cada modo de transporte

Fuente: Elaboración propia

5.2.2. Àmbito

El àmbito hace referencia a la extensión geogràfica de las redes intermodales analizadas, es decir, si se extienden a nivel nacional, internacional o urbano. Debido a que el transporte intermodal es rentable para grandes cantidades de mercancías y largas distancias, tal y como se observa en la Tabla 7, la mayoría de las redes analizadas se desarrollan a nivel internacional.

Tabla 7. Clasificación de artículos según el àmbito geogràfico de la red intermodal

Àmbito geogràfico	Referencias
Internacional	<i>(Macharis et al., 2011)</i> <i>(Heinold & Meisel, 2018)</i> <i>(Sommar & Woxenius, 2007)</i> <i>(T. Hanssen et al., 2012)</i> <i>(Bierwirth et al., 2012)</i> <i>(Pinto et al., 2018)</i> <i>(Arnold et al., 2004)</i> <i>(Limbourg & Jourquin, 2009)</i> <i>(Meisel et al., 2013)</i> <i>(Mostert et al., 2017)</i> <i>(Janic, 2007)</i> <i>(Rizzoli et al., 2002)</i> <i>(Prata & Arsenio, 2017)</i> <i>(Arnone et al., 2014)</i> <i>(Erera et al., 2005)</i> <i>(Archetti & Peirano, 2019)</i> <i>(Woxenius & Bergqvist, 2011)</i>
Nacional	<i>(Verma et al., 2012)</i> <i>(Verma et al., 2011)</i> <i>(Vasiliauskas, 2002)</i>
Urbano	<i>(Behrends, 2017)</i>

A la hora de analizar el ámbito es de relevante importancia el contexto político de los países involucrados. Por ejemplo, el contexto en los Estados Unidos y Europa es diferente; en Europa, el transporte intermodal ha sido un objetivo político durante años, mientras que todavía es nuevo como objetivo político en los Estados Unidos (Bontekoning et al., 2004) y se encuentra en desarrollo en otros muchos más países, como Noruega (T. Hanssen et al., 2012).

En Europa, a la hora de tomar la decisión de abrir una nueva terminal sólo se tienen en cuenta los impactos que este hecho produce a nivel nacional, ignorando las ventajas que produce la apertura de una nueva terminal en las redes intermodales a nivel internacional (Limbourg & Jourquin, 2009).

De igual modo, (Behrends, 2017) indica que la planificación del transporte urbano local juega un papel importante en el desarrollo del transporte ferroviario de mercancía, por lo que incluir el transporte ferroviario de carga en los planes urbanos también produciría una mejora en los tramos de transportes intermodales que se realizan por ferrocarril.

Por tanto, hay que tener en cuenta que el comercio internacional necesita de infraestructuras que puedan apoyar el comercio entre varios socios que se encuentran a muchos kilómetros de distancia (Rodrigue et al., 2013).

5.2.3. Tipos de productos

Los tipos de productos más estudiados en la literatura revisada son los perecederos, tal y como se muestra en la Tabla 8, aunque la literatura acerca de los tipos de productos que se suelen transportar en las redes intermodales y la combinación de modos de transporte más adecuada es aún muy escasa.

Tabla 8. Clasificación de artículos según tipo de producto transportado

Tipos de productos	Combinación de modos de transporte	Referencias
Perecedero	Marítimo-marítimo	<i>(Prata & Arsenio, 2017)</i>
	Marítimo-ferroviario	<i>(Prata & Arsenio, 2017)</i> <i>(Elera et al., 2005)</i>
	Marítimo-ferroviario-aéreo	<i>(Prata & Arsenio, 2017)</i>
	Carretero-ferroviario	<i>(Sommar & Woxenius, 2007)</i> <i>(T. Hanssen et al., 2012)</i> <i>(Meisel et al., 2013)</i>
	Carretero-marítimo	<i>(Elera et al., 2005)</i>
No perecedero	Marítimo-marítimo	<i>(Prata & Arsenio, 2017)</i>
	Marítimo-ferroviario	
	Marítimo-ferroviario-aéreo	
	Carretero-ferroviario	<i>(Bierwirth et al., 2012)</i> <i>(Macharis et al., 2011)</i>
	Carretero-marítimo	<i>(Macharis et al., 2011)</i>
Mercancía peligrosa	Carretero-ferroviario	<i>(Verma et al., 2011)</i> <i>(Verma et al., 2012)</i>

La mercancía transportada a lo largo de la red intermodal difiere principalmente en términos de peso, tamaño, valor, fragilidad (Roson & Soriani, 2007) y características de conservación. Todos los aspectos son de relevante importancia para la planificación de la distribución y elección del modo de transporte, sin embargo, se debe prestar especial atención a las características de conservación que exige cada producto.

Para ello, (Reis, Fabian Meier, Pace, & Palacin, 2013) han propuesto unas indicaciones a seguir para determinar la mejor combinación de los modos carretero y ferroviario según el tipo de producto que se transporte.

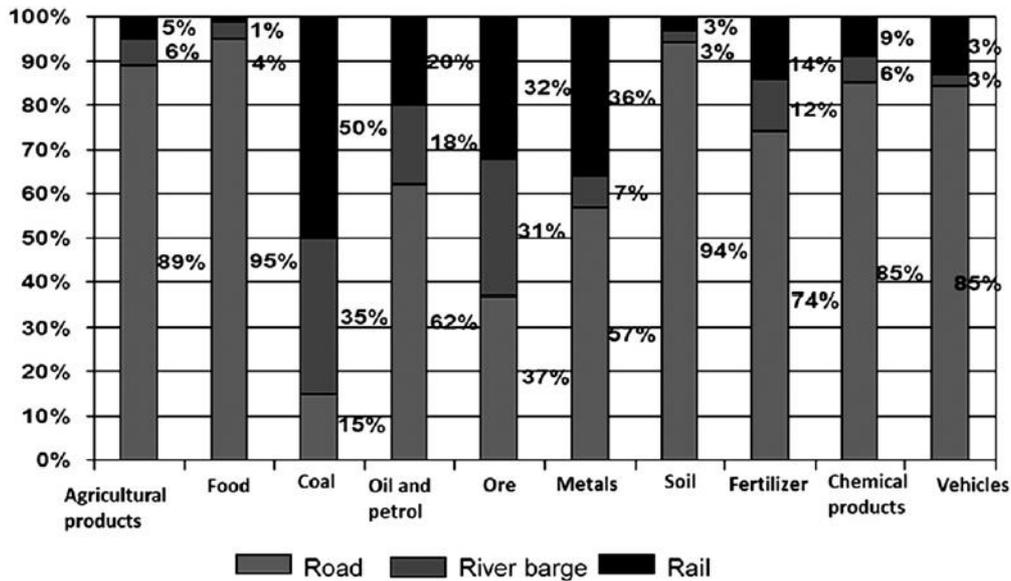


Figura 9. Combinación de modos de transporte según el tipo de producto

Fuente: (Reis et al., 2013)

En la Figura 9 se puede observar que para casi todos los tipos de productos el modo predominante es el carretero. Para el petróleo y gasolina se recomienda utilizar el camión debido a que se deben suministrar dichos productos a multitud de estaciones de repostaje y otros destinos; zonas en las que el acceso por ferrocarril probablemente sea imposible.

Sin embargo, para el carbón y minerales se recomienda usar como transporte principal el ferroviario ya que se tratan de bienes pesados y poco sensibles al tiempo al no perder calidad, por lo que se podrán transportar grandes cantidades a largas distancias.

Por otro lado, para los alimentos y productos perecederos como el pescado fresco, flores, frutas y verduras se recomienda el uso del modo carretero, debido a que son frágiles y susceptibles al tiempo.

Según (Sommar & Woxenius, 2007), para el transporte de productos perecederos el transporte intermodal está en desventaja en comparación con el transporte unimodal por carretera ya que se consume tiempo en los transbordos favoreciendo el deterioro de la mercancía, además de ser mucho más caro por la falta de regulación del modo carretero y la precariedad de las condiciones laborales de los camioneros (T. Hanssen et al., 2012).

Sin embargo, si se mejora la eficiencia de la red intermodal y se disminuyen los tiempos de transbordo, el uso del transporte intermodal podría resultar mucho más competitivo para el transporte de productos perecederos que el transporte por carretera. Un ejemplo de ello es el caso de Noruega, que desea favorecer la economía del país y aumentar las exportaciones de productos autóctonos, por ello está desarrollando soluciones de transporte intermodal que permitan que el pescado fresco y productos perecederos puedan exportarse (T. E. S. Hanssen & Mathisen, 2011).

Además de la necesidad de contar con un transporte eficiente en los tiempos, estos productos requieren de una cadena de frío ininterrumpida para asegurar que lleguen a su destino con toda su calidad y, por supuesto, con total inocuidad (Behdani et al., 2016), por lo que la localización de las terminales intermodales cerca de los centros de producción mejoraría la calidad de estos productos durante el transporte.

Otro caso que demuestra que transporte intermodal está evolucionando es el propuesto por (Prata & Arsenio, 2017) para el aeropuerto situado en Beja, que se está ampliando como plataforma logística del Puerto de Sines y que permitirá en 2020 exportar productos putrescibles, tecnológicos, textiles y calzados combinando el transporte ferroviario y aéreo, con ayuda del carretero para la distribución inicial y final.

Aunque el transporte ferroviario es un área de investigación con numerosas publicaciones, la literatura sobre el uso de trenes para envíos de materiales peligrosos es bastante escasa. (Verma et al., 2012) y (Meisel et al., 2013) afirman que el uso del transporte intermodal carretero-ferroviario resulta factible para el transporte de mercancías peligrosas, aunque el riesgo aumenta para el uso del modo carretero en el caso de transportar cloro y combustibles fósiles, de la misma forma que en el transporte ferroviario para el caso del amoníaco y gas licuado de petróleo (Milazzo, Lisi, Maschio, Antonioni, & Spadoni, 2010).

Además, en el modo ferroviario el riesgo que se asume en el transporte de mercancías peligrosas depende principalmente de la longitud del tren, de la posición del vagón que transporta dicha mercancía y del número de transbordos que se realicen.

5.2.4. UTI

Las UTIs (Unidades de Transporte Intermodal) son un elemento clave en el transporte intermodal. Las actividades de transporte relacionadas con el contenedor han crecido notablemente en los últimos 10 años y la tendencia no muestra ningún signo de desaceleración; siendo el uso del contenedor muy superior al de las cajas móviles y semirremolques, como se puede observar en la Tabla 9.

Tabla 9. Clasificación de artículos según la UTI utilizada

UTI	Referencias
Contenedor	(Macharis et al., 2011) (Heinold & Meisel, 2018) (Sommar & Woxenius, 2007) (T. Hanssen et al., 2012) (Arnold et al., 2004) (Limbourg & Jourquin, 2009) (Meisel et al., 2013) (Mostert et al., 2017) (Janic, 2007) (Prata & Arsenio, 2017) (Arnone et al., 2014) (Elera et al., 2005) (Archetti & Peirano, 2019) (Verma et al., 2012) (Verma et al., 2011) (Woxenius & Bergqvist, 2011)
Semirremolque	(Woxenius & Bergqvist, 2011)

Algunos autores como (Crainic et al., 2018) y (Bontekoning & Macharis, 2004) en la definición que proponen de transporte intermodal hacen referencia únicamente al contenedor como unidad de transporte intermodal, excluyendo así las cajas móviles y semirremolques. Según la Conferencia Europea de Ministros de Transporte, el contenedor se usa como término genérico para una caja que almacena mercancías, suficientemente fuerte para un uso repetido, comúnmente almacenable y equipada con dispositivos para permitir su transferencia entre modos (ECMT & United Nations, 1997).

Para ello, deben existir instalaciones encargadas de la consolidación, manejo y cambio de modos de transporte (Ishfaq & Sox, 2010), es decir, que faciliten el transbordo de la mercancía. Además, las distintas empresas que quieran operar en el mercado deben disponer de contenedores que puedan ser apilados usando grúas o puentes grúas. También, deben poseer en caso de ser necesario camiones aptos para el transporte de cajas móviles y semirremolques, que resultan más caros que los camiones usados habitualmente.

El creciente uso del contenedor ha sido impulsado por la seguridad que ofrece en relación con las pérdidas y daños, aunque las cajas móviles brindan también algunas ventajas. La carga de cajas móviles resulta mucho más fácil para los camiones, ya que no tienen que cargarse ni descargarse desde el nivel del suelo. Además, su construcción menos rígida también significa que tienen un peso de tara más bajo (Monios & Bergqvist, 2017).

En la actualidad existen multitud de configuraciones y dimensiones de estos dos tipos de UCIs (contenedor y caja móvil), lo que genera por un lado ineficiencias en las terminales intermodales a la hora de manipularlas, incrementando los tiempos y costes de fricción y, por otro lado, ineficiencias en las configuraciones de carga en los vagones. Además, mientras que los contenedores ocupan las dimensiones que ofrecen los vehículos de carretera en su totalidad, las cajas móviles en su mayoría no son apilables. Por todo ello, a nivel europeo se esté trabajando en una solución de normalización de una unidad de carga que sea apilable con todo el espacio de una caja móvil (UECI).

En cuanto a la forma de carga de los contenedores se distinguen dos: FCL (del inglés, *Full Container Load*), que designa que un contenedor se ha cargado completamente, o LCL (del inglés, *Less Than Container Load*), que implica que la mercancía ocupa menos que el espacio total de un contenedor completo, lo que significa que el contenedor será compartido y en él viajarán distintas mercancías de varios proveedores.

En la literatura investigada no hay establecido un estándar que determine cuál es la mejor opción, pero si se ha encontrado que el uso de FTL se da mayoritariamente en el transporte ferroviario (Meisel et al., 2013), deduciendo así que la consolidación de la carga resulta de gran importancia para reducir los costes de este modo de transporte.

Cada tipo de contenedor está diseñado, en la mayoría de las ocasiones, para transportar uno o varios tipos de productos. Los contenedores para tanques, también denominados tanques ISO, están diseñados para el transporte intermodal por carretera, ferrocarril y barco y suelen transportar líquidos, gases, polvos y carga a granel (Erera et al., 2005) y, además, no requieren de infraestructura especializada en los puertos.

Los contenedores secos (o dry van) son los más comunes y se suelen emplear para transportar carga seca como son pallets, cajas, máquinas o muebles. En caso de tratarse de alimentos o productos que necesitan una temperatura de conservación baja, se utilizarán contenedores refrigerados (Reefer). Otros menos conocidos son los denominados Open Top, Flat Rack y Open Side, que se usan para cargas voluminosas, atípicas y mercancías de gran largura, respectivamente.

Según (Bontekoning et al., 2004), el uso de las UTIs aumenta la eficiencia de la cadena de transporte en tanto que permite la estandarización de los equipos de transporte y transferencia, lo que hace que las operaciones en las terminales intermodales sean más eficientes (T. Hanssen et al., 2012). Por otro lado, (Limbourg & Jourquin, 2009) señalan que la eficiencia de la red intermodal también dependerá de la localización de las terminales, sobre todo las especializadas en contenedores.

El transporte de contenedores por ferrocarril y carretera predomina por excelencia sobre los demás modos y unidades de transporte. En este existen dos modalidades: transporte acompañado y no acompañado. En el primer caso en el trayecto realizado por vías férreas únicamente se transporta la unidad de carga; sin embargo, en el segundo caso el camión completo se coloca en vagones con plataformas adaptadas mediante una rampa y se transporta el conjunto.

Algunas definiciones para el transporte intermodal, como las propuestas por (Ricci & Black, 2005) y (Jar, 2007) excluyen al semirremolque como unidad de transporte. Esto ha dado paso a realizarse investigaciones acerca de su desuso en el transporte intermodal, como la que han llevada a cabo (Woxenius & Bergqvist, 2011), quienes se centran en determinar por qué se usa el ferrocarril en mayor medida para mover contenedores que semirremolques, deduciendo así que estas cuestiones varían según el mercado.

(Rizzoli et al., 2002) presentan otra de las razones por las que el uso del contenedor predomina sobre el resto, y es por la facilidad de transferencia de esta UTI en las terminales intermodales. Por ejemplo, en el transporte marítimo las UTIs que se utilizan son contenedores ISO estandarizados y apilables, mientras que si se utilizan semirremolques o cajas móviles en el transporte ferroviario-carretero no resultan intercambiables con el modo marítimo.

En términos de mercados, los semirremolques sirven principalmente para flujos intrarregionales, mientras que el principal mercado de transporte de contenedores marítimos es el comercio transoceánico (Monios & Bergqvist, 2017). El desarrollo de los servicios de contenedores transoceánicos ha sido impulsado por el crecimiento en el comercio internacional hacia y desde el Lejano Oriente (Woxenius & Bergqvist, 2011).

Aun así, el auge del contenedor ha impactado de tal forma en el mundo marítimo que ha dado lugar a la creación de mega buques para transportar grandes cantidades de contenedores en movimientos intercontinentales. Estos buques no deben detenerse con frecuencia y, además, no son operables en la mayoría de los puertos por sus grandes dimensiones.

En consecuencia, la red intermodal se ha ampliado agregando un nuevo enlace: los mega buques se detienen en los puertos más importantes y los contenedores se transfieren a barcos más pequeños para su distribución a puertos en los que no pueden acceder los buques de grandes dimensiones. Esto ha hecho que se modifiquen las rutas tanto marítimas como terrestres, principalmente porque estos mega buques no pueden navegar a través del Canal de Panamá.

5.3. Problemas de transporte intermodal

Una red de transporte intermodal describe el movimiento de mercancías desde un origen a un destino y está compuesta por zonas de transferencia de mercancías, denominadas nodos y rutas, que son los enlaces entre los nodos. Los problemas de transporte intermodal incluyen tanto los nodos existentes en cada red como los diversos modos de transporte que pueden operar en estas (Boardman et al., 2003).

El modelado de sistemas de transporte intermodal se utiliza cada vez más ya que permite adaptar o reproducir situaciones reales para determinar patrones, métodos y procesos que responden a los requisitos del transporte de mercancías mediante la optimización de los recursos asignados, la identificación de variables, el reconocimiento de limitaciones y/o restricciones y el alcance de los objetivos deseados.

(Crainic & Laporte, 1997) clasifican los problemas de transporte según tres niveles de decisión: estratégico, táctico y operacional. El primer nivel se centra en la configuración de las estrategias del sistema de transporte para horizontes largos, mientras que el segundo nivel tiene como objetivo garantizar una asignación eficiente de los recursos existentes. Los problemas operativos deben comprobar que la demanda se satisfaga dentro de los criterios de servicio requeridos y que los recursos se utilicen de manera eficiente.

Algunos ejemplos típicos de decisiones estratégicas son la ubicación de instalaciones y el diseño de redes físicas, que son una generalización de las formulaciones de ubicación de instalaciones. Los modelos de ubicación se centran mayoritariamente en determinar la localización óptima de una nueva terminal intermodal, mientras que los modelos de diseño de redes físicas se refieren a la configuración de la red de infraestructuras. Además, (Bontekoning & Macharis, 2004) incluyen en este nivel de planificación modelos como la cooperación entre compañías que transportan mercancías en distancias cortas, la determinación del tamaño de la flota de camiones y el diseño de las terminales.

Las decisiones tácticas se relacionan con: el diseño de la red de servicio, que incluye la selección de rutas o itinerarios (terminal de origen y destino, ruta física y paradas intermedias) y características de los servicios a ofrecer, la distribución del tráfico entre orígenes y destinos (servicios utilizados, terminales de paso y las operaciones a realizar en las terminales) y las especificaciones de las políticas a seguir en cada terminal, así como la asignación de tareas entre terminales. Además, se incluyen decisiones en cuanto al cómo reposicionar vehículos vacíos y cómo asignar recursos para preparar la planificación a nivel operativo (Crainic & Laporte, 1997).

Las decisiones operativas se centran en la asignación de recursos, programación de servicios y actividades a realizar (principalmente actividades de mantenimiento), además del enrutamiento de vehículos y el reposicionamiento de vehículos vacíos (Caris, Macharis, & Janssens, 2008). Los problemas tácticos y operativos son similares, pero mientras la planificación táctica se centra en el “cuál” y “cómo”, la planificación operativa hace referencia al “cuándo” (Crainic & Laporte, 1997).

En la Figura 10 se muestra una clasificación de la tipología de problemas de transporte según los niveles definidos anteriormente.

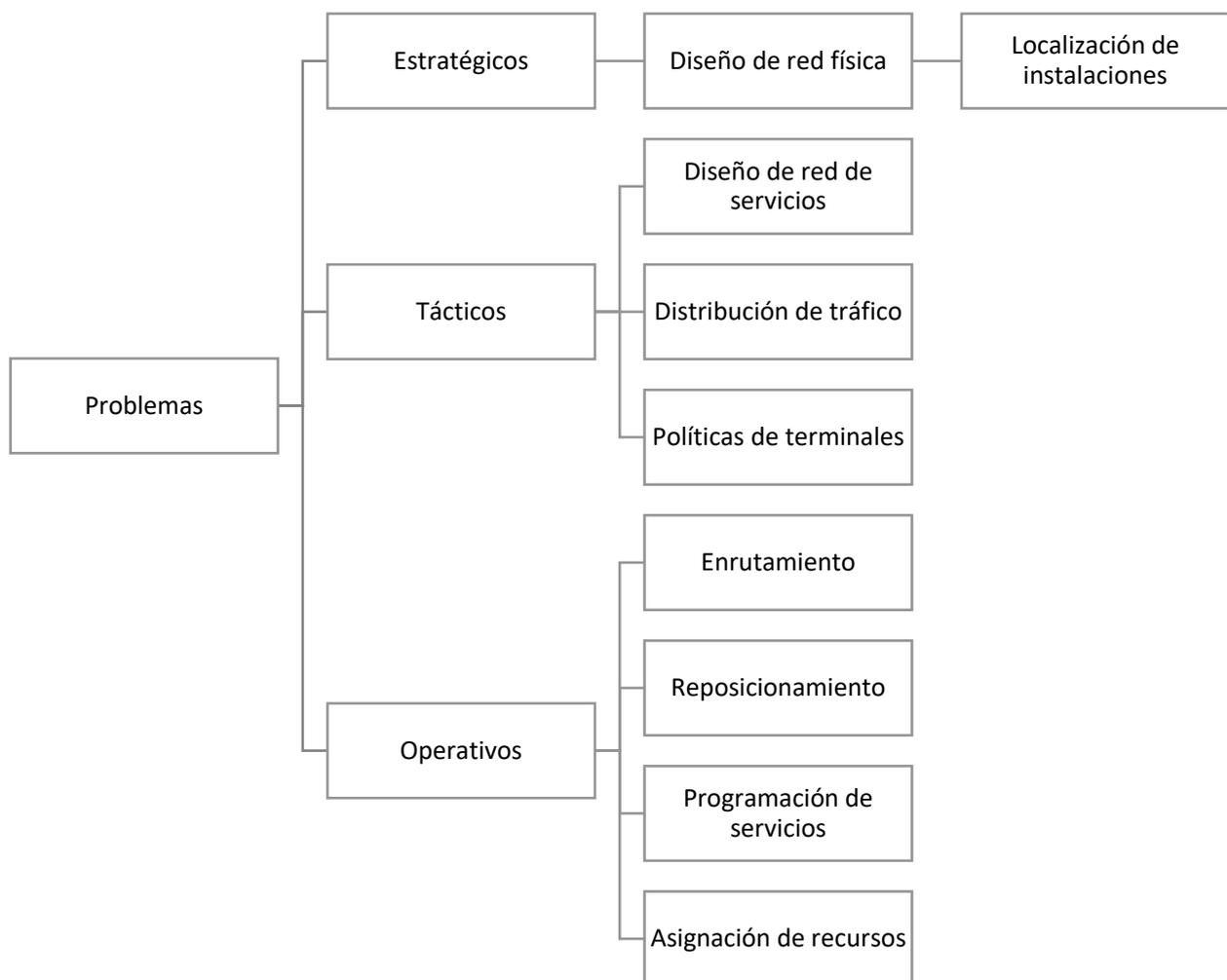


Figura 10. Clasificación de problemas de transporte intermodal

Fuente: Elaboración propia

Los métodos de resolución para estos problemas se detallarán a continuación, aunque la mayoría de los autores se han decantado por el uso de métodos cuantitativos o la resolución mediante un caso real.

Además, se ha podido observar que las variables y parámetros definidos en los modelos revisados son prácticamente similares, aunque presentan algunas variaciones según la tipología del problema. Los objetivos establecidos para los problemas de transporte intermodal suelen ser el coste y tiempo y son los que se aplicarían a cualquier problema de transporte.

5.3.1. Tipología y métodos de resolución

En la Tabla 10 se presenta una clasificación de los artículos según la tipología de problema, categorizados a su vez por los niveles de planificación según se indicó en la Figura 10.

Tabla 10. Clasificación de artículos según tipo de problema y métodos de resolución

Nivel de planificación	Tipología de problemas	Métodos ¹			Referencias
		CN ²	CL	CS	
Estratégico	Localización de instalaciones	H			(Racunica & Wynter, 2005)
				X	(Macharis et al., 2011)
		MH			(Abbassi, Alaoui, & Boukachour, 2019)
		A			(Sörensen & Vanovermeire, 2013)
		MH			(Sörensen, Vanovermeire, & Busschaert, 2012)
		A			(Limbourg & Jourquin, 2009)
	H			(Arnold et al., 2004)	
Diseño de red física	A			(Meng & Wang, 2011)	
	A			(R. Wang et al., 2018)	
Táctico	Diseño de red de servicio			X	(Riessen, Negenborn, Dekker, & Lodewijks, 2013)
				X	(Bell, Liu, Angeloudis, Fonzone, & Hosseinloo, 2011)
				X	(Arnone et al., 2014)
	Distribución de tráfico	A			(Verma et al., 2011)
		A			(Verma et al., 2012)
Operativo	Programación de servicios	H			(Corry & Kozan, 2006)
	Enrutamiento y reposicionamiento			X	(Ereza et al., 2005)
		A			(Braekers, Caris, & Janssens, 2014)
	Enrutamiento	A			(X. Wang & Regan, 2002)
		A			(Jula, Dessouky, Ioannou, & Chassiakos, 2005)
H				(Caris & Janssens, 2008)	

¹ Métodos: CL-Cualitativo, CN-Cuantitativo, CS-Caso de Estudio

² Métodos cuantitativos: H-Heurística, MH-Metaheurística, A-Algoritmo.

A nivel estratégico, los problemas que se centran en la localización de las terminales intermodales se denominan, según la literatura revisada, *Intermodal Terminal Location Problem (ITLP)*. El principal objetivo de este tipo de problemas es, dado un conjunto de clientes que se deben satisfacer y un número de terminales que se deben establecer en los nodos de la red de transporte, ubicar dichas instalaciones para poder determinar posteriormente la mejor ruta entre cada origen y destino de manera que se minimice el coste total o tiempo de transporte.

Además, se debe tener en cuenta que cada cliente tiene su demanda, mientras que cada terminal tiene una capacidad limitada y un coste de uso, por lo que una práctica común para problemas de transporte intermodal es definir primero el número y localización de las terminales intermodales a ubicar y posteriormente seleccionar las rutas de transporte (Lin & Lin, 2016), tratándose según (Crainic & Laporte, 1997) de dos niveles de decisión diferentes.

(Arnold, Peeters, Thomas, & Marchand, 2001) presentan de forma general las pautas a seguir para problemas de ubicación de terminales explicando sus ventajas y desventajas. Este hecho sirvió de partida para que (Arnold et al., 2004) propusieran un modelo de programación de enteros mixtos para establecer la ubicación óptima de terminales intermodales en la red intermodal carretero-ferroviaria para el transporte de contenedores en la Península Ibérica.

Este modelo ha sido estudiado posteriormente por (Sörensen et al., 2012) y (Sörensen & Vanovermeire, 2013) quienes demuestran que se trata de un problema NP-hard, por lo que obtener su solución no es nada trivial. Para ello han desarrollado una metaheurística que permite obtener rápidamente buenas soluciones en dos fases; la primera fase utiliza el algoritmo GRASP y se centra en la construcción de la solución, mientras que en la segunda fase se mejora la solución obtenida en la primera con un algoritmo de búsqueda local.

De igual forma, (Abbassi et al., 2019) han desarrollado también un ITLP utilizando para su resolución una metaheurística compuesta por dos etapas; en la primera se combina una serie de heurísticas para encontrar la mejor solución y se utiliza como solución inicial para la segunda fase, donde se mejora dicha solución. (Racunica & Wynter, 2005) proponen un modelo entero lineal no mixto de localización de terminales que, una vez convertido a lineal, se resuelve mediante dos heurísticas con el objetivo de incrementar la cuota de mercado del ferrocarril.

En el área de problemas de ubicación de terminales varios investigadores han desarrollado nuevas formulaciones y mejores métodos de resolución que permiten resolver problemas más grandes y de forma más sencilla, con el fin de que sirvan como herramienta de ayuda para la toma de decisiones.

Este es el caso de los modelos denominados “p-hub problem”, que consisten en ubicar un número de instalaciones p en los nodos de la red y asignar demanda a estos nodos, contando con que el número de instalaciones (o terminales) p está definido (Sörensen & Vanovermeire, 2013), por lo que reduce considerablemente la dificultad del problema.

(Macharis et al., 2011) proponen un marco de tres modelos aplicado a un caso real en Bélgica cuyo objetivo es instalar un número p de terminales teniendo en cuenta las terminales ya existentes. (Limbourg & Jourquin, 2009) aplican un algoritmo para resolver el “p-hub problem” utilizando un conjunto de ubicaciones dadas con el fin de determinar la localización óptima de las terminales de acuerdo con la distribución del flujo de tráfico y su dispersión geográfica a lo largo de la red.

Ambos autores hacen uso de un software denominado NODUS, basado en un Sistema de Información Geográfica (SIG) que mediante un algoritmo crea una "red virtual" completa con todos los enlaces virtuales correspondientes a las diferentes rutas y que facilita el problema de localización de terminales a medida que minimiza los objetivos propuestos.

Los ITLP se suelen aplicar a casos de exportación e importación que requieren la integración de diferentes modos, casos de transporte de materiales peligrosos y para el transporte masivo de mercancías (Abbassi et al., 2019), ya que ofrecen soluciones rentables según el emplazamiento de las terminales (Agamez-Arias & Moyano-Fuentes, 2017).

La ubicación de las terminales determina la eficiencia de una red de transporte (Limbourg & Jourquin, 2009), y la configuración de dicha red condiciona los costes de distribución de la mercancía así como la planificación y organización de la misma red, pudiendo hacer que el flujo de mercancías aumente o disminuya en función del emplazamiento elegido (Macharis et al., 2011).

El problema de diseño de una red intermodal es una generalización de los problemas de ubicación de instalaciones, que en la literatura se denominan HSND (del inglés, *Hub and spoke network design*). Su aplicación al campo del transporte intermodal (IHSND, del inglés *Intermodal Hub and spoke network design*) es bastante escasa debido a que el transporte de carga intermodal es un aún un sistema emergente y hasta ahora no se ha comenzado a explorar en detalle (Bontekoning et al., 2004).

En estos problemas se definen gráficos formados por arcos y nodos que representan la red de transporte intermodal, siendo algunos de los nodos los orígenes y destinos de la mercancía. Los arcos tendrán características como longitud (distancia de transporte) y parámetros como demanda, coste y tiempo, que pueden estar sujetos a incertidumbre (R. Wang et al., 2018).

(Meng & Wang, 2011) han desarrollado un modelo para diseñar una red intermodal integrada por los modos carretero-ferroviario para el transporte de contenedores de múltiples tipos. Este modelo ha sido analizado posteriormente por (R. Wang et al., 2018) para desarrollar un modelo de programación lineal entero-mixto similar, el cual han resuelto utilizando un algoritmo de búsqueda genética.

Las decisiones tácticas y operativas se desarrollan una vez proporcionada la red física de transporte, por lo que no están sujetas a las decisiones de ubicación. Estas pueden relacionarse con cuatro tipos de tomadores de decisión, basados en las cuatro actividades principales del transporte de carga intermodal, según se definieron en el capítulo anterior.

Primero, los operadores de la primera y última milla realizan la planificación y programación de camiones entre las terminales y los orígenes y destinos. En segundo lugar, los operadores de terminales gestionan las operaciones de transbordo de carretera a ferrocarril o barcaza, normalmente.

En tercer lugar, los operadores de red son responsables de la planificación de la infraestructura y la organización del transporte por ferrocarril o barcaza, siendo este tramo el transporte principal. Finalmente, los operadores intermodales pueden ser considerados como usuarios de la infraestructura y servicios; son los encargados de seleccionar la ruta adecuada para los envíos a través de toda la red intermodal.

Según (Crainic, 2000), el principal objetivo de las decisiones tácticas como son el diseño de las redes de servicio es una generalización de problemas como la selección de servicios y rutas, especificación de operaciones de terminal, enrutamiento de vehículos y reposicionamiento de vehículos vacíos.

(Riessen et al., 2013) tratan el problema del diseño de la red de servicio con el objetivo de obtener el programa de servicio óptimo entre un conjunto de terminales dadas mediante un modelo matemático que combina la selección de rutas con el enrutamiento de vehículos. En la misma línea, (Bell et al., 2011) proponen un modelo en el que los contenedores son transportados en una red con las frecuencias de servicios dadas y con previa asignación de una matriz origen-destino para un transporte de mercancía contenerizada.

Este modelo ha sido posteriormente ampliado por (Arnone et al., 2014), quienes aplicaron el enfoque basado en la frecuencia introducido por (Bell et al., 2011) a una red intermodal, que consiste básicamente en definir con qué frecuencia se ofrecen los servicios determinados y se realizan las operaciones de carga y descarga en las terminales intermodales.

La distribución del tráfico se centra en determinar los servicios utilizados, terminales de paso y las operaciones a realizar en las terminales. (Verma et al., 2011) proponen un modelo aplicado a una red intermodal de transporte carretero-ferroviaria de mercancía peligrosa, con el que determinan la ruta que debe seguir cada vagón, la cantidad de diferentes tipos de trenes requeridos y las operaciones a realizar en los astilleros. Este modelo ha sido utilizado posteriormente por (Verma et al., 2012) para planificar a nivel táctico el transporte de mercancía peligrosa a través de una red intermodal con múltiples terminales cuando los cargadores y receptores tienen acceso a varias terminales intermodales.

La resolución de estos modelos mediante algoritmos, como la búsqueda tabú, y aplicaciones a casos reales prueban que resultan adecuados para redes de transporte intermodales, sobre todo aquellas que implican movimientos internacionales. Además, los resultados de los modelos propuestos no son satisfactorios si se transportan pocas cantidades de mercancía, ya que una de las principales características del transporte intermodal son las economías de escala que se dan en el transporte principal al mover grandes cantidades utilizando trenes o barcazas.

El fin último de los problemas planteados, como cualquier otro problema de transporte, es mejorar las operaciones de movimiento de carga en redes intermodales. Para ello se debería hacer mayor hincapié en las operaciones de primera y última milla, que son las que presentan mayor riesgo durante el transporte (Verma et al., 2012), y también se debería tener en cuenta a la hora de plantear los problemas que cada puerto tiene unos tiempos y frecuencias de envíos y recepción diferentes (Arnone et al., 2014).

En los modelos planteados de diseño de redes se realizan planes de transporte a nivel táctico donde se determinan las rutas a seguir, qué servicios se ofrecen y con qué frecuencia se ejecutan; sin embargo, es necesario también elaborar un plan operativo donde se determinen los horarios de los servicios ofrecidos, como la hora de salida del origen y hora de llegada al destino, además de la duración de las paradas intermedias cuando corresponda. La mayoría de las decisiones que su principal factor es el tiempo se determinan, habitualmente, a nivel operativo

La programación de servicios y actividades, principalmente las operaciones a realizar en las terminales son de vital importancia para la eficiencia de la red de transporte. El rendimiento de las operaciones en las terminales intermodales puede verse afectado por muchos factores que se derivan del número y tipo de equipos establecidos, diseño físico de la terminal, capacidad de almacenamiento y estrategias operativas determinadas.

Estas pueden mejorarse con la ayuda de modelos como el propuesto por (Corry & Kozan, 2006) para asignar contenedores a ranuras de un tren en una terminal intermodal, en el que cada vagón se divide en ranuras según la longitud de los contenedores utilizados. Este tipo de modelos requiere de sistemas de información en tiempo real que permitan conocer el estado de los contenedores y los equipos de manipulación y vehículos disponibles en la terminal para disponer de una planificación actualizada.

Los problemas de enrutamiento de vehículos a nivel operativo para la distribución inicial y final se denominan, en la literatura investigada, problemas de recogida y entrega (PDP, del inglés *Pickup and Delivery Problem*). El PDP es una extensión del clásico problema de enrutamiento de vehículos (VRP, del inglés *Vehicle Routing Problem*) donde los clientes pueden recibir y enviar mercancías, para lo que se requiere una flota de vehículos que permita recoger y/o entregar mercancías en las ubicaciones de los clientes.

Una actividad de entrega a un destinatario comienza desde la terminal intermodal origen con un contenedor lleno, y una actividad de recogida devuelve un contenedor a la terminal intermodal para su posterior envío. Estos modelos que implican un transporte por camión con limitaciones de tiempo tanto en los orígenes como en los destinos se pueden modelar como el conocido problema del vendedor ambulante con ventanas de tiempo (m-TSPTW, del inglés *multi-Travelling Salesman Problem Time Window constraints*).

(X. Wang & Regan, 2002) describen una técnica de solución iterativa para el m-TSPTW y (Jula et al., 2005) proponen tres metodologías diferentes para resolver el mismo tipo de problema. Dicha metodología se aplica a un problema de recogida y entrega por camión donde los contenedores deben transferirse entre terminales marítimas, instalaciones intermodales intermedias y clientes finales.

(Braekers et al., 2014) y (Erera et al., 2005) integran las decisiones de enrutamiento de vehículos cargados y reposicionamiento de vehículos vacíos. El primer autor presenta un modelo de flujo de red con el factor tiempo como principal y ventanas temporales definidas, mientras que el segundo autor presenta un problema que se modela como un TSPTW para camiones con carga completa (FTL) cuya ruta tiene lugar en las inmediaciones de terminales intermodales de contenedores.

(Caris & Janssens, 2008) proponen una heurística y algoritmo para un problema similar que trata el enrutamiento de contenedores en el área de servicio de una terminal portuaria donde todos los contenedores salen y entran a la terminal. Este se modela como un problema de recogida y entrega con ventanas de tiempo y camiones de carga completa (FT-PDPTW, del inglés *Full Truckload Pickup and Delivery Problem with Time Windows*).

5.3.2. Paràmetros

En la Tabla 11 se presentan los principales parámetros encontrados en los modelos investigados, clasificados según la tipología de problemas a la que pertenecen.

Tabla 11. Clasificación de artículos según parámetros y tipología de problemas

Tipología de problemas	Parámetros	Referencias
Localización de instalaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Coste de transporte • Coste de transbordo del operador intermodal • Distancia entre origen y destino • Flujo entre origen y destino • Distribución modal • Cantidad de contenedores y carga que pasan por la terminal 	<p>(<i>Racunica & Wynter, 2005</i>)</p> <p>(<i>Macharis et al., 2011</i>)</p> <p>(<i>Abbassi et al., 2019</i>)</p> <p>(<i>Sørensen & Vanovermeire, 2013</i>)</p> <p>(<i>Sørensen et al., 2012</i>)</p> <p>(<i>Limbourg & Jourquin, 2009</i>)</p> <p>(<i>Arnold et al., 2004</i>)</p>
Diseño de red física	<ul style="list-style-type: none"> • Nodos origen y destino • Terminales intermodales • Coste sde transporte • Costes de transbordo en la terminal intermodal • Tiempo de transporte • Tiempo de transbordo en la terminal intermodal 	<p>(<i>Meng & Wang, 2011</i>)</p> <p>(<i>R. Wang et al., 2018</i>)</p>
Diseño de red de servicio	<ul style="list-style-type: none"> • Red física • Costes de transporte • Costes de transbordo • Flujo de contenedores • Número de vehículos • Capacidad de vehículos 	<p>(<i>Riessen et al., 2013</i>)</p> <p>(<i>Bell et al., 2011</i>)</p> <p>(<i>Arnone et al., 2014</i>)</p> <p>(<i>Crainic, 2000</i>)</p>

Distribución de tráfico	<ul style="list-style-type: none"> • Red física • Costes de transporte • Coste fijo de operar un servicio • Demanda • Tiempo de entrega • Carga máxima permitida 	<p><i>(Verma et al., 2011)</i></p> <p><i>(Verma et al., 2012)</i></p>
Programación de servicios	<ul style="list-style-type: none"> • Red física • Número de períodos • Carga del contenedor • Cantidad de contenedores 	<p><i>(Corry & Kozan, 2006)</i></p>
Enrutamiento Reposicionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Red física • Conjunto de vehículos • Conjunto de contenedores • Tiempo de transporte • Costes de transporte • Costes de carga/descarga • Tiempo de carga/descarga • Tiempo de servicio 	<p><i>(Elera et al., 2005)</i></p> <p><i>(Braekers et al., 2014)</i></p> <p><i>(X. Wang & Regan, 2002)</i></p> <p><i>(Jula et al., 2005)</i></p> <p><i>(Caris & Janssens, 2008)</i></p>

La mercancía, el modo de transporte y el vehículo son elementos del transporte intermodal que se han modelado para mejorar la competitividad del sistema. El adecuado posicionamiento de la unidad de carga en una terminal intermodal permite reducir la congestión de esta, además los costes de fricción que tienen lugar en estas instalaciones (Corry & Kozan, 2006) pueden reducirse si a la hora de modelar el problema se tienen en cuenta la capacidad de la que disponen los diferentes vehículos.

Por ello, a la hora de modelar un sistema de transporte intermodal se debe tener en cuenta cuál es el origen y destino de la mercancía, ventanas temporales disponibles, características de los contenedores o unidades de transporte utilizadas, características de los vehículos de transporte y tipos de productos (Kelleher, El-Rhalibi, & Arshad, 2003).

Los costes variables de una red logística se componen principalmente de los costes de transporte modal. Cada modo de transporte tiene una estructura tarifaria diferente y las diferencias se encuentran principalmente en el coste unitario de mover una cantidad de mercancía desde un origen hasta un destino, siendo el transporte aéreo el que cuenta con las tarifas más altas (Ishfaq & Sox, 2010), por lo que su uso para el transporte intermodal es aún muy escaso.

En la literatura investigada los parámetros definidos para los problemas de transporte intermodal se suponen deterministas y conocidos, pero esta suposición queda muy lejos de la realidad. Las decisiones a largo plazo, como la ubicación de terminales intermodales, no disponen en la mayoría de ocasiones de suficiente información sobre algunos parámetros o presentan un conocimiento deficiente de sus valores futuros (Abbassi et al., 2019), por lo que muchos parámetros referentes al coste se deben estimar (Racunica & Wynter, 2005).

Para este tipo de problemas, los principales parámetros de entrada para la definición del modelo son: coste de transbordo y coste de transporte, distancia y flujo entre el origen y destino, distribución modal y cantidad de contenedores que pasan por las terminales (Arnold et al., 2004). Al tratarse de un problema de decisión se introducirá, al menos, una variable de decisión binaria que tomará el valor 1 en caso de que se instale una terminal en una localización concreta y 0 en caso contrario.

Además, (Macharis et al., 2011) añade dos parámetros más para diferenciar los costes en los que se incurren en las operaciones de primera y última milla con el fin de conocer de forma exacta la proporción de costes que corresponde a cada tramo del transporte intermodal. Los problemas denominados “p-hub” incorporan el parámetro p que hace referencia al número de terminales a instalar en la red intermodal (Limbourg & Jourquin, 2009).

Las terminales intermodales cuentan con una capacidad limitada y coste fijo (Abbassi et al., 2019), además de un coste de apertura (Sörensen & Vanovermeire, 2013) que se incluirá como parámetro de entrada en los modelos de localización de terminales.

Los problemas de diseño de redes físicas son una generalización de los problemas de ubicación de terminales, por lo que además de hacer frente a las decisiones de localización estos problemas deberán identificar las mejores líneas de transbordo para el cambio de modos.

Los principales parámetros para los problemas de diseño de redes físicas son: conjunto de nodos de origen, destino e intermedios (terminales intermodales), tiempo y coste de transporte, tiempo y coste que tiene lugar para el trasvase de la mercancía en las terminales intermodales y demanda que soportará la red a diseñar. El coste y tiempo pueden tratarse de datos inciertos debido a la falta de conocimiento para la estimación de sus valores, por lo que algunos autores los expresan en forma de variables difusas (R. Wang et al., 2018).

(Meng & Wang, 2011) añade también como parámetros de entrada los modos de transporte y tipo de contenedor que operarán en la red, reduciendo así el tamaño del problema a una sola combinación de modos de transporte y a un tipo de contenedor específico, por lo que no se deberá tener en cuenta el posible uso de otra UTI.

Los problemas de diseño de redes de servicio se formulan a partir de una red física ya definida, por lo que el conjunto de nodos de origen y destinos y terminales ya se consideran dadas. Además, para el diseño de la red de servicio se considerarán las frecuencias de los servicios (Arnone et al., 2014), costes y tiempos tanto de transporte como de transbordo en las terminales para la combinación de modos de transporte que operen en la red.

Este tipo de problemas también incluye como parámetros el flujo de contenedores que tendrá lugar entre los nodos, aunque algunos autores como (Bell et al., 2011), para seguir una estructura de matriz origen-destino, desglosa el flujo de contenedores en función del destino. Según (Crainic, 2000) las redes pueden tener varias características como longitud, capacidad y coste. En particular, los costes fijos pueden estar asociados a toda la red o sólo a un tramo de ella, lo que al elegir una determinada red se deberán tener en cuenta como costes fijos la suma de los costes de todos los tramos de la red.

Los costes de una red difieren para redes de servicios según sean autónomos o subcontratados. En el primer caso, el operador de la red paga la barcaza o el tren completo y no incurre en costes de transporte adicionales por TEU. En el segundo el transporte se paga por TEU, por lo que no deberá excederse la cantidad contratada. No obstante, la carga y descarga de contenedores tiene un coste por TEU en ambos casos (Riessen et al., 2013).

Para el nivel de planificación táctica los datos se agregan y las decisiones son sensibles solo a grandes variaciones en los datos. Los principales parámetros para los problemas de distribución de tráfico son: costes de transporte, coste de operar un servicio, tiempos de entrega y carga máxima permitida en la red.

Además, (Verma et al., 2011) incorporan la demanda como parámetro de entrada, medida en número de vagones a ser enviados por semana. En caso de incluir objetivos, como el propuesto por (Verma et al., 2012), de reducir el riesgo al que está expuesta una población cuando se transporta mercancía peligrosa, se deberá diferenciar en los parámetros de entrada qué contenedores transportan mercancía peligrosa y cuáles no.

Las decisiones operativas deben garantizar que la demanda se satisfaga dentro de los criterios de servicio establecidos y que los recursos se utilicen de manera eficiente. Por ello, la mayoría de los problemas de este nivel de planificación deben considerar el factor tiempo.

Un servicio de transporte se ofrecerá en base a un horario establecido que indicará la hora de salida del origen y la hora de llegada al destino, así como el tiempo y la duración de las paradas en las terminales intermedias. Los problemas de programación de servicios, como el propuesto por (Corry & Kozan, 2006), incluyen parámetros como la localización de los vagones de carga en el tren, el número de contenedores y cantidad de mercancía que se transporta desde cada origen a cada destino, el número de períodos para el que se realiza la programación y la red física en la que se opera.

Por otro lado, los problemas de enrutamiento son aquellos que plantean la necesidad de visitar una serie de clientes, en unas determinadas localizaciones, desde un punto origen y con el menor coste o tiempo posible, por lo que la red física es también un parámetro de entrada. En definitiva, se trata de establecer las mejores rutas que comienzan en el punto origen y finalizan en el punto destino, pasando por cada cliente y teniendo en cuenta restricciones como la demanda de cada cliente y las capacidades de los vehículos que operan en la red.

En este caso, la demanda es un parámetro de entrada y se supone agregada, es decir, la demanda de una red de transporte intermodal es la suma de la demanda de todos los clientes a los que dicha red pretende dar cobertura. Además, se deben incluir también como parámetros las características de los vehículos, tales como capacidad máxima, velocidad, coste, tiempo de transporte desde un punto origen a un punto destino y tiempo de servicio al cliente.

Los problemas de enrutamiento o reposicionamiento también incorporan como parámetros de entrada los tiempos de espera (Caris & Janssens, 2008), costes, tiempo de carga y descarga (Erera et al., 2005) (Jula et al., 2005) y ventanas temporales.

Las ventanas temporales se asocian a cada contenedor y a sus correspondientes clientes de manera que, si el vehículo llega en un tiempo establecido por debajo del límite determinado en dicha ventana temporal, debe esperar para ser entregado; en caso de que supere el límite máximo, este cliente no podrá ser servido (X. Wang & Regan, 2002). Las ventanas de tiempo se definen tanto para los nodos de origen y destino como para el tiempo de transporte entre ambos.

(Caris & Janssens, 2008) define un PDP con cuatro posibles combinaciones de recogida y entrega: primero una entrega y luego una recogida, dos clientes de entrega consecutivos, dos clientes de recogida consecutivos o primero una recogida y luego una entrega. Por ello, en este caso existen varios parámetros para los tiempos de transporte que recogen todas las combinaciones posibles.

Para el reposicionamiento de contenedores vacíos, como los modelos presentados por (Erera et al., 2005) y (Braekers et al., 2014), se conoce previamente un conjunto de oferta y demanda de contenedores vacíos, que representa a los remitentes que los solicitan y a los destinatarios que los proporcionan. Los orígenes y destinos pueden ser tanto la ubicación de los remitentes y destinatarios como terminales intermodales.

5.3.3. Objetivos

Los objetivos perseguidos en los problemas de transporte intermodal son los que se aplicarían a cualquier sistema de transporte, siendo el tiempo y coste los objetivos más destacados, tal y como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Clasificación de artículos según objetivos para problemas de transporte intermodal

Objetivos	Referencias
Coste	(Verma et al., 2012) (Macharis et al., 2011) (Caris & Janssens, 2008) (Verma et al., 2011) (Archetti & Peirano, 2019) (Cho et al., 2012) (Chang, 2008) (Sörensen & Vanovermeire, 2013) (Jula et al., 2005) (Sörensen et al., 2012) (Lin et al., 2014) (Choong, Cole, & Kutanoglu, 2002) (Erera et al., 2005) (Meng & Wang, 2011) (R. Wang et al., 2018) (Arnold et al., 2004) (Racunica & Wynter, 2005) (Limbourg & Jourquin, 2009) (Abbassi et al., 2019) (Newman & Yano, 2003) (Riessen et al., 2013) (Crainic, 2000) (Lin & Lin, 2016)
Tiempo	(Bell et al., 2011) (Corry & Kozan, 2006) (Cho et al., 2012) (Cho et al., 2012) (Chang, 2008) (Arnone et al., 2014) (R. Wang et al., 2018) (Racunica & Wynter, 2005)
Riesgo	(Verma et al., 2012)
Distancia	(Braekers et al., 2014)

Las redes intermodales se caracterizan básicamente por dos tipos de costes: costes que realmente percibe el cliente (coste de percepción del cliente) y costes soportados por la sociedad (costes externos) (Ministerio de Fomento, 2017b). Los costes externos hacen referencia a: los costes sociales, como son la seguridad viaria, contaminación atmosférica y acústica o consumo de energía, y los costes infraestructurales.

Los costes de percepción del cliente que tienen lugar en las redes intermodales se dividen básicamente en tres tipos de costes: costes fijos en terminales intermodales, costes de conectividad entre los modos y costes de transporte (Ishfaq & Sox, 2010). Los costes de transporte son aquellos asumidos directamente por los usuarios y dependen de los modos de transporte que intervengan a lo largo de la red (Meng & Wang, 2011).

La diferenciación de los costes de transporte por tramos, es decir, que se puedan contabilizar explícitamente los costes por separado de las operaciones de primera y última milla y transporte principal es una ventaja. Esto resulta de gran utilidad en funciones objetivos como las propuestas por (Cho et al., 2012) (Sörensen et al., 2012) (Limbourg & Jourquin, 2009) (Abbassi et al., 2019), que necesitan diferenciar qué términos hacen referencia a los costes del transporte principal, costes del transporte inicial y final y costes de carga y descarga en las terminales intermodales para poder establecer prioridades entre ellos.

(Macharis et al., 2011) proponen la siguiente función de costes (ver Figura 11) para una red de transporte intermodal puerta a puerta donde el tramo principal se realiza vía marítima y los tramos iniciales y finales tienen lugar por carretera.

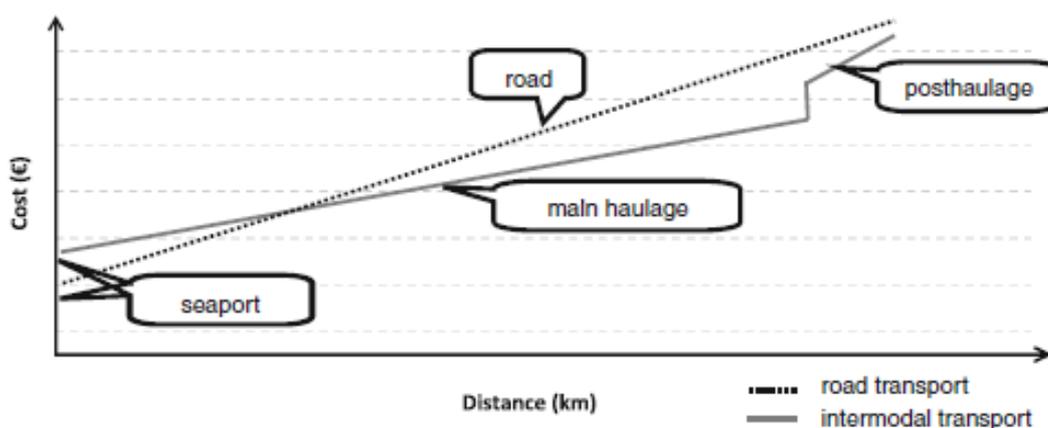


Figura 11. Función de costes para una red intermodal

Fuente: (Macharis et al., 2011)

Como se observa en la Figura 11, al inicio del transporte los costes para una red intermodal son superiores a los que tienen lugar en el transporte unimodal por carretera debido a que los costes de fricción en las terminales son muy elevados. A medida que la distancia crece los costes variables para el transporte principal intermodal se van reduciendo como consecuencia de las economías de escala que se obtienen por las grandes capacidades que ofrecen, por lo que el transporte intermodal va cobrando ventaja.

(Caris & Janssens, 2008) afirman que los mayores costes se dan fuera del transporte principal, como en los tramos iniciales y finales. Sin embargo, otros autores como (Jula et al., 2005) y (Choong et al., 2002) destacan que los mayores costes tienen lugar cuando se transportan los contenedores vacíos, indicando en la función objetivo propuesta que este tipo de coste es el más prioritario. (Elera et al., 2005) proponen un modelo cuya función objetivo se basa en minimizar tanto el coste de transportar contenedores llenos como vacíos, dándole a los dos la misma prioridad.

El coste de cada modo de transporte difiere, según expresa (Rodrigue et al., 2013) en las funciones de costes presentadas en la Figura 12, siendo el transporte por carretera, ferroviario y marítimo, respectivamente, las siguientes funciones: C1, C2 y C3. Si bien la carretera representa menores costes para distancias cortas, su función de coste aumenta con la distancia mucho más rápido que las funciones de costes de los modos ferroviario y marítimo.

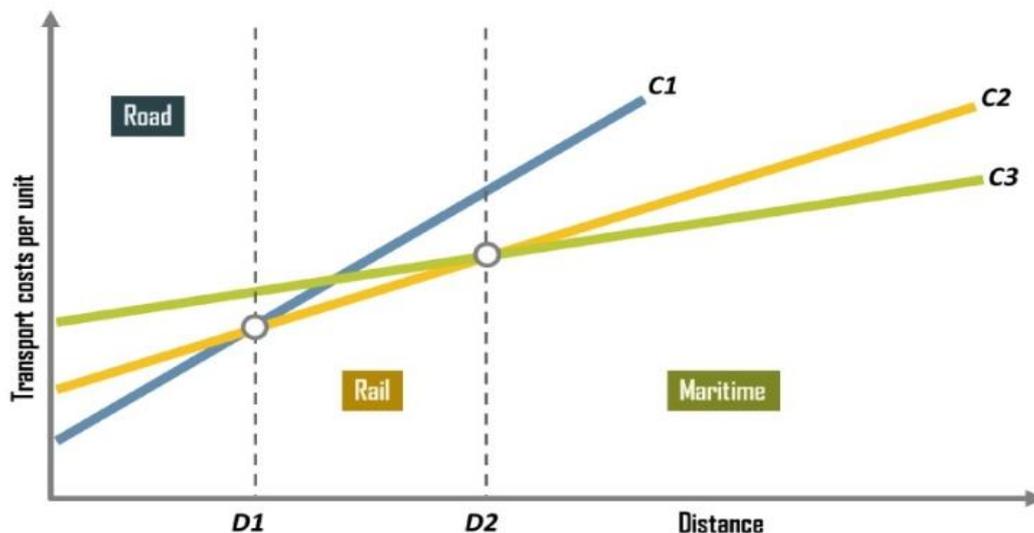


Figura 12. Costes unitarios de transporte según modo de transporte

Fuente: (Rodrigue, 2019)

De la literatura investigada, solo (Archetti & Peirano, 2019) proponen un modelo en el que incluyen el transporte aéreo en una red intermodal, y cuyo objetivo es la minimización de los costes de dicha red. Debido a que este modo de transporte no se suele utilizar para el transporte intermodal por sus desventajas en capacidades y UTIs, (Rodrigue et al., 2013) no lo incluyen en las funciones de costes presentadas en la Figura 12.

A partir de una distancia D1 resulta más rentable utilizar el transporte ferroviario que el transporte por carretera, mientras que a partir de una distancia D2, el transporte marítimo es más competitivo. El punto D1 se encuentra generalmente a una distancia entre 500 y 750 km del punto de partida, mientras que D2 está cerca de 1.500 km.

Los costes de conectividad entre los modos de transporte se denominan costes de fricción. En un trayecto, un cambio de modo equivale a un cambio de sistema y por lo tanto se incurre en un coste que repercute sobre la competitividad del transporte (Ministerio de Fomento, 2011). Por ello, además de minimizar los costes, el objetivo principal de la mayoría de los problemas de localización de nuevas terminales es determinar el número de terminales que se abrirán y las rutas utilizadas en la red, donde una terminal se abre solo si es rentable hacerlo.

(Racunica & Wynter, 2005) presentan un modelo de localización de terminales donde la rentabilidad de la apertura de una terminal se determina en términos de coste de apertura y ahorro de tiempo de viaje; este último se calcula en función del tiempo que se tarda en la carga y descarga y el tiempo ahorrado gracias a la instalación de la nueva terminal.

Las funciones de costes de fricción presentadas en la Figura 13 han sido propuestas por (Rodrigue et al., 2013) y permiten establecer una comparación entre los costes de fricción según se trate de un transporte marítimo (T3), ferroviario (T2) o carretero (T1).

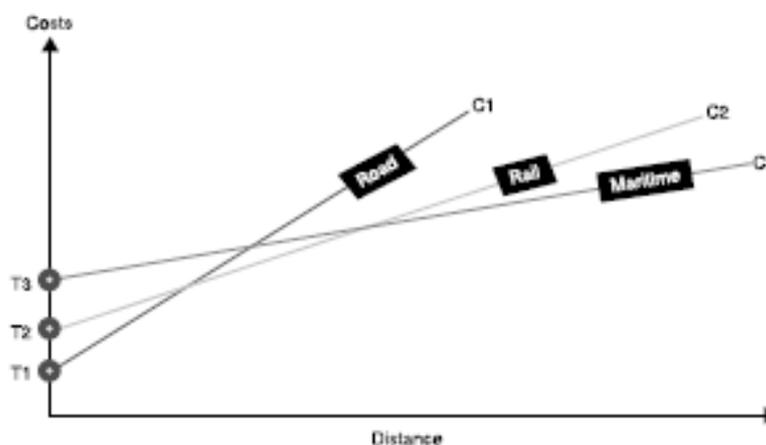


Figura 13. Costes de fricción según modo de transporte

Fuente: (Rodrigue et al., 2013)

Los costes de fricción de los modos marítimo y ferroviario tienen una desventaja significativa en comparación con la carretera para distancias cortas; esto se debe a que el trasvase de mercancía en un puerto y terminal ferroviaria es mucho más costoso, ya que los buques tienen mucha más capacidad de carga, por lo que la carga y descarga de estos puede durar hasta varios días.

Sin embargo, según (Ishfaq & Sox, 2010) el coste de fricción también depende de la UTI empleada, por ejemplo, la carga y descarga de un contenedor intermodal es diferente a la de un semirremolque; además, los contenedores varían en función del peso y tamaño, así como del modo de transporte para el que se utilice.

(Arnone et al., 2014) y (Bell et al., 2011) plantean un modelo que busca minimizar el tiempo que pasan los contenedores en las terminales y en el transporte principal. Por tanto, en función de la ubicación de la terminal se podría evaluar la competitividad del transporte intermodal, aunque también deben agregarse otros criterios, como sistemas de precios, distancias de recorrido, volumen de flujos o costes de transbordo (Lin et al., 2014).

(Crainic, 2000) propone en su modelo para el diseño de redes de servicio una función objetivo que tiene en cuenta el coste total para transportar mercancías en la red propuesta, con el fin de incluir varias medidas de productividad relacionadas con las operaciones que tienen lugar en las terminales y durante el transporte.

Además de los costes de fricción que se dan en las terminales y los que se derivan del propio transporte, en los modelos de transporte se pueden considerar explícitamente otros costes, como los de mantenimiento de inventario en las terminales (Newman & Yano, 2003), demoras y medidas de desempeño relacionadas con la calidad y confiabilidad del servicio ofrecido para evaluar alternativas y determinar las mejores rutas.

La mayoría de los modelos analizados proponen funciones bi-objetivo o con más de dos objetivos para que aquellos que deseen realizar operaciones de transporte en redes intermodales puedan decantarse más por un objetivo u otro estableciendo prioridades entre ellos.

(Chang, 2008) y (R. Wang et al., 2018) proponen un modelo bi-objetivo para minimizar el coste total de transporte y tiempo de viaje. (Verma et al., 2012) además del coste de transporte también incluye la minimización del riesgo asociado a la población derivado del transporte de mercancías peligrosas. El término de coste de la función objetivo incluye los costes de las operaciones de primera y última milla, el coste derivado del transporte principal y los costes fijos de operar diferentes tipos de servicios de trenes (regulares y prioritarios).

(Corry & Kozan, 2006) proponen un modelo bi-objetivo para minimizar el tiempo de manejo de los contenedores en las terminales y optimizar la distribución del tren, relacionando este último con la reducción que se obtiene en términos de coste al transportar mayor cantidad de carga si se consigue una óptima distribución de la carga en los vagones del tren.

6. INNOVACIONES EN EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS

Actualmente, alrededor del 50% del gasóleo que se consume en las ciudades es utilizado para transportar mercancías, y el 25% de las emisiones de CO₂ en entornos urbanos las produce el sector logístico. Ante la necesidad de reducir la congestión del tráfico y el consumo de combustible, numerosas empresas de logística se están sumando al uso de vehículos eficientes y ecológicos.

La última milla está cobrando cada vez más importancia, por lo que los fabricantes de vehículos han visto en ella una oportunidad para crear vehículos respetuosos con el medio ambiente. Las restricciones de acceso a las ciudades en períodos de contaminación y los beneficios para la circulación de vehículos sostenibles son un aliciente para el incremento de la oferta de vehículos destinados a este fin.

La distribución urbana de mercancías (DUM) hace referencia a las operaciones logísticas de entrega y recepción en sectores urbanos. Estas actividades se denominan también “City Logistics”. El instituto también denominado City Logistics propone la siguiente definición para la distribución urbana de mercancías:

“Proceso de optimización completa de la logística y de las actividades de transporte por empresas privadas en zonas urbanas, teniendo en cuenta las condiciones de tráfico, la congestión y el consumo de combustible, con el fin de reducir el número de vehículos circulando en las ciudades, racionalizando sus operaciones” Institute for City Logistics.

A medida que aumenta el comercio electrónico, los vehículos que realizan transportes de larga distancia también necesitan ser más eficientes y rentables, de forma que se disminuya el consumo de combustible y tiempos de entregas, además de permitir una mayor capacidad de carga. A continuación, se presentan ejemplos de vehículos eficientes y ecológicos desarrollados recientemente para el transporte de mercancías.

1. Vehículos autónomos

En los últimos años, la logística ha sido uno de los sectores que más cambios ha sufrido a nivel mundial. Esto se debe a que las tecnologías están evolucionando rápidamente, dando paso al nacimiento de vehículos autónomos.

Scania, una de las empresa perteneciente a Volkswagen, ya cuenta con sus propios camiones autónomos. Estos han conseguido circular de forma autónoma durante más de 2.000 km atravesando cuatro fronteras, sin que se haya producido ningún accidente durante el tiempo de prueba (ELMOTOR, 2016).

Volvo, otra de las empresas pioneras en el diseño de vehículos para el transporte de mercancías, ha desarrollado el camión Vera (ver Figura 14). Este se trata de un vehículo conectado, eléctrico y autónomo con capacidad para transportar contenedores de mercancía. Actualmente ya realiza labores de movimiento de contenedores desde un centro de logística hasta una terminal de carga en el puerto de Gotemburgo (ELMOTOR, 2016).

Estos camiones están conectados a la nube y son controlados desde una torre de control; para que sea posible su funcionamiento se han adaptado las correspondientes infraestructuras. Estos vehículos nacen para permitir un flujo continuo de mercancías en el que se aumente la eficiencia y sostenibilidad y se reduzcan los tiempos de espera innecesarios.



Figura 14. Camión autónomo Volvo

Fuente: (ELMOTOR, 2016)

Otto, empresa formada por antiguos empleados de Google, Apple y Tesla, ya ha probado uno de sus vehículos autónomos para el reparto de 45.000 latas de cerveza a una distancia de 193 kilómetros. El vehículo se encuentra dotado de multitud de cámara, radares, sensores y sistemas de frenado, además de un ordenador programado capaz de tomar en tiempo real las decisiones derivadas de una conducción por carretera (Transporter, 2018).

La tecnología autónoma nace para mejorar las condiciones de los conductores, aunque estos deberán estar alertas en cuanto a la velocidad, aceleración y roturas. Otro de los objetivos de los vehículos autónomos es incrementar la seguridad vial, ya que se estima que casi el 90% de los accidentes se producen como consecuencia de un fallo humano. Con esta nueva tecnología los vehículos funcionarán durante 24 horas al día de forma ininterrumpida ya que se elimina la necesidad de descansar de los conductores.

2. Bicicletas

Según Bernhard Ensink, Secretario General de la European Cyclists' Federation, se prevé que en un próximo futuro las ciudades y empresas respetuosas con el medio ambiente incorporen en la distribución urbana de mercancías la bicicleta.

B-DUM o Distribución Urbana de Mercancías en bicicleta es un sistema logístico por el que están apostando países con gran tradición ciclista como Holanda, Alemania, Dinamarca o Suecia, además de otras grandes ciudades (zonalogistica, 2017). Los principales beneficios que aporta la utilización de la bicicleta para la distribución de mercancías son:

- Ambientales: no genera contaminación atmosférica ni acústica, además de no consumir combustible y ser beneficiosa para la salud.
- Económicos: el coste de las bicicletas es inferior al de los vehículos motorizados, igual que el coste de transporte.
- Congestión: la bicicleta no genera congestión de tráfico y además necesita poco espacio para su estacionamiento.

Las bicicletas utilizadas para el transporte de mercancías se denominan bicicletas de carga (del inglés, *cargobike cyclo cargo*) y pueden transportar de 50 a 500 kg. Su fuente de energía es la potencia humana transmitida a través del pedaleo. Este vehículo está diseñado específicamente para transportar carga de forma que contiene un espacio delantero o trasero que permite el almacenamiento de la mercancía (CityLogistics, 2017).



Figura 15. Bicicleta de carga DHL

Fuente: (zonalogistica, 2017)

Algunas empresas como DHL ya utilizan bicicletas de carga en algunos países, entre ellos los Países Bajos, donde cuenta con una flota de más de 26.000 bicicletas como la que se muestra en la Figura 15, dotada de un contenedor extraíble de las dimensiones de un palé estándar y con asistencia eléctrica de pedal para una mayor velocidad y soporte en las pendientes.

3. Vehículos eléctricos

El uso de vehículos eléctricos para el transporte de mercancías va ganando terreno de forma progresiva. En muchas ciudades el uso de motores eléctricos se ha convertido en una alternativa sostenible para acceder a los núcleos de las áreas urbanas más restringidos.

Según la Asociación Empresarial para el Desarrollo e Impulso del Vehículo Eléctrico (AEDIVE), los beneficios que aportan el uso de estos vehículos son numerosos: “Las razones económicas, venidas del ahorro en costes y tiempo por aparcamiento en superficies con penalizaciones por estacionamiento, ya que un coche eléctrico puede aparcar gratuitamente en muchas plazas en las que los de combustión deben pagar una tasa, o directamente lo tienen prohibido. También ahorran en mantenimiento y reparaciones del vehículo. Y por supuesto en combustible; al final de la jornada, el gasto monetizable en electricidad es mucho menor que lo que se paga con un diésel o un gasolina” (Endesa, 2017).

Algunas empresas de alimentación como Consum y Carrefour ya se han unido al uso de vehículos eléctricos para las operaciones de logística. Consum utiliza para el reparto a domicilio de productos refrigerados vehículos movidos por baterías.

El proyecto en el que se encuentra inmerso la cadena se denomina Cool Routing y se trata de una plataforma que analiza el estado de la mercancía, el vehículo y la carretera y envía la información en tiempo real a los trabajadores. Según los responsables del proyecto, un 10% del total de la actividad de distribución y facturación de los supermercados es de productos congelados o refrigerados, por lo que el impacto medioambiental y de ahorro en costes será considerable.

Carrefour ha dado un giro a su cadena de suministro implementando medidas para impulsar un desarrollo sostenible y reducir el impacto ambiental, derivado del transporte de mercancías. Además de utilizar mega camiones para reducir el número de rutas y camiones impulsados por gas, ha incorporado recientemente un nuevo modelo de vehículo eléctrico denominado Scoobic (Carrefour, 2019), mostrado en la Figura 16 .



Figura 16. Vehículo eléctrico Scoobic

Fuente: (uno, 2018)

Este se trata de un vehículo “000 emisiones” (cero humos, cero atascos, cero ruidos) que cuenta con la rapidez de una moto y las posibilidades de carga de una furgoneta, con 1.000 litros de capacidad y 750 kilogramos de peso admitido. Scoobic posee una autonomía de hasta 300 km y funciona con baterías extraíbles e intercambiables (MovilidadElectrica, 2018).

Según sus creadores, un Scoobic es capaz de limpiar y filtrar en 8 horas de reparto más de 20.000 metros cúbicos de aire. Este innovador sistema de reparto utiliza tecnología CAN bus (Controller Area Network), que permite gestionar la comunicación entre múltiples CPU (MovilidadElectrica, 2018).

4. Drones

Se prevé que, en los próximos 10 años, el 10% del mercado de la aviación corresponda a los drones, lo que representaría unos 15 billones de euros anuales. La UE está trabajando para estandarizar una legislación que permita el uso de drones en todo el territorio europeo.

Los drones están revolucionando el mundo de la logística gracias a la rapidez, flexibilidad y comodidad que ofrecen, aunque su uso no está aún regulado. Los UAV (vehículos aéreos no tripulados) tienen una autonomía de 4 horas de vuelo sin descanso y la capacidad de descongestionar las grandes ciudades, además de reducir la contaminación y acceder a cualquier espacio gracias a su reducido tamaño (Cigo, 2018).

Algunas empresas como Amazon, Zookal, Waterston, Google y Facebook ya están realizando pruebas de logística interna con drones que les facilitan tareas a la hora del control de inventario y desplazamiento de productos dentro de los almacenes.

DHL ya ha puesto en práctica en China el uso de drones (ver Figura 17) para realizar entregas cubriendo una distancia de 8 kilómetros. El reto es que los paquetes lleguen en un tiempo máximo de 24 horas a su destino, aunque la compañía no pretende usar los drones para todos sus envíos, pero sí utilizarlos para cubrir aquellas entregas que aporten mayor rentabilidad o simplicidad (UOC, 2015).



Figura 17. Dron de DHL para entrega de mercancías

Fuente: DHL

Para un adecuado uso se deben definir unos itinerarios que evite la interferencia con otros drones, debiendo ir también identificados y documentados. El coste de uso de este tipo de drones varía mucho respecto al de un dron convencional, ya que deben estar dotados de características especiales que permitan llevar a cabo las operaciones de última milla de forma autónoma, eficiente y rentable.

5. Robots

Al igual que los vehículos mencionados anteriormente, se prevé que en un futuro próximo los robots puedan también cubrir servicios de entrega de mercancías. Estos ya están realizando tareas como el transporte de artículos en el interior de los almacenes y la optimización de las actividades de carga y descarga de contenedores en puertos marítimos.

La compañía Starship Technologies, creada por los fundadores de Skype, ya está desarrollando robots para realizar actividades de logística. Estos robots operarán de forma autónoma bajo órdenes previas de la empresa distribuidora, lanzadas a través de plataformas virtuales o aplicaciones móviles. Estos “aparatos” funcionan mediante un sistema de GPS y sensores para poder conducir de forma autónoma, ayudados por radares y cámaras.

Como empresa líder en logística, Amazon ya ha incorporado esta tecnología. Se tratan de unos robots denominados Scouts (ver Figura 18) que realizarán las entregas de la compañía de forma autónoma con ayuda de sensores que les facilita el desplazamiento por las calles y les permite evitar obstáculos, además de cruzar las calles y reconocer a todos los viandantes. Estos robots son eléctricos y funcionan con baterías recargables, pudiendo alcanzar la velocidad de una persona caminando.



Figura 18. Amazon scout

Fuente: Amazon

El sistema de entrega será el siguiente: el robot partirá del centro logístico de Amazon y recorrerá las calles en busca de su destino final donde enviará una notificación al consumidor para que se acerque a la puerta a recoger el producto. El consumidor únicamente deberá acceder a la aplicación de Amazon y activar la apertura de la tapa superior del robot.

7. CONCLUSIONES

En la actualidad no existe un consenso en la definición de transporte intermodal. La Eno Transportation Foundation, organización sin ánimo de lucro dedicada a mejorar el transporte, concluye que el significado de transporte intermodal depende del punto de vista del definidor. Es por ello por lo que las empresas ferroviarias tienden a clasificar la intermodalidad como una función de los vagones (vagón intermodal o porta contenedor), mientras que las empresas dedicadas al transporte por carretera lo describen en términos de remolques.

Según la (Comisión de Transporte del Colegio de Ingenieros de Caminos, 2005), autores del “Libro Verde de Intermodalidad”, la palabra intermodalidad, al igual que otras que están estrechamente relacionada con la evolución tecnológica, corre el riesgo de utilizarse de modo generalizado sin que se sepa con certeza cuál es el concepto al que verdaderamente hace referencia.

Aunque el desarrollo del transporte intermodal en la actualidad es evidente y ha propiciado numerosas oportunidades para una complementariedad e integración entre los diferentes modos de transporte, ha favorecido también la competencia entre los modos. Esta competencia puede verse desde el punto de vista de la elección de un único modo de transporte (transporte unimodal) o apostar por una combinación de modos (intermodalidad o multimodalidad).

El transporte de mercancías a corta y media distancia seguirá realizándose mayoritariamente por camión, por lo que es importante mejorar la eficiencia de los camiones; hecho que beneficiará también al transporte intermodal.

Por ello, hoy por hoy el transporte ferroviario intermodal es a menudo un desafío debido a la fuerte competencia existente de la alternativa vial. Como se indicó en la sección 5.2.1 se está desarrollando un considerable apoyo a nivel europeo para el transporte ferroviario y es probable que las inversiones que se están llevando a cabo en las redes ferroviarias desencadenen un gran beneficio en la actividad intermodal.

Por otro lado, en el transporte intermodal internacional, el modo marítimo suele desempeñar funciones vitales, mientras que en el transporte intermodal nacional prevalece la combinación camión-ferrocarril. En comparación con el transporte terrestre, el marítimo, por lo general, se suele realizar con menor frecuencia y con horarios preestablecidos.

El desarrollo y eficiencia del transporte intermodal se relaciona también con medidas de inversión y organización tanto en terminales intermodales como en el uso de las unidades de transporte intermodal (UTIs). Para ello, muchas terminales intermodales están actualmente mejorando el acceso a la red ferroviaria, ampliando el área de transferencia de las UTIs para mejorar la operativa y aumentando el rendimiento de los equipos de transferencia para mejorar su productividad.

En cuanto a los problemas de transporte intermodal analizados se puede deducir que las operaciones a las que se denominan primera y última milla constituyen una proporción relativamente grande de los costes totales del transporte intermodal. El desarrollo de operaciones eficientes en este tramo de la cadena de transporte puede fomentar el atractivo del transporte intermodal, aunque las investigaciones en este ámbito son aún muy escasas.

Los costes de fricción juegan un papel importante en la determinación de la posición competitiva entre los modos. Debido a los altos costes existentes en los puertos y terminales ferroviarias, el transporte marítimo y ferroviario generalmente no son adecuados para viajes de corta distancia. La competencia entre los modos de transporte se mide frecuentemente por comparaciones de costes, por lo que para que el transporte intermodal resulte competitivo frente al unimodal el coste de percepción del cliente de una red intermodal debe ser menor que el de la red unimodal.

Por varias razones, modelar el transporte intermodal de mercancías es más complejo que modelar sistemas unimodales. En primer lugar, implica al menos dos modos de transporte que tienen sus propias características respecto a infraestructuras y unidades de transporte. En segundo lugar, las redes suelen estar organizadas por un conjunto de actores, responsables de solo una parte del conjunto. En tercer lugar, la complejidad de los problemas aumenta debido a la gran variedad de unidades de carga (tipo y tamaño), vagones de ferrocarril y remolques.

Cada vez más se tiende hacia sistemas de transporte más grandes, integrados y eficientes, por lo que una buena planificación a nivel estratégico, táctico y operacional es necesaria. Los modelos y algoritmos desarrollados en este campo han demostrado ser adecuados para la solución de un sistema de transporte complejo que abarca todos los niveles de planificación y sobre cualquier combinación de modos, a pesar de que el modo aéreo no ha tenido mucha relevancia en la literatura analizada.

Por ende, la planificación del sistema de transporte intermodal y el desarrollo de herramientas para su resolución es, sin duda, un foco de estudio desde el crecimiento del transporte intermodal, aunque al ser un sector emergente la literatura existente es aún muy escasa.

8. ANÁLISIS DE VACÍOS Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El transporte intermodal es un sector emergente y necesita de mucha investigación. En los últimos años el número de publicaciones en el campo de la intermodalidad ha aumentado ya que se trata de un medio de transporte sostenible y respetuoso con el medio ambiente, por lo que su uso es cada vez más habitual.

En primer lugar, la creación de una definición única para el transporte intermodal e intermodalidad favorecería la evolución de este, por lo que se debería fomentar la investigación en este campo con el propósito de establecer un consenso en la definición que sea válida para todos los usuarios de este sistema de transporte.

En la literatura analizada se han encontrado pocos trabajos relacionados con la red intermodal en cuanto a la extensión geográfica de la misma, ventajas, desventajas y restricciones que tiene el transporte intermodal tanto a nivel nacional como internacional. Además, como se ha podido comprobar en la sección 5.2.4, no existen apenas trabajos que hagan referencia a los semirremolques y cajas móviles, así como a sus utilidades y ventajas.

Actualmente es de gran importancia estar al día en cuanto a novedades tecnológicas y tendencias logísticas, por lo que se podrían presentar trabajos futuros que traten el desarrollo del transporte intermodal en tanto que permita planificar las operaciones para mejorar la eficiencia, realizar los cálculos de costes correctamente o elegir en cada transporte el modo que más convenga.

Un campo de investigación futuro podría ser el análisis del nivel de integración existente en la cadena de transporte intermodal. Actualmente no hay muchos estudios que tengan en cuenta los múltiples actores que intervienen a lo largo de la red, por lo que desarrollar una investigación en este ámbito favorecería la coordinación y mejoraría el desempeño del transporte intermodal de mercancías.

También, sería satisfactorio analizar algunos casos prácticos para poder desarrollar metodologías o marcos que permitan a otras empresas, organismos o países conocer las mejores prácticas en el uso de la intermodalidad, así como fomentar planes de transporte que favorezcan la integración y cooperación entre los modos, no la competencia.

Finalmente se cree conveniente incluir en futuros trabajos una nueva categoría que trate el diseño de sistemas intermodales en áreas, regiones o territorios donde todavía no se ha implementado este sistema de transporte o donde la infraestructura está aún en desarrollo.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Abbassi, A., Alaoui, A. E. hilali, & Boukachour, J. (2019). Robust optimisation of the intermodal freight transport problem: Modeling and solving with an efficient hybrid approach. *Journal of Computational Science*, 30, 127–142. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2018.12.001>
- Agamez-Arias, A. del M., & Moyano-Fuentes, J. (2017). Intermodal transport in freight distribution: a literature review. *Transport Reviews*, 37(6), 782–807. <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1297868>
- Archetti, C., & Peirano, L. (2019). Air intermodal freight transportation: The freight forwarder service problem. *Omega (United Kingdom)*. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.02.009>
- Arnold, P., Peeters, D., & Thomas, I. (2004). Modelling a rail/road intermodal transportation system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 40(3), 255–270. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2003.08.005>
- Arnold, P., Peeters, D., Thomas, I., & Marchand, H. (2001). Pour une localisation optimale des centres de transbordement intermodaux entre réseaux de transport: formulation et extensions. *The Canadian Geographer*.
- Arnone, M., Mancini, S., & Rosa, A. (2014). Formulating a Mathematical Model for Container Assignment Optimization on an Intermodal Network. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 111, 1063–1072. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.141>
- Bailey, K. D. (2005). Typology Construction, Methods and Issues. *Encyclopedia of Social Measurement*, 3, 889–898. <https://doi.org/10.1016/b0-12-369398-5/00108-0>
- Behdani, B., Fan, Y., Wiegmans, B., & Zuidwijk, R. (2016). Multimodal schedule design for synchromodal freight transport systems. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*.
- Behrends, S. (2012). The Urban Context of Intermodal Road-Rail Transport – Threat or Opportunity for Modal Shift? *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 463–475. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.122>
- Behrends, S. (2017). Burden or opportunity for modal shift? – Embracing the urban dimension of intermodal road-rail transport. *Transport Policy*, 59(May), 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.06.004>
- Bell, M. G. H., Liu, X., Angeloudis, P., Fonzone, A., & Hosseinloo, S. H. (2011). A frequency-based maritime container assignment model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1152–1161. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.04.002>
- Bernal, L. M. M. D. (2016). Basic Parameters for the Design of Intermodal Public Transport Infrastructures. *Transportation Research Procedia*, 14, 499–508. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.104>
- Bierwirth, C., Kirschstein, T., & Meisel, F. (2012). On Transport Service Selection in Intermodal Rail/Road Distribution Networks. *Business Research*, 5(2).

- Boardman, B. S., Malstrom, E. M., Butler, D. P., & Cole, M. H. (2003). Computer assisted routing of intermodal shipments. *Computers & Industrial Engineering*, 33(1–2), 311–314. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(97\)00100-9](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00100-9)
- Bontekoning, Y. M., & Macharis, C. (2004). Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review. *European Journal of Operational Research*, 153(2), 400–416. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00161-9)
- Bontekoning, Y. M., Macharis, C., & Trip, J. J. (2004). *Is a new applied transportation research field emerging? - A review of intermodal rail-truck freight transport literature. Transportation Research Part A: Policy and Practice* (Vol. 38). <https://doi.org/10.1016/j.tra.2003.06.001>
- Braekers, K., Caris, A., & Janssens, G. K. (2014). Bi-objective optimization of drayage operations in the service area of intermodal terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 65(1), 50–69. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.12.012>
- Cambra-Fierro, J., & Ruiz-Benitez, R. (2009). Advantages of intermodal logistics platforms: Insights from a Spanish platform. *Supply Chain Management*, 14(6), 418–421. <https://doi.org/10.1108/13598540910995183>
- Caris, A., & Janssens, G. K. (2008). A deterministic annealing algorithm for the pre- and end-haulage of intermodal container terminals. *ESM 2008 - 2008 European Simulation and Modelling Conference: Modelling and Simulation 2008*, (2003), 391–398.
- Caris, A., Macharis, C., & Janssens, G. K. (2008). Planning problems in intermodal freight transport: Accomplishments and prospects. *Transportation Planning and Technology*, 31(3), 277–302. <https://doi.org/10.1080/03081060802086397>
- Carrefour. (2019). Carrefour revociona las entregas urbanas con el primer vehículo inteligente. Retrieved August 22, 2019, from <https://www.carrefour.es/grupo-carrefour/sala-de-prensa/noticias2015.aspx?tcm=tcm:5-50885>
- Chang, T. S. (2008). Best routes selection in international intermodal networks. *Computers and Operations Research*, 35(9), 2877–2891. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.12.025>
- Cho, J. H., Kim, H. S., & Choi, H. R. (2012). An intermodal transport network planning algorithm using dynamic programming. *Applied Intelligence*, 36(3), 529–541. <https://doi.org/10.1007/s10489-010-0223-6>
- Choong, S. T., Cole, M. H., & Kutanoglu, E. (2002). Empty container management for intermodal transportation networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 38(6), 423–438. [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(02\)00018-2](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(02)00018-2)
- Cigo. (2018). Son los drones el futuro de la logística? Retrieved August 23, 2019, from <http://www.smart-cigo.com/smart-cigo/son-los-drones-el-futuro-de-la-logistica/7>
- CityLogistics. (2017). DHL expands green urban delivery with City Hub for cargo bicycles. Retrieved August 22, 2019, from <http://www.citylogistics.info/uncategorized/dhl-expands-green-urban-delivery-with-city-hub-for-cargo-bicycles/#more-216>
- Comisión de Transporte del Colegio de Ingenieros de Caminos, C. y P. (2005). Libro Verde de la intermodalidad.

- Corry, P., & Kozan, E. (2006). An assignment model for dynamic load planning of intermodal trains. *Computers and Operations Research*, 33(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.05.013>
- Crainic, T. G. (2000). Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 122(2), 272–288. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00233-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00233-7)
- Crainic, T. G., & Kim, K. H. (2007). Chapter 8 Intermodal Transportation. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 14(C), 467–537. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14008-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14008-6)
- Crainic, T. G., & Laporte, G. (1997). Planning models for freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 97(3), 409–438. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00298-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00298-6)
- Crainic, T. G., Perboli, G., & Rosano, M. (2018). Simulation of intermodal freight transportation systems: a taxonomy. *European Journal of Operational Research*, 270(2), 401–418. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.11.061>
- Darabann, S., Stefanescu, P., & Crisan, R. (2012). Economic Benefits of Developing Intermodal Transport in the European Union, 1(2), 81–87. Retrieved from <http://anale.steconomieuoradea.ro/volume/2012/n2/010.pdf>
- ECMT, & United Nations. (1997). European Conference of Ministers of Transports and United Nations.
- ELMOTOR. (2016). El camión autónomo de Volvo ya ha empezado a trabajar. Retrieved August 23, 2019, from <https://motor.elpais.com/tecnologia/el-camion-autonomo-de-volvo-ya-ha-empezado-a-trabajar/>
- Endesa. (2017). Reparto a domicilio de todo, menos de emisiones. Retrieved August 22, 2019, from <https://endesavehiculoelectrico.com/reparto-a-domicilio-de-todo-menos-de-emisiones/>
- Erera, A. L., Morales, J. C., & Savelsbergh, M. (2005). Global intermodal tank container management for the chemical industry. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(6 SPEC. ISS.), 551–566. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2005.06.004>
- EVO. (2011). *Logistics yearbook*. (P. J. Van der Sterre, Ed.) (Feico Houw). Netherlands.
- González, N. (2016). Nuevas cadenas de transporte de mercancías generadas por las infraestructuras logísticas de intercambio modal. *Revista Transporte Y Territorio*, 14, 108.
- Hanssen, T. E. S., & Mathisen, T. A. (2011). Factors facilitating intermodal transport of perishable goods - transport purchasers viewpoint. *European Transport - Trasporti Europei*, (49), 75–89.
- Hanssen, T., Mathisen, T., & Jørgensen, F. (2012). Generalized Transport Costs in Intermodal Freight Transport. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54, 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.738>
- Harris, I., Wang, Y., & Wang, H. (2015). ICT in multimodal transport and technological trends: Unleashing potential for the future. *International Journal of Production Economics*, 159,

- 88–103. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.09.005>
- Heinold, A., & Meisel, F. (2018). Emission rates of intermodal rail/road and road-only transportation in Europe: A comprehensive simulation study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 65(September), 421–437. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.003>
- INRETS. (2000). IQ – INTERMODAL QUALITY. Retrieved from <http://www.transport-research.info/sites/default/files/project/documents/iq.pdf>
- Ishfaq, R., & Sox, C. R. (2010). Intermodal logistics: The interplay of financial, operational and service issues. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), 926–949. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.02.003>
- Janic, M. (2007). Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(1), 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2006.10.004>
- Jar, I. (2007). The Evolution of Intermodal Transport Research. *Transport*, XXII(4), 296–306.
- Jones, W. B., Cassady, C. R., & Bowden, R. O. (2000). Developing a Standard Definition of Intermodal Transportation. *Transportation Law Journal*, 27(3), 345–352.
- Jula, H., Dessouky, M., Ioannou, P., & Chassiakos, A. (2005). Container movement by trucks in metropolitan networks: Modeling and optimization. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(3), 235–259. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2004.03.003>
- Kapetanis, G. N., Psaraftis, H. N., & Spyrou, D. (2016). A Simple Synchro - Modal Decision Support Tool for the Piraeus Container Terminal. *Transportation Research Procedia*, 14, 2860–2869. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.403>
- Kelleher, G., El-Rhalibi, A., & Arshad, F. (2003). Scheduling for intermodal transport. *Logistics Information Management*, 16(5), 363–372. <https://doi.org/10.1108/09576050310499354>
- Limbourg, S., & Jourquin, B. (2009). Optimal rail-road container terminal locations on the European network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(4), 551–563. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2008.12.003>
- Lin, C. C., Chiang, Y.-I., & Lin, S.-W. (2014). Efficient model and heuristic for the intermodal terminal location problem. *Computers and Operations Research*, 51, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.05.004>
- Lin, C. C., & Lin, S. W. (2016). Two-stage approach to the intermodal terminal location problem. *Computers and Operations Research*, 67, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.09.009>
- Ližbetin, J., & Caha, Z. (2016). Theoretical Criteria for the Evaluation of the Operational Performance of Intermodal Transport Terminals. *Procedia Engineering*, 161, 1197–1203. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.540>
- Macharis, C., Caris, A., Jourquin, B., & Pekin, E. (2011). A decision support framework for intermodal transport policy. *European Transport Research Review*, 3(4), 167–178. <https://doi.org/10.1007/s12544-011-0062-5>

- Meisel, F., Kirschstein, T., & Bierwirth, C. (2013). Integrated production and intermodal transportation planning in large scale production-distribution-networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 60, 62–78. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.10.003>
- Meng, Q., & Wang, X. (2011). Intermodal hub-and-spoke network design: Incorporating multiple stakeholders and multi-type containers. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(4), 724–742. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2010.11.002>
- Milazzo, M. F., Lisi, R., Maschio, G., Antonioni, G., & Spadoni, G. (2010). A study of land transport of dangerous substances in Eastern Sicily. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23(3), 393–403. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.01.007>
- Ministerio de Fomento. (2011). Observatorio Del Transporte Intermodal Terrestre Y Marítimo.
- Ministerio de Fomento. (2017a). El lenguaje del transporte intermodal. In *Análisis, información y divulgación sobre la aportación del transporte por carretera a la intermodalidad* (p. 11). Retrieved from https://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/17FBCF00-91E0-4761-A11C-88A16277D8A4/1550/01_lenguaje_transporte_intermodal.pdf
- Ministerio de Fomento. (2017b). El transporte por carretera y la intermodalidad. *Análisis, Información y Divulgación Sobre La Aportación Del Transporte Por Carretera a La Intermodalidad*, 1–44. Retrieved from http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/099ABA39-1132-4A57-90FB-E5082A2DAE64/1552/03_intermodalidad_espana.pdf
- Monios, J., & Bergqvist, R. (2017). *Intermodal Freight Transport and Logistics*. *Intermodal Freight Transport and Logistics*. <https://doi.org/10.1201/9781315177762>
- Mostert, M., Caris, A., & Limbourg, S. (2017). Road and intermodal transport performance: the impact of operational costs and air pollution external costs. *Research in Transportation Business and Management*, 23, 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.02.004>
- MovilidadElectrica. (2018). Scoobic, un vehículo 000 emisiones para el reparto en las ciudades. Retrieved August 22, 2019, from <https://movilidadelectronica.com/scoobic-un-vehiculo-000-emisiones-para-el-reparto-en-las-ciudades/>
- Newman, A. M., & Yano, C. A. (2003). Scheduling Direct and Indirect Trains and Containers in an Intermodal Setting. *Transportation Science*, 34(3), 256–270. <https://doi.org/10.1287/trsc.34.3.256.12297>
- Pinto, J. T. de M., Mistage, O., Bilotta, P., & Helmers, E. (2018). Road-rail intermodal freight transport as a strategy for climate change mitigation. *Environmental Development*, 25(February 2017), 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2017.07.005>
- Prado, R. R. (2015). Modelo de Transporte de Mercancías para la Planificación de Sistemas Multimodales.
- Prata, J., & Arsenio, E. (2017). Assessing intermodal freight transport scenarios bringing the perspective of key stakeholders. *Transportation Research Procedia*, 25, 900–915. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.465>

- Racunica, I., & Wynter, L. (2005). Optimal location of intermodal freight hubs. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(5), 453–477. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2004.07.001>
- Reis, V., Fabian Meier, J., Pace, G., & Palacin, R. (2013). Rail and multi-modal transport. *Research in Transportation Economics*, 41(1), 17–30. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.10.005>
- Ricci, A., & Black, I. (2005). The Social Costs of Intermodal Freight Transport. *Research in Transportation Economics*, 14(05), 245–285. [https://doi.org/10.1016/S0739-8859\(05\)14009-8](https://doi.org/10.1016/S0739-8859(05)14009-8)
- Riessen, B. van, Negenborn, R. R., Dekker, R., & Lodewijks, G. (2013). Service network design for an intermodal container network with flexible due dates/times and the possibility of using subcontracted transport. *Computer*, 38(5), 20–26. <https://doi.org/10.1109/MC.2005.165>
- Rizzoli, A. E., Fornara, N., & Gambardella, L. M. (2002). A simulation tool for combined rail/road transport in intermodal terminals. *Mathematics and Computers in Simulation*, 59(1–3), 57–71. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(01\)00393-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(01)00393-7)
- Rodrigue, J.-P. (2019). The Geography of Transport Systems. Retrieved from https://transportgeography.org/?page_id=1801
- Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2013). *The Geography of Transport Systems*.
- Roson, R., & Soriani, S. (2007). Intermodality and the changing role of nodes in transport networks. *Transportation Planning and Technology*, 23(3), 183–197. <https://doi.org/10.1080/03081060008717648>
- Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699–1710. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020>
- Sommar, R., & Woxenius, J. (2007). Time perspectives on intermodal transport of consolidated cargo. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 7(June 2005), 163–182.
- Sörensen, K., & Vanovermeire, C. (2013). Bi-objective optimization of the intermodal terminal location problem as a policy-support tool. *Computers in Industry*, 64(2), 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.10.012>
- Sörensen, K., Vanovermeire, C., & Busschaert, S. (2012). Efficient metaheuristics to solve the intermodal terminal location problem. *Computers and Operations Research*, 39(9), 2079–2090. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.10.005>
- Southworth, F., & Peterson, B. E. (2000). Intermodal and international freight network modeling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 8(1–6), 147–166. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(00\)00004-8](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(00)00004-8)
- Stadieseifi, M., Dellaert, N. P., Nuijten, W., Van Woensel, T., & Raoufi, R. (2014). Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 233(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.055>
- Taylor, G. D., Broadstreet, F., Meinert, T. S., & Usher, J. S. (2002). An analysis of intermodal

- ramp selection methods. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 38(2), 117–134. [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(01\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(01)00018-7)
- Transporter. (2018). Conducción autónoma, el camión del futuro. Retrieved August 23, 2019, from <https://www.transporter.es/blog/conduccion-autonoma-camiones>
- United Nations. (2001). Terminology on Combined Transport, New York, Genua.
- uno. (2018). Scoobic. Retrieved August 22, 2019, from <http://www.unologica.org/scoobic-vehiculos-especialmente-disenados-uso-ultima-milla/>
- UOC. (2015). Uso de drones en logística. Retrieved August 23, 2019, from <http://blogdelogistica.es/uso-de-drones-en-logistica/>
- Vasiliauskas, A. V. (2002). Modelling of intermodal freight transportation network. *Transport*, 17(3), 117–121. <https://doi.org/10.1080/16483840.2002.10414024>
- Verma, M., Verter, V., & Gendreau, M. (2011). A tactical planning model for railroad transportation of dangerous goods. *Transportation Science*, 45(2), 163–174. <https://doi.org/10.1287/trsc.1100.0339>
- Verma, M., Verter, V., & Zufferey, N. (2012). A bi-objective model for planning and managing rail-truck intermodal transportation of hazardous materials. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), 132–149. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.06.001>
- Wang, R., Yang, K., Yang, L., & Gao, Z. (2018). Modeling and optimization of a road–rail intermodal transport system under uncertain information. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 72(April), 423–436. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.04.022>
- Wang, X., & Regan, A. C. (2002). Local truckload pickup and delivery with hard time window constraints. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(2), 97–112. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(00\)00037-9](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(00)00037-9)
- Woxenius, J., & Bergqvist, R. (2011). Comparing maritime containers and semi-trailers in the context of hinterland transport by rail. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 680–688. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.08.009>
- Yevdokimov, Y. V. (2000). Measuring Economic Benefits of Intermodal Transportation. *Transportation Law Journal*, 27(3), 439–452.
- zonalogistica. (2017). Bici-Distribución urbana de mercancías. Retrieved August 22, 2019, from <https://zonalogistica.com/bici-distribucion-urbana-de-mercancias/>