



**Universidad  
Europea**

## **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

# **Nuevo enfoque al análisis multicriterio para la integración del ferrocarril en entornos urbanos consolidados**

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Salvador Sanchis López

Dirigido por:

Dña. María José Cano Adán

Don José Luís López Oliete

## AGRADECIMIENTO

Este Trabajo Fin de Máster es, en realidad, mucho más que un ejercicio académico: es la expresión de una pasión que me acompaña desde siempre. El ferrocarril ha sido, para mí, mucho más que una infraestructura o una disciplina técnica; ha sido una forma de imaginar el mundo. Un símbolo de conexión, de progreso, de transformación urbana y social. Como ingeniero con casi dos décadas de experiencia, siempre he encontrado en él el escenario ideal para proyectar un futuro más justo, más sostenible y más humano. Este trabajo nace de ese convencimiento profundo: de la certeza de que las infraestructuras no son solo líneas sobre un plano, sino herramientas para tejer ciudades más habitables, territorios más cohesionados y sociedades más equitativas.

Pero ningún camino, por largo o difícil que sea, se recorre en soledad. Por eso, hoy quiero detenerme para dar las gracias de corazón a todos los que han hecho posible que llegue hasta aquí.

A mis padres y a mi hermano, gracias por enseñarme, desde pequeño, a ser buena persona antes que cualquier otra cosa. Por mostrarme, con hechos más que con palabras, el valor del esfuerzo, de la humildad, de la constancia. Porque todo lo que soy se lo debo, en gran parte, a lo que aprendí viéndolos vivir.

A mis profesores del máster, gracias por vuestra dedicación, por inspirarnos, por hacernos mejores. Y en especial, a mis tutores María José y José Luis, gracias por vuestra generosidad, vuestra cercanía y por guiarme en este viaje con rigor, pero también con humanidad. No podría haber tenido mejores referentes.

A mis compañeros, por haber sido compañeros de verdad. Gracias por las risas, las horas compartidas, los retos y los logros. Y, especialmente, a José y a Edu, por ser ese apoyo constante, por ayudarme a no perder nunca el ánimo y por convertir este desafío en una experiencia inolvidable.

Y por último —pero sin duda, por encima de todo— gracias a mi mujer y a mi hijo. Este trabajo también es vuestro. No es fácil compaginar un máster exigente con la vida profesional y familiar, y sin embargo, ahí habéis estado siempre: esperándome cada fin de semana, regalándome vuestro tiempo cuando apenas quedaban horas, dándome aliento en los momentos de duda, abrazándome en los de cansancio. Gracias por vuestra paciencia infinita, por vuestra fe en mí, por no dejarme caer. Gracias por entender que este sueño era importante y por ayudarme a cumplirlo, incluso cuando eso significaba renunciar a tenerme un poco más cerca.

Esta página, este trabajo, este logro... llevan también TODOS vuestros nombres.

# Índice de Contenidos

<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>2</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>10</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>14</b>
2.1. Objetivo General	14
2.2. Objetivos Específicos	15
<b>3. FASES DE DESARROLLO DEL TFM</b>	<b>18</b>
3.1. Fase 1: Análisis de los retos y oportunidades específicos que plantea la integración del ferrocarril en ciudades consolidadas.	19
3.2. Fase 2: Diseño de un marco metodológico basado en el análisis multicriterio.	19
3.3. Fase 3: Identificación y categorización de los criterios clave para la integración ferroviaria en entornos urbanos consolidados.	20
3.4. Fase 4: Evaluación de alternativas de integración del ferrocarril mediante el marco metodológico propuesto en un caso de estudio.	21
3.5. Fase 5: Propuesta de recomendaciones prácticas para la toma de decisiones estratégicas.	22
<b>4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE</b>	<b>23</b>
4.1. La ciudad y su relación histórica con el transporte	25
4.2. Área Urbana Consolidada	28
4.3. Fortalezas, Debilidades, Oportunidades y Amenazas en las Áreas Urbanas Consolidadas	30
4.4. Concepto de Integración Urbana	35
4.5. Estaciones pasantes y estaciones de fondo de saco o terminales	36
4.6. Principales estudios sobre la integración del ferrocarril en las ciudades	39
4.7. Desarrollo Orientado al Transporte (DOT)	42
4.8. Zonas de Actividades Concertadas (ZAC)	44
4.9. Soluciones de integración comúnmente implementadas	45
4.10. Aplicación del análisis multicriterio	47
4.11. El análisis multicriterio en otros sectores urbanos: una herramienta transversal para la toma de decisiones complejas	55
<b>5. ANÁLISIS DE LOS RETOS Y OPORTUNIDADES QUE PLANTEA LA INTEGRACIÓN DEL FERROCARRIL EN CIUDADES CONSOLIDADAS</b>	<b>56</b>

5.1. Principales Retos _____	56
5.2. Oportunidades _____	65
<b>6. DISEÑO DE UN MARCO METODOLÓGICO BASADO EN EL ANÁLISIS MULTICRITERIO</b> _____	<b>71</b>
6.1. Factores a considerar en un análisis multicriterio _____	74
6.2. Propuesta metodológica para aborda la problemática objeto de estudio _____	76
<b>7. IDENTIFICACIÓN Y CATEGORIZACIÓN DE LOS CRITERIOS CLAVE PARA LA INTEGRACIÓN FERROVIARIA EN ENTORNOS URBANOS CONSOLIDADOS</b> _____	<b>79</b>
7.1. Definición de Criterios para el Análisis Multicriterio _____	80
7.2. Criterios Técnicos (CT) _____	82
7.3. Criterios Económicos (CE) _____	87
7.4. Criterios Ambientales (CA) _____	92
7.5. Criterios Sociales (CS) _____	94
7.6. Nuevos criterios propuestos (NC) _____	99
7.7. Conclusión _____	109
<b>8. APLICACIÓN DE LA NUEVA METODOLOGÍA PROPUESTA EN TRES CASOS DE ESTUDIO: ZARAGOZA (ESPAÑA), MEDELLÍN (COLOMBIA) Y LYON (FRANCIA)</b> _____	<b>112</b>
8.1. Introducción _____	112
8.2. Caso de Estudio 1: Zaragoza (España) _____	114
8.3. Caso de Estudio 2: Medellín (Colombia) _____	123
8.4. Caso de Estudio 3: Lyon (Francia) _____	131
8.5. Resumen metodológico y resultados por caso de estudio _____	139
8.6. Comparativa entre casos de estudio: similitudes, diferencias y aprendizajes transferibles _____	141
8.7. ¿Se obtendría la misma solución si se hubieran usado solo criterios tradicionales? _____	144
8.8. Comparativa metodológica: impacto del enfoque tradicional frente al análisis multicriterio ampliado _____	147
<b>9. CONCLUSIONES</b> _____	<b>149</b>
9.1. Ventajas de la nueva metodología con inclusión de nuevos criterios _____	149
9.2. Principales resultados _____	151
9.3. Limitaciones del estudio _____	155
<b>10. RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b> _____	<b>157</b>
10.1. Ampliación del análisis multicriterio mediante participación ciudadana activa _____	157
10.2. Desarrollo de herramientas digitales de apoyo a la toma de decisiones _____	158
10.3. Aplicación del marco metodológico a contextos geográficos diversos _____	158

10.4. Incorporación de criterios dinámicos vinculados a la adaptación climática y la transición energética _____	159
10.5. Evaluación longitudinal del impacto post-implementación _____	159
<b>11. HOJA DE RUTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO _____</b>	<b>161</b>
<b>12. GLOSARIO _____</b>	<b>162</b>
<b>13. BIBLIOGRAFIA _____</b>	<b>164</b>

**ANEXO I CÁLCULOS REALIZADOS MEDIANTE MATLAB® R2022b PARA LOS TRES  
CASOS DE ESTUDIO ANALIZADOS**

## Lista de figuras

Figura 1.	Análisis DAFO entornos urbanos consolidados. Fuente: Elaboración propia .....	34
Figura 2.	Proyecto Atocha. Estación Pasante. Fuente: Adif .....	37
Figura 3.	Representación esquemática de los DOTs. (Fuente: Energy Innovation). ....	42
Figura 4.	Tabla comparativa de los enfoques metodológicos revisados. Fuente: Elaboración propia a partir de Belton & Stewart (2002), Penadés-Plà et al. (2016), y Yepes (2018).....	54
Figura 6.	Recreación virtual proyecto de Chamartín. Fuente: Adif .....	60
Figura 7.	Recreación virtual de HS2 en Birmingham. Fuente: WW+P .....	61
Figura 8.	Tabla resumen solución de integración tradicionalmente consideradas.....	64
Figura 9.	Recreación virtual Elizabeth Line Estación Canary Wharf – Londres. Fuente: Crossrail	67
Figura 10.	Clasificación de los métodos MADM (Penadés-Plà et al., 2016) – Víctor Yepes (UPV, 2018)	73
Figura 11.	Matriz de decisión. Fuente: Modelos Avanzados en Ingeniería Civil II – UE. Profesor: José Luis López Oliete.....	75
Figura 12.	Principales Criterios Técnicos a considerar. Fuente: Elaboración propia. ....	82
Figura 13.	Corredor propuesta alta velocidad en Birmingham. Reino Unido. Fuente: WW+P ...	85
Figura 14.	Principales Criterios Económicos a considerar. Fuente: Elaboración propia.....	87
Figura 15.	Imagen de la estación de Santa Justa en Sevilla antes de la llegada de la Alta Velocidad y después.....	91
Figura 16.	Principales Criterios Ambientales a considerar. Fuente: Elaboración propia.....	92
Figura 17.	Propuesta de Criterios Sociales a considerar. Fuente: Elaboración propia. ....	94
Figura 18.	Nueva Estación Logroño. Fuente: Arquitectura Viva.....	95
Figura 19.	Recreación virtual de la futura estación de la Sagrera de Barcelona, vista desde Sant Martí y anfiteatro. Fuente: B720 / BSAV.....	98
Figura 20.	Propuestas Nuevos Criterios a considerar. Fuente: Elaboración propia. ....	99
Figura 21.	Recreación de la estación de HS2 Old Oak Common en Londres. Fuente: HS2 .....	100
Figura 22.	Ventajas aplicación IA en el ferrocarril. Fuente: MAFEX .....	101
Figura 23.	Desafíos aplicación IA en el ferrocarril. Fuente: MAFEX.....	102
Figura 24.	Ejemplo de consulta pública HS2 Birmingham & Fazeley Canal Viaduct. Fuente: HS2	105
Figura 25.	Beneficios de la implementación de la economía circular. Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el reto demográfico. ....	106
Figura 26.	Ejes de Actuación del I Plan de Acción de Economía Circular. Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y reto demográfico.....	107
Figura 27.	Tabla Resumen Listado de Criterios a considerar en los Análisis Multicriterio. Fuente: Elaboración propia. ....	111
Figura 28.	Casos de Estudio del TFM. Fuente: Elaboración propia.....	113
Figura 29.	Criterios y Pesos Casos de Estudio 1: Zaragoza. Fuente: Elaboración propia.....	118
Figura 30.	Resolución y Evaluación Multicriterio Casos de Estudio 1: Zaragoza. Fuente: Elaboración propia .....	119
Figura 31.	Síntesis Caso de Estudio 1 – Zaragoza. Fuente: Elaboración propia .....	122
Figura 32.	Criterios y Pesos Casos de Estudio 2: Medellín. Fuente: Elaboración propia .....	127

Figura 33.	Síntesis Caso de Estudio 2 – Medellín. Fuente: Elaboración propia .....	130
Figura 34.	Criterios y Pesos Casos de Estudio 3: Lyon. Fuente: Elaboración propia.....	135
Figura 35.	Síntesis Caso de Estudio 3 – Lyon. Fuente: Elaboración propia.....	138
Figura 36.	Cuadro Resumen Casos de Estudio. Fuente: Elaboración propia .....	139
Figura 37.	PROMETHEE - Diagrama de flujo neto (Net Flow) del caso de estudio de Medellín. Fuente: Elaboración propia .....	140
Figura 38.	Tabla comparativa de los tres casos: similitudes, diferencias y aprendizajes transferibles. Fuente: Elaboración propia.....	142
Figura 39.	Cuadro Resumen Enfoque Tradicional vs Enfoque Multicriterio Ampliado. Fuente: Elaboración propia .....	148

## RESUMEN

En este Trabajo Fin de Máster, titulado *“Nuevo enfoque al análisis multicriterio para la integración del ferrocarril en entornos urbanos consolidados”*, presento una propuesta innovadora que busca transformar la forma en que se aborda la planificación ferroviaria en contextos urbanos densos y complejos. El objetivo principal ha sido replantear los enfoques tradicionales desde una perspectiva más amplia, alineada con las nuevas demandas sociales y urbanas.

A partir de la constatación de que las metodologías convencionales se centran predominantemente en criterios técnicos y económicos, propongo un marco metodológico renovado basado en el análisis multicriterio. Este nuevo enfoque incorpora dimensiones técnicas, económicas, sociales, ambientales y otros factores emergentes, permitiendo así el diseño de soluciones más sostenibles, inclusivas y adaptadas al contexto urbano específico.

El propósito central del trabajo es desarrollar un modelo de evaluación que analice de forma sistemática y equilibrada las distintas alternativas de integración ferroviaria, considerando tanto la operatividad como su impacto en la calidad de vida urbana. La metodología se estructura en cinco fases, desde el diagnóstico inicial hasta la formulación de recomendaciones estratégicas, y se aplica a tres casos reales: Zaragoza (España), Medellín (Colombia) y Lyon (Francia). Estos estudios de caso han permitido validar la eficacia del enfoque propuesto y evidenciar cómo un análisis multicriterio ampliado ofrece soluciones más equilibradas que las obtenidas mediante criterios tradicionales.

Una de las contribuciones más destacadas de este trabajo es la incorporación de criterios innovadores como la percepción ciudadana, la cohesión social, el impacto en la salud pública y la resiliencia urbana. Estos elementos, habitualmente ausentes en los procesos técnicos de evaluación, aportan una visión más humana y contextualizada al diseño ferroviario. Además, el marco metodológico propuesto permite proyectar beneficios en términos de regeneración urbana, mejora de la conectividad, reducción de barreras físicas y revitalización de espacios degradados.

Este enfoque se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular con el ODS 11 (“Ciudades y comunidades sostenibles”), así como con los principios de la Nueva Agenda Urbana de las Naciones Unidas, ofreciendo una herramienta práctica, replicable y con una visión holística.



En definitiva, este trabajo representa una contribución significativa a la ingeniería urbana del siglo XXI. Al superar los límites del enfoque técnico tradicional, se propone una manera más innovadora de concebir y diseñar la ciudad, promoviendo modelos urbanos más resilientes, cohesionados y centrados en las personas.

## ABSTRACT

The Master's Thesis titled *“A New Approach to Multi-Criteria Analysis for the Integration of Railways in Consolidated Urban Environments”*, authored by Salvador Sanchis López, addresses a highly relevant challenge in contemporary urban planning: how to incorporate or adapt railway infrastructure within dense, established urban areas. Given the limitations of traditional methodologies—primarily focused on technical and economic aspects, the author proposes a novel framework based on multi-criteria analysis (MCA) that integrates technical, economic, social, environmental, and emerging dimensions to support the development of more sustainable, inclusive, and context-sensitive solutions.

The main objective of the study is to develop an evaluation model capable of systematically and equitably analyzing various railway integration alternatives, considering not only operational efficiency but also their broader impact on urban quality of life. The methodology is structured in five phases—from an initial diagnostic to strategic recommendations—and involves identifying and categorizing key evaluation criteria. The proposed framework is applied in three real-world case studies: Zaragoza (Spain), Medellín (Colombia), and Lyon (France), which validate the model's applicability and demonstrate how an expanded multi-criteria approach produces more balanced solutions than conventional methods.

Key contributions of the thesis include the incorporation of innovative criteria such as citizen perception, social cohesion, public health impact, and urban resilience—factors typically overlooked in technical assessments. The framework enables the projection of benefits such as urban regeneration, improved connectivity, reduced physical barriers, and revitalized degraded spaces. It also aligns with the United Nations' Sustainable Development Goals, particularly SDG 11 (“Sustainable Cities and Communities”), and the New Urban Agenda, providing a practical, holistic, and replicable approach.

In summary, this work presents a robust and useful tool for decision-making in the design and implementation of railway infrastructure projects in consolidated cities. By transcending the limitations of traditional technical analysis, it offers a valuable contribution to 21st-century urban engineering, supporting the development of more resilient, cohesive, and people-centered urban environments.

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, las dinámicas de urbanización han experimentado un crecimiento exponencial, generando profundas transformaciones en la estructura y funcionamiento de las ciudades. En paralelo, la urgencia por ir hacia modelos de movilidad más sostenible ha intensificado el interés por las infraestructuras ferroviarias como vectores estratégicos para una planificación urbana más eficiente, equitativa y ambientalmente responsable. En este contexto, el ferrocarril se ha consolidado como una pieza clave no solo desde un punto de vista funcional —en términos de capacidad, eficiencia energética y conectividad territorial—, sino también como una oportunidad para reconfigurar tejidos urbanos existentes y promover una mayor integración territorial (Newman & Kenworthy, 1999).

No obstante, insertar o reconfigurar el sistema ferroviario en entornos urbanos ya consolidados representa una de las actuaciones más complejas a las que se enfrentan actualmente los ingenieros, los planificadores urbanos y los gestores públicos. Las restricciones espaciales derivadas de la elevada densidad edificatoria, la presencia de usos ya consolidados, la fragmentación del suelo y la superposición de múltiples redes de infraestructuras convierten este proceso en una operación de elevada sensibilidad técnica, económica, social y ambiental. Además, la ausencia de un marco metodológico común ha dado lugar a una notable heterogeneidad en las soluciones adoptadas, lo que dificulta la sistematización de experiencias y la construcción de modelos replicables (Banister, 2005).

Ante este escenario, resulta cada vez más evidente que las metodologías tradicionales, enfocadas principalmente en los aspectos técnicos y la rentabilidad financiera, son insuficientes para abordar los desafíos del entorno urbano contemporáneo. Como argumenta Jane Jacobs en *“The Death and Life of Great American Cities”* (1961), los enfoques reductivos en la planificación urbana ignoran la complejidad, diversidad y dinamismo propios de las ciudades vivas. Integrar infraestructuras como el ferrocarril requiere una aproximación más holística que articule tanto las lógicas de ingeniería como las dimensiones sociales, culturales y ecológicas del espacio urbano.

En este sentido, el análisis multicriterio se presenta como una herramienta metodológica especialmente adecuada. Su capacidad para integrar variables cuantitativas y cualitativas, y para estructurar procesos de decisión complejos bajo criterios múltiples y a menudo contradictorios, lo convierte en un instrumento clave en la planificación de infraestructuras urbanas críticas (Saaty, 1980; Belton & Stewart, 2002).

Este enfoque no solo responde a una necesidad técnica, sino también a un mandato normativo cada vez más presente tanto en el ámbito europeo como nacional. A nivel comunitario, la Unión Europea impulsa desde hace años una planificación de infraestructuras más integrada y sostenible a través de instrumentos como la Red Transeuropea de Transporte (TEN-T), que promueve la interoperabilidad, la eficiencia modal y la cohesión territorial, con especial atención a la conectividad urbana. En esta línea, el Reglamento (UE) 2021/1153 sobre el Mecanismo “*Conectar Europa*” subraya la importancia de integrar el ferrocarril en los entornos urbanos desde una perspectiva sistémica y multimodal.

En el contexto español, la Agenda Urbana Española (AUE), aprobada por el Consejo de Ministros en 2019, recoge entre sus objetivos estratégicos la necesidad de planificar infraestructuras de transporte que favorezcan la accesibilidad, la cohesión social y la sostenibilidad ambiental. Esta agenda aboga explícitamente por la integración del ferrocarril en la ciudad consolidada como un factor clave para avanzar hacia un modelo urbano más eficiente, equitativo y resiliente. Tanto la TEN-T como la AUE coinciden en exigir un cambio de paradigma: pasar de modelos sectoriales y fragmentados a enfoques transversales e integradores, capaces de articular de manera coherente la movilidad, el urbanismo y la transición ecológica.

Mediante el uso de herramientas multicriterio, es posible incorporar criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales de forma simultánea, abriendo la posibilidad de incluir además dimensiones emergentes como la resiliencia urbana (Ahern, 2011), la equidad territorial, o el potencial regenerador del desarrollo orientado al transporte (Calthorpe, 1993).

El presente Trabajo Fin de Máster (TFM) plantea como objetivo principal el diseño e implementación de un marco de análisis multicriterio para la evaluación de propuestas de integración ferroviaria en entornos urbanos consolidados. Esta aproximación no pretende sustituir los criterios técnicos clásicos, sino más bien complementarlos y expandir su alcance, respondiendo a las exigencias actuales en materia de sostenibilidad, participación ciudadana y planificación estratégica integrada.

De este modo, se desarrolla una propuesta metodológica que supone un nuevo enfoque a los análisis multicriterio incorporando no solo indicadores convencionales —como los costes de inversión, la capacidad operativa o el impacto ambiental directo—, sino también otros nuevos factores que reflejan la complejidad del sistema urbano contemporáneo y las necesidades de la sociedad actual.

Se trata, en definitiva, de avanzar hacia una planificación más informada, inclusiva y adaptable, en consonancia con los principios recogidos en la Nueva Agenda Urbana de la ONU - Hábitat (2016) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 11: *“Ciudades y comunidades sostenibles”*.

A través de este enfoque, se pretende proporcionar una herramienta suficientemente robusta y replicable que contribuya a la toma de decisiones estratégicas futuras, promoviendo modelos de ciudad más cohesionados, resilientes y centrados en las personas y sus necesidades actuales.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

El presente Trabajo de Fin de Máster plantea como objetivo principal el diseño e implementación de un nuevo marco de análisis multicriterio para evaluar la integración del sistema ferroviario en entornos urbanos consolidados, entendidos como aquellos espacios con una estructura urbana densa, usos del suelo consolidados y una alta complejidad funcional. En estos contextos, la coexistencia entre infraestructuras ferroviarias y tejido urbano plantea retos significativos en términos de planificación, movilidad, sostenibilidad y calidad de vida.

A diferencia de otros estudios previos que abordan esta temática desde perspectivas sectoriales o centradas exclusivamente en aspectos técnicos o económicos, este trabajo propone un enfoque integral e interdisciplinar, basado en una metodología de evaluación multicriterio. Esta herramienta permite analizar de forma sistemática y equilibrada dimensiones clave como la eficiencia operativa del transporte, la sostenibilidad ambiental, la cohesión social y la viabilidad económica, con el fin de diseñar estrategias que respondan de manera coherente a los desafíos urbanos contemporáneos.

Uno de los principales aportes novedosos de este estudio radica en la incorporación simultánea de criterios técnicos, sociales y ambientales en la toma de decisiones, así como en la consideración activa de la percepción ciudadana como variable estratégica para la implementación de soluciones. Mientras que gran parte de la literatura existente se centra en la optimización de la infraestructura o en la mejora del rendimiento del sistema ferroviario, este trabajo enfatiza la necesidad de alinear las intervenciones con las dinámicas urbanas locales y con las expectativas de la comunidad, promoviendo así una planificación más inclusiva y contextualizada.

Además, se introduce una reflexión crítica sobre el papel del ferrocarril como agente de transformación urbana, no solo como infraestructura de transporte, sino como catalizador de procesos de regeneración, conectividad territorial y cohesión social. En este sentido, el trabajo se alinea con los principios de la Nueva Agenda Urbana de ONU-Hábitat (2016) y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 11: “Ciudades y comunidades sostenibles”, aportando una visión estratégica que trasciende la mera funcionalidad del sistema ferroviario.

En definitiva, este Trabajo de Fin de Máster se posiciona como una contribución original y rigurosa a la planificación del transporte ferroviario en contextos urbanos complejos. Su valor añadido reside en la combinación de un enfoque metodológico robusto con una perspectiva crítica y propositiva, orientada a generar soluciones viables, sostenibles y socialmente aceptadas. Así, se aspira a ofrecer herramientas útiles para la toma de decisiones en políticas públicas de movilidad y ordenación del territorio, en consonancia con los retos que enfrentan las ciudades del siglo XXI.

## **2.2. Objetivos Específicos**

Para el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Máster, se han establecido una serie de objetivos específicos que servirán como guía para el análisis y la elaboración de propuestas orientadas a mejorar la integración del ferrocarril en entornos urbanos consolidados. Estos objetivos permiten estructurar un enfoque metodológico riguroso, adaptado a la complejidad inherente a este tipo de intervenciones urbanas.

En primer lugar, se plantea la identificación y definición de los criterios clave que permitan construir un análisis multicriterio coherente, sólido y adaptado al contexto del transporte ferroviario urbano. Este paso resulta esencial para asegurar la objetividad y relevancia de las evaluaciones que se desarrollarán posteriormente.

En segundo lugar, se contempla la necesidad de realizar un diagnóstico exhaustivo del entorno urbano consolidado, prestando especial atención a sus características físicas, sociales, económicas y ambientales, que condicionan de manera directa la viabilidad y el impacto de cualquier intervención ferroviaria. A partir de este conocimiento contextual, se abordará una exploración y revisión crítica de las soluciones ya implementadas o en fase de desarrollo, tanto a nivel nacional como internacional, con el objetivo de identificar buenas prácticas y lecciones aplicables a nuevos proyectos.

Como cuarto objetivo, se propone la aplicación de técnicas avanzadas de análisis multicriterio, que permitan evaluar de forma objetiva, sistemática y comparativa las distintas alternativas de integración del ferrocarril. Este análisis se enriquecerá mediante la incorporación de criterios innovadores y menos convencionales, que reflejen no solo las condiciones actuales, sino también las tendencias futuras en materia de movilidad urbana, sostenibilidad y gobernanza del territorio.

Asimismo, se trabajará en el desarrollo de propuestas que respondan a un enfoque integrado y equilibrado, combinando la viabilidad técnica con la sostenibilidad económica y la aceptación social. Estas propuestas serán sometidas a una evaluación detallada, considerando su impacto ambiental, social y económico, con el fin de garantizar que su implementación contribuya de manera real y medible a una mejora integral del sistema de movilidad urbana.

Finalmente, como cierre del proceso, se llevará a cabo la formulación de un conjunto de recomendaciones prácticas y estratégicas, dirigidas especialmente a técnicos, planificadores y responsables políticos, que sirvan de orientación para la aplicación efectiva de las soluciones planteadas.

A continuación, se procede a una descripción más detallada de cada uno de estos objetivos, con el propósito de contextualizar su alcance y justificación dentro del marco del trabajo.

1. **Identificación y definición de criterios clave para el análisis multicriterio.** El objetivo es desarrollar un conjunto de criterios que sean medibles, independientes y relevantes, alineados con los objetivos del estudio y más acorde con la realidad actual. Estos criterios deben permitir una evaluación exhaustiva y precisa de las distintas alternativas de integración ferroviaria, abarcando tanto aspectos técnicos como sociales, económicos y ambientales. La claridad y precisión en la definición de estos criterios son fundamentales para asegurar la objetividad y la comparabilidad de los resultados.
2. **Diagnóstico del entorno urbano consolidado.** Realizar un análisis detallado de las características urbanísticas, sociales, económicas y ambientales de los entornos urbanos consolidados. Este diagnóstico incluirá la identificación de fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas (análisis FODA), proporcionando una comprensión profunda de las particularidades y desafíos específicos que enfrenta estas áreas urbanas. Este conocimiento es esencial para adaptar las soluciones de integración ferroviaria a las necesidades y condiciones locales.
3. **Exploración de soluciones de integración ferroviaria.** Investigar casos de estudio tanto nacionales como internacionales, con el objetivo de identificar buenas prácticas, tecnologías innovadoras y estrategias exitosas que puedan ser aplicables a entornos urbanos consolidados. Esta exploración incluirá una revisión de la literatura académica, informes técnicos y experiencias prácticas, permitiendo una comprensión amplia y actualizada de las tendencias y avances en la integración ferroviaria.



4. **Aplicación de técnicas avanzadas de análisis multicriterio.** Utilizar herramientas y metodologías avanzadas de análisis multicriterio para evaluar las alternativas de integración ferroviaria. Estas técnicas permitirán la consideración simultánea de múltiples dimensiones, como la eficiencia técnica, el impacto económico, la sostenibilidad ambiental y la aceptación social. La aplicación de estas técnicas será rigurosa y sistemática, asegurando la transparencia y la reproducibilidad de los resultados.
5. **Incorporación de criterios innovadores y menos convencionales.** Evaluar aspectos como la cohesión social, la calidad del paisaje urbano, el impacto en la salud pública y la percepción ciudadana. Estos criterios, aunque menos convencionales, son fundamentales para una evaluación integral y holística de las alternativas de integración ferroviaria. La inclusión de estos aspectos permitirá considerar el bienestar y la calidad de vida de los residentes, así como la aceptación y el apoyo de la comunidad a las soluciones propuestas.
6. **Propuesta de soluciones integradas.** Diseñar propuestas equilibradas que combinen aspectos técnicos, sociales, económicos y ambientales. Estas soluciones deben ser viables desde el punto de vista técnico y económico, sostenibles desde el punto de vista ambiental y aceptables desde el punto de vista social. La integración de estos aspectos asegurará que las soluciones propuestas sean completas y equilibradas, y que puedan ser implementadas de manera efectiva y sostenible.
7. **Evaluación del impacto de las soluciones propuestas.** Realizar simulaciones o análisis de impacto para medir cómo las soluciones propuestas podrían contribuir a mejorar la eficiencia del transporte, reducir externalidades negativas y promover una mayor sostenibilidad urbana. Estos análisis serán detallados y rigurosos, proporcionando una evaluación cuantitativa y cualitativa de los beneficios y costos asociados a cada alternativa. La evaluación del impacto es esencial para ajustar y optimizar las soluciones antes de su implementación.
8. **Generación de recomendaciones prácticas.** Elaborar una serie de recomendaciones dirigidas a gestores urbanos, administraciones públicas y profesionales del transporte. Estas recomendaciones serán claras, prácticas y orientadas a facilitar la implementación de las propuestas desarrolladas. Además, incluirán directrices y estrategias para la gestión y el seguimiento de las soluciones, asegurando su sostenibilidad y efectividad a largo plazo.

### 3. FASES DE DESARROLLO DEL TFM

Con el propósito de alcanzar los objetivos planteados, se ha diseñado una metodología estructurada en cinco fases interrelacionadas, que se desarrollarán con rigor y detalle a lo largo del presente Trabajo de Fin de Máster (TFM):

- **Fase 1: Análisis de los retos y oportunidades específicos que plantea la integración del ferrocarril en ciudades consolidadas.** Esta fase inicial se orienta a la identificación exhaustiva de los desafíos técnicos, sociales y ambientales, así como de las potencialidades que caracterizan la inserción ferroviaria en contextos urbanos ya desarrollados.
- **Fase 2: Diseño conceptual y formalización de un marco metodológico fundamentado en el análisis multicriterio.** En esta etapa, se establecerán los fundamentos teóricos y operativos que permitan evaluar de manera integral y sistemática las múltiples variables que intervienen en el proceso de integración ferroviaria.
- **Fase 3: Identificación, selección y categorización rigurosa de los criterios determinantes para la integración ferroviaria en contextos urbanos consolidados.** Se realizará una clasificación exhaustiva de los factores clave, fundamentada en la revisión bibliográfica y el análisis empírico, que servirá de base para la evaluación de alternativas.
- **Fase 4: Aplicación del marco metodológico a un estudio de caso representativo, para la evaluación comparativa de alternativas de integración ferroviaria.** Esta fase permitirá validar la capacidad analítica del modelo mediante la valoración objetiva y cuantificada de diferentes opciones, evaluando sus impactos técnicos, económicos, sociales y ambientales.
- **Fase 5: Formulación de recomendaciones estratégicas y operativas dirigidas a la toma de decisiones, orientadas a favorecer la implementación eficaz y sostenible de las soluciones propuestas.** Se generarán pautas prácticas que faciliten la adopción de las mejores alternativas, atendiendo a los contextos específicos y a los intereses de los diversos actores involucrados.

A continuación, se describen de forma breve cada una de estas fases, detallando su alcance, metodología y objetivos particulares.

### **3.1. Fase 1: Análisis de los retos y oportunidades específicos que plantea la integración del ferrocarril en ciudades consolidadas.**

En esta fase preliminar, se llevará a cabo un análisis detallado y crítico destinado a identificar y comprender las principales ventajas, desafíos y limitaciones asociados a la integración del ferrocarril en entornos urbanos consolidados. Se examinarán las restricciones espaciales derivadas de la densidad y la morfología urbana existente, así como las normativas y regulaciones vigentes que inciden directamente en la planificación, diseño y ejecución de infraestructuras ferroviarias. Asimismo, se analizarán los aspectos técnicos, sociales y ambientales que influyen en la viabilidad y aceptación de estas intervenciones.

Paralelamente, se evaluarán las oportunidades que ofrece la integración ferroviaria como catalizador de la regeneración urbana, la revitalización de espacios públicos y la promoción del desarrollo económico local. Se explorarán los potenciales beneficios en términos de mejora de la conectividad, reducción de la congestión vehicular, fomento de la movilidad sostenible y contribución a la cohesión social dentro de la ciudad.

Este análisis sentará las bases conceptuales y contextuales para el desarrollo del resto del trabajo, permitiendo contextualizar la problemática y definir el alcance y los límites del estudio, así como identificar las áreas de mayor relevancia para la formulación de propuestas innovadoras y efectivas.

### **3.2. Fase 2: Diseño de un marco metodológico basado en el análisis multicriterio.**

En esta segunda fase, se procederá al desarrollo de una metodología integral y rigurosa que permita evaluar de manera estructurada, sistemática y objetiva las diversas alternativas para la integración del ferrocarril en entornos urbanos consolidados. Este marco metodológico constituirá una herramienta analítica avanzada dirigida a facilitar la toma de decisiones por parte de los agentes implicados, asegurando que dichas decisiones se fundamenten en un análisis equilibrado, transparente y multidimensional.

El diseño metodológico incluirá la selección crítica y la aplicación de técnicas de análisis multicriterio (AMC) adecuadas para el contexto del estudio, con capacidad para incorporar y ponderar un amplio espectro de criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales. Se dará especial énfasis a la flexibilidad y adaptabilidad del modelo para reflejar la complejidad inherente a la integración ferroviaria en ciudades densamente consolidadas.

Adicionalmente, se integrarán técnicas complementarias de modelado y simulación que permitan anticipar y cuantificar el impacto potencial de las diferentes alternativas evaluadas, en términos de movilidad urbana, sostenibilidad ambiental y calidad de vida de los habitantes. Esto incluirá la proyección de variables clave como la reducción de tiempos de viaje, disminución de emisiones contaminantes, influencia en la accesibilidad y cohesión social, entre otros aspectos relevantes.

De esta manera, la metodología propuesta no solo brindará un soporte técnico sólido para la evaluación comparativa de opciones, sino que también facilitará la identificación de soluciones equilibradas y factibles que respondan a los retos multifacéticos que plantea la integración del ferrocarril en ciudades consolidadas.

### **3.3. Fase 3: Identificación y categorización de los criterios clave para la integración ferroviaria en entornos urbanos consolidados.**

En esta fase, se llevará a cabo una identificación exhaustiva y una clasificación sistemática de los criterios fundamentales que deben ser contemplados para abordar adecuadamente la integración del ferrocarril en contextos urbanos consolidados. La selección de estos criterios se fundamentará en una revisión bibliográfica exhaustiva, análisis de casos de estudio y consulta con expertos, con el fin de garantizar su relevancia y aplicabilidad.

Para facilitar su análisis y aplicación en el marco metodológico multicriterio, dichos criterios serán organizados en cinco categorías principales, que reflejan las dimensiones esenciales y complementarias del problema:

- 1) Criterios técnicos:** Relacionados con la funcionalidad, la seguridad y la compatibilidad de las nuevas soluciones con la infraestructura existente. Estos criterios incluyen la evaluación de la capacidad operativa, la interoperabilidad con otros sistemas de transporte y la resiliencia ante posibles fallos o emergencias.
- 2) Criterios económicos:** Abarcan los costos de construcción, operación y mantenimiento de las soluciones propuestas. Además, se consideran los beneficios económicos a largo plazo, como la reducción de costos de transporte, el incremento del valor de las propiedades cercanas y el impulso al desarrollo económico local.
- 3) Criterios medioambientales:** Enfocados en la reducción de emisiones contaminantes, la gestión del ruido y el impacto visual. También se incluyen la preservación de áreas verdes, la minimización del consumo de recursos naturales y la promoción de prácticas sostenibles en la construcción y operación de la infraestructura ferroviaria.

- 4) **Criterios sociales:** Centran su atención en el impacto sobre la población local, la mejora de la accesibilidad y la contribución a la cohesión urbana. Esto abarca la integración de comunidades, la mejora de la calidad de vida de los residentes y la creación de espacios públicos que fomenten la interacción social.
- 5) **Nuevos criterios propuestos:** Orientados a desarrollar soluciones más sostenibles, accesibles, inclusivas y adaptadas a las necesidades actuales y futuras de las ciudades. Estos criterios consideran aspectos como la incorporación de tecnologías emergentes, la flexibilidad para adaptarse a cambios demográficos y la capacidad de respuesta ante desafíos climáticos y urbanos, entre otros.

Esta estructuración permitirá una evaluación integral y equilibrada, capaz de contemplar las múltiples dimensiones y actores involucrados en la planificación y ejecución de proyectos ferroviarios en áreas urbanas consolidadas, asegurando así una mayor pertinencia y efectividad de las propuestas resultantes.

#### **3.4. Fase 4: Evaluación de alternativas de integración del ferrocarril mediante el marco metodológico propuesto en un caso de estudio.**

En esta fase, se aplicará el marco metodológico desarrollado a un caso de estudio específico. Este caso de estudio permitirá comparar diversas opciones de diseño, trazado y tecnologías ferroviarias, evaluando sus ventajas y desventajas en un contexto real.

Se llevarán a cabo simulaciones y análisis detallados para validar las soluciones propuestas, asegurando que sean viables desde una perspectiva técnica, económica, social y ambiental. Estas simulaciones ayudarán a prever el comportamiento de las distintas alternativas en condiciones reales, permitiendo ajustar y optimizar las soluciones antes de su implementación.

Además, se utilizarán herramientas de modelado avanzado para analizar el impacto de cada opción en la movilidad urbana, la eficiencia del transporte y la calidad de vida de los habitantes. Se considerarán factores como la reducción de tiempos de viaje, la optimización del uso de recursos y la minimización de impactos negativos en la comunidad.

Esta fase también incluirá la recopilación de datos empíricos y la consulta con expertos y partes interesadas para asegurar que las soluciones propuestas sean robustas y ampliamente aceptadas. En última instancia, el objetivo es demostrar que las alternativas seleccionadas no solo son técnicamente factibles y económicamente sostenibles, sino que también contribuyen positivamente al desarrollo urbano y al bienestar de la población.

### **3.5. Fase 5: Propuesta de recomendaciones prácticas para la toma de decisiones estratégicas.**

En la fase final del presente trabajo, se formularán recomendaciones concretas y operativas dirigidas a los responsables de la planificación urbana, la gestión del transporte ferroviario y las autoridades involucradas en la toma de decisiones estratégicas. Estas orientaciones estarán fundamentadas en los hallazgos obtenidos a lo largo de las fases anteriores y orientarán la implementación efectiva de soluciones integradas para la integración del ferrocarril en entornos urbanos consolidados.

Las recomendaciones incluirán estrategias específicas para mitigar los impactos negativos asociados a las intervenciones ferroviarias, tales como el desplazamiento involuntario de comunidades, la alteración del paisaje urbano y los posibles daños ambientales. Se propondrán medidas que garanticen la protección del entorno natural y cultural, así como la promoción de la equidad social y la participación ciudadana en los procesos de planificación.

Asimismo, se identificarán acciones orientadas a maximizar los beneficios derivados de la integración ferroviaria, incluyendo la mejora de la movilidad sostenible, la reducción de la congestión vehicular y las emisiones contaminantes, así como la revitalización de áreas urbanas deterioradas o subutilizadas. Estas recomendaciones buscarán fomentar un desarrollo urbano equilibrado, resiliente y coherente con los objetivos de sostenibilidad y calidad de vida.

De este modo, la fase final consolidará un conjunto de directrices prácticas, adaptables y contextualizadas, que contribuirán a una toma de decisiones informada, eficiente y responsable, facilitando la implementación exitosa de las soluciones propuestas y su integración armónica en la estructura urbana existente.

#### **4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE**

La integración del ferrocarril en entornos urbanos consolidados constituye una problemática compleja que demanda un abordaje multidisciplinar y una comprensión profunda de múltiples factores que van más allá del ámbito puramente técnico. No se trata únicamente de insertar infraestructuras en un tejido urbano ya existente, sino de hacerlo con una visión estratégica, sostenible y sensible al contexto social, económico, ambiental y funcional del espacio urbano. Para desarrollar un marco metodológico que responda a esta complejidad, es imprescindible partir de una sólida base conceptual y contextual, que permita entender tanto la evolución histórica del problema como las herramientas y enfoques actuales disponibles para su análisis e intervención.

En este sentido, el presente apartado tiene como finalidad establecer los fundamentos teóricos y prácticos sobre los que se apoya el enfoque propuesto en este Trabajo Fin de Máster. La estructura del capítulo responde a una lógica progresiva, que parte de lo general para llegar a lo particular, articulando los antecedentes históricos, los conceptos clave, las tipologías ferroviarias, los marcos de planificación y las metodologías de análisis, todo ello con el fin de construir un relato riguroso, coherente y aplicable a la realidad de nuestras ciudades.

En primer lugar, se aborda la relación histórica entre la ciudad y el transporte, como punto de partida imprescindible para entender cómo la movilidad ha moldeado —y sigue moldeando— la forma y dinámica de las ciudades. Especial atención se presta al papel del ferrocarril como agente transformador del territorio urbano, tanto por sus ventajas en términos de eficiencia y conectividad como por los desafíos que plantea en términos de fragmentación espacial y barreras físicas.

A continuación, se procede a la definición del concepto de “Área Urbana Consolidada”, que delimita el ámbito específico del estudio. Esta definición no solo aporta claridad metodológica, sino que permite acotar las condiciones bajo las cuales debe operar cualquier solución de integración ferroviaria: densidad edificatoria, usos del suelo consolidados, infraestructuras existentes y complejidad funcional acumulada.

Una vez caracterizado este entorno urbano, se realiza un análisis de fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas (FODA) de estas áreas consolidadas, con el objetivo de identificar los principales factores que condicionan la viabilidad, el impacto y la aceptabilidad social de las intervenciones. Esta herramienta permite establecer un diagnóstico estratégico desde el cual enfocar las posibles soluciones de forma realista y contextualizada.

Seguidamente, se presenta una reflexión conceptual sobre el término “integración”, entendido no como una mera operación física o funcional, sino como un proceso que requiere compatibilizar infraestructuras con ciudad, tecnología con habitabilidad, y eficiencia operativa con calidad de vida urbana. Este concepto será clave en el diseño del enfoque metodológico posterior.

Para profundizar en las decisiones operativas asociadas a los proyectos ferroviarios, se incluye una clasificación y análisis de las dos tipologías principales de estaciones urbanas: estaciones pasantes y estaciones de fondo de saco (o terminales). La elección entre una u otra tiene profundas implicaciones técnicas, urbanísticas y sociales, y condiciona tanto el diseño de la infraestructura como su impacto sobre el tejido urbano circundante

Con esta base, se revisan los principales estudios y referencias académicas sobre la integración del ferrocarril en las ciudades, identificando los enfoques más influyentes, las tendencias metodológicas emergentes y los aprendizajes derivados de experiencias previas en diversos contextos internacionales. Esta revisión crítica proporciona el marco teórico que sustenta la originalidad del presente trabajo y permite situar sus aportaciones dentro del debate técnico y científico actual.

A continuación, se introduce el concepto de Desarrollo Orientado al Transporte (DOT), uno de los enfoques más consolidados en la planificación urbana contemporánea. Este modelo promueve la concentración de usos mixtos en torno a nodos de transporte, favoreciendo una integración funcional y sostenible entre el sistema ferroviario y el desarrollo urbano.

En paralelo, se analiza la figura de las Zonas de Actividades Concertadas (ZAC), una herramienta de gestión urbana aplicada especialmente en Francia, que ha demostrado gran eficacia en la reconversión de áreas ferroviarias y en la planificación de nuevas centralidades urbanas articuladas por el transporte público.

Finalmente, se presenta una revisión de las soluciones técnicas más comúnmente implementadas para la integración del ferrocarril en el entorno urbano —como el soterramiento de vías, la elevación mediante viaductos o la creación de corredores verdes—, así como una síntesis del uso del análisis multicriterio como herramienta de evaluación y apoyo a la toma de decisiones en este tipo de proyectos. Esta última sección enlaza directamente con la metodología propuesta en este trabajo, que apuesta por una visión ampliada, participativa y adaptativa del análisis multicriterio aplicado a la integración ferroviaria.



Con todo ello, este apartado no solo contextualiza la problemática abordada, sino que sienta las bases para el desarrollo del marco analítico y propositivo que se expone en los siguientes capítulos. La combinación de historia, teoría, normativa, tipología y metodología permite construir una mirada holística, fundamental para enfrentar con rigor y sensibilidad un reto tan complejo como es la integración del ferrocarril en nuestras ciudades.

#### **4.1. La ciudad y su relación histórica con el transporte**

Históricamente, las estaciones de ferrocarril se ubicaban en las afueras de las ciudades. Con el tiempo y motivado por el crecimiento urbano, estas estaciones quedaron rodeadas por el entramado urbano, transformándose en muchos casos en barreras físicas que fragmentan la ciudad. Si bien, en la mayoría de los casos las estaciones han quedado plenamente integradas en el entramado urbano y han beneficiado el desarrollo económico y ayudado a la movilidad al ofrecer el tren un servicio puerta a puerta, en otros casos, han resultado ser un obstáculo que ha supuesto retos importantes para la planificación urbanística y ha afectado negativamente a la permeabilidad de las ciudades.

Fruto de este desarrollo histórico, hoy en día, la gran mayoría de las estaciones ferroviarias de las principales ciudades del mundo se encuentran situadas en el centro o casco histórico de las mismas, lo que representa una ventaja estratégica para el ferrocarril debido a su accesibilidad y conexión con otras áreas urbanas. Sin embargo, también pueden ocasionar impactos menos positivos como se ha comentado, afectando a la vida diaria de las ciudades, por diferentes motivos tales como el ruido y el impacto visual debido a la necesidad de espacio para la playa de vías requerida.

El concepto de ciudad ha evolucionado a lo largo de la historia, y su desarrollo ha estado intrínsecamente ligado al transporte, especialmente al ferrocarril. Desde las primeras civilizaciones, la necesidad de mover personas y bienes de manera eficiente ha sido un factor determinante en la configuración y expansión de las ciudades.

En la antigüedad, ciudades como Ur y Uruk en Mesopotamia, que surgieron alrededor del 3500 a.C., se desarrollaron como centros de comercio y administración. Estas ciudades dependían de sistemas de transporte rudimentarios, como carros tirados por animales y barcos, para facilitar el intercambio de bienes y servicios. La ubicación de las ciudades a lo largo de rutas comerciales y vías fluviales subraya la importancia del transporte en su desarrollo inicial.

Con el tiempo, la relación entre la ciudad y el transporte se volvió más compleja. Durante la Revolución Industrial en el siglo XIX, la introducción de los ferrocarriles transformó radicalmente las ciudades. Los ferrocarriles permitieron el transporte masivo de personas y mercancías a largas distancias, lo que facilitó la expansión urbana y el crecimiento económico. Ciudades como Londres y Nueva York experimentaron un crecimiento acelerado gracias a la conectividad ferroviaria, que permitió la creación de suburbios y la expansión de las áreas metropolitanas.

Muchos autores han desarrollado en sus obras la importancia del transporte en el desarrollo histórico de las ciudades. Por ejemplo, en "La venganza de la geografía" de Robert D. Kaplan, el concepto de ciudad está estrechamente ligado al transporte y su importancia se destaca en varios aspectos. Kaplan argumenta que las ciudades han sido históricamente centros de poder y comercio debido a su ubicación estratégica y la accesibilidad que ofrecen. El transporte, tanto terrestre como marítimo, ha sido crucial para el desarrollo y la prosperidad de las ciudades. Las rutas comerciales y las infraestructuras de transporte permiten la movilidad de bienes, personas e ideas, lo que a su vez fomenta el crecimiento económico y cultural. Kaplan también enfatiza que la geografía y las características físicas de una región influyen en la capacidad de una ciudad para convertirse en un centro de influencia.

El ferrocarril no solo facilitó el movimiento de personas y bienes, sino que también influyó en la morfología urbana. Las estaciones de tren se convirtieron en puntos clave de actividad económica y social, generando un crecimiento urbano a su alrededor. Esto llevó a la formación de nuevos barrios residenciales, comerciales e industriales, y a la creación de una red de transporte interno que conectaba diferentes partes de la ciudad.

Muchos autores subrayan en sus obras cómo el ferrocarril ha sido fundamental para la movilidad de recursos, la integración de mercados y el crecimiento económico en diversas regiones. Javier Asín Samper en su trabajo "El ferrocarril y el estado en España (1855-1865)", explora cómo el desarrollo del ferrocarril en España fue crucial para la creación de un mercado interno mejor conectado e integrado. Mario Cerutti en su obra "Ferrocarriles y actividad productiva en el norte de México, 1880-1910", examinó cómo el ferrocarril impulsó la actividad económica en el norte de México y Cesárea Aramayo en "Ferrocarriles bolivianos" destacó la importancia del ferrocarril en el desarrollo de Bolivia.

A nivel internacional, varios autores y obras han destacado la importancia del ferrocarril en el desarrollo económico y social. Entre los más relevantes destaca Wolfgang Schivelbusch y su libro "The Railway Journey: The Industrialization of Time and Space in the 19th Century", donde analiza cómo el ferrocarril transformó la percepción del tiempo y el espacio, y su impacto en la industrialización y la modernización de las sociedades.

Christian Wolmar, autor de varias obras sobre la historia del ferrocarril, incluyendo "Railways and the Raj: How the Age of Steam Transformed India". Wolmar explora cómo el ferrocarril fue crucial para la colonización y el desarrollo económico de la India bajo el dominio británico. Ian Thomson en su estudio "Los ferrocarriles y su contribución al comercio internacional" donde examina la integración ferroviaria en el Cono Sur y su impacto en el comercio internacional, destacando la importancia del ferrocarril en la conectividad y el desarrollo económico de la región. Finalmente, Wichard White en su obra "Railroaded: The Transcontinentals and the Making of Modern America", que ofrece una crítica detallada de cómo los ferrocarriles transcontinentales moldearon la economía y la política de Estados Unidos en el siglo XIX.

En el siglo XX, la aparición del automóvil y la construcción de carreteras y autopistas cambiaron nuevamente la dinámica urbana. Sin embargo, el ferrocarril siguió siendo un componente crucial del transporte urbano, especialmente en ciudades europeas y asiáticas donde los sistemas de trenes suburbanos y metropolitanos se integraron profundamente en la vida diaria de los ciudadanos. Horacio Capel en su obra "Los ferrocarriles en la ciudad: Redes técnicas y configuración del espacio urbano" pone de manifiesto cómo, a pesar de la revolución del automóvil y la construcción de carreteras y autopistas en el siglo XX, el ferrocarril continuó siendo esencial para el transporte urbano, especialmente en ciudades europeas y asiáticas. Los sistemas de trenes suburbanos y metropolitanos se integraron profundamente en la vida diaria de los ciudadanos, manteniendo su relevancia en la configuración del espacio urbano.

Hoy en día, la relación entre la ciudad y el ferrocarril sigue siendo fundamental. Las ciudades modernas enfrentan el desafío de crear sistemas de transporte sostenibles y eficientes que puedan soportar el crecimiento urbano y mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

Existen muchos estudios recientes que han abordado la relación entre la ciudad y el ferrocarril en el contexto de sistemas de transporte sostenibles y eficientes. Cabe citar "Infraestructura ferroviaria y ciudad: su cambiante correspondencia espacial desde los paradigmas de la ciencia, la historiografía urbana y el urbanismo" de María Alejandra Saus. Este estudio analiza cómo la infraestructura ferroviaria y la ciudad han evolucionado conjuntamente, destacando la importancia de integrar sistemas de transporte sostenibles en el desarrollo urbano.

Por otro lado, en el trabajo de Guillermo Guajardo Soto y Carlos Sottorff Neculhueque titulado "Ferrocarril y ciudad: una historia de relaciones entre la esfera económica y el espacio urbano" reflexiona sobre la persistencia de las infraestructuras ferroviarias en las ciudades modernas y su papel en la configuración del espacio urbano y la economía.

Recientemente, cabe citar el estudio "La integración del ferrocarril en las ciudades" de Fernando Ruiz Ruiz de Gopegui publicado en la Revista de Obras Públicas en 2021, que aborda cómo la relación entre el ferrocarril y la ciudad ha evolucionado, destacando la importancia de las estaciones ferroviarias en el crecimiento urbano y la necesidad de sistemas de transporte eficientes.

En resumen, la evolución histórica de la ciudad ha estado estrechamente vinculada al desarrollo de los sistemas de transporte, especialmente al ferrocarril, que ha influido de manera decisiva en la morfología urbana, el crecimiento económico y la conectividad territorial. Si bien su implantación ha representado ventajas estratégicas en términos de accesibilidad y dinamización urbana, también ha generado desafíos significativos relacionados con la fragmentación del tejido urbano, el impacto ambiental y la planificación territorial. La literatura especializada pone de manifiesto la importancia de integrar el ferrocarril en las ciudades de forma armónica, considerando tanto su potencial como sus implicaciones sociales, económicas y espaciales.

#### **4.2. Área Urbana Consolidada**

Definir con precisión el concepto de área urbana supone un desafío metodológico, debido a la coexistencia de múltiples enfoques teóricos y criterios técnicos adoptados por distintas disciplinas. Geografía, urbanismo, sociología y economía abordan la noción de lo urbano a partir de dimensiones variadas como la densidad de población, la morfología del espacio, los patrones de uso del suelo, la dotación de infraestructuras, la accesibilidad a servicios públicos y la centralidad funcional. A esta diversidad se suma una notable variabilidad geográfica: lo que en un contexto determinado es considerado área urbana puede no serlo en otro, en función de diferencias estructurales, demográficas, normativas o culturales.

Las instituciones internacionales han intentado establecer criterios comunes para facilitar la comparación entre territorios. Por ejemplo, Eurostat, en colaboración con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), ha desarrollado el concepto de Functional Urban Areas (FUA), que se basa en la identificación de núcleos urbanos (urban centres) con una densidad superior a 1.500 habitantes por kilómetro cuadrado y al menos 50.000 habitantes en total, junto con sus zonas de influencia funcional, definidas a partir de los flujos

de movilidad cotidiana (commuting zones). Asimismo, ONU-Hábitat, en su marco conceptual para los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), define un área urbana como aquella que cumple ciertos umbrales en términos de tamaño poblacional, continuidad física del tejido urbano y presencia de infraestructura y servicios básicos.

En el caso de España, el Instituto Nacional de Estadística (INE) considera áreas urbanas funcionales aquellas aglomeraciones de más de 50.000 habitantes con una estructura socioeconómica articulada y una fuerte cohesión territorial, particularmente a través del transporte y la movilidad.

A pesar de estas tentativas de estandarización, subsisten importantes divergencias en las definiciones administrativas, que reflejan los marcos políticos, históricos y técnicos de cada país. Además, las percepciones sociales juegan un papel clave: la manera en que los ciudadanos identifican su entorno como "urbano" puede diferir significativamente de los criterios técnicos o jurídicos, introduciendo un componente subjetivo que también debe ser considerado.

En este contexto, autores como Henri Lefebvre han contribuido de forma decisiva al debate conceptual sobre lo urbano. En su libro titulado "La revolución urbana" (1970), Lefebvre sostiene que la ciudad debe entenderse no solo como un espacio físico o geográfico, sino como una construcción social, producto de relaciones de poder, prácticas cotidianas y transformaciones históricas. Según su visión, el espacio urbano se configura por las dinámicas sociales que lo habitan y lo producen, más allá de su morfología o funcionalidad.

Para los fines del presente Trabajo Fin de Máster, se adopta una definición operativa del concepto de área urbana consolidada, entendida como aquella porción del territorio dentro del perímetro urbano que ha alcanzado un alto grado de desarrollo físico, funcional y organizativo.

Estas áreas se distinguen por contar con una infraestructura robusta y madura, que incluye redes viarias jerarquizadas, una alta densidad edificatoria con predominio de usos urbanos (residencial, terciario, industrial o institucional), y una provisión completa de servicios públicos básicos como el abastecimiento de agua potable, saneamiento, electricidad, telecomunicaciones y gestión de residuos.

Asimismo, un área urbana consolidada se caracteriza por la existencia de una red de transporte público eficiente, integrada y multimodal, así como por la presencia de equipamientos urbanos (educativos, sanitarios, culturales, deportivos) y espacios públicos de calidad que favorecen la cohesión social y el bienestar.

Estos entornos suelen presentar densidades poblacionales elevadas —frecuentemente superiores a los 50.000 habitantes, como establecen los umbrales de diversas agencias internacionales— y una notable intensidad en la actividad económica, lo que los convierte en escenarios clave para la planificación urbana y la implementación de proyectos de infraestructura complejos, como la integración del sistema ferroviario.

En términos espaciales y morfológicos, estas áreas reflejan una ocupación intensiva del suelo, una clara delimitación de los usos del espacio y una estructura funcional consolidada, producto de procesos históricos de urbanización sostenidos en el tiempo. No obstante, esta consolidación también impone limitaciones significativas, especialmente en lo que respecta a la introducción de nuevas infraestructuras o la adaptación de las existentes, lo que demanda estrategias de intervención urbana sensibles, sostenibles e integradoras.

#### **4.3. Fortalezas, Debilidades, Oportunidades y Amenazas en las Áreas Urbanas Consolidadas**

A la hora de analizar el entorno urbano consolidado para poder definir las alternativas de integración más adecuadas, resulta fundamental realizar un diagnóstico exhaustivo que abarque las características urbanísticas, sociales, económicas y ambientales de la zona objeto de estudio. Este diagnóstico permite identificar las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas (análisis FODA) que afectan a estas áreas urbanas.

Diversos trabajos publicados han tratado esta temática y han sido utilizados como referencia para la integración de infraestructuras en entornos urbanos. Entre ellos destaca el estudio académico titulado *“El análisis DAFO como herramienta estratégica de la Planificación Urbana”*, presentado en una conferencia internacional en Málaga en 2014. Este estudio sostiene que el análisis DAFO representa una herramienta valiosa para la planificación estratégica de las ciudades. Su principal aportación radica en su capacidad para organizar de manera sistemática los factores internos y externos que influyen en el desarrollo urbano, lo que facilita la toma de decisiones fundamentadas.

Los autores destacan que esta metodología es aplicable a distintas escalas territoriales, desde barrios hasta ciudades completas, y que su simplicidad favorece la participación de diversos actores, como técnicos, responsables políticos y ciudadanos. Esta cualidad la convierte en un instrumento útil para generar consensos y orientar las prioridades de intervención.

El estudio también subraya que el DAFO debe integrarse con otras herramientas de análisis estratégico, como el análisis PEST o las 5 Fuerzas de Porter, para obtener una visión más completa del entorno urbano. Además, se recomienda su uso en las etapas iniciales del planeamiento, promoviendo la participación ciudadana en su elaboración, actualizándolo periódicamente para adaptarse a los cambios del contexto, y utilizándolo como base para definir estrategias que potencien las fortalezas y oportunidades, al tiempo que se minimizan las debilidades y amenazas.

Por su parte, la Agenda Urbana Española – Ficha N°2: Análisis DAFO que forma parte de los recursos de la Agenda Urbana Española, también presenta un análisis DAFO aplicado a territorios urbanos, incluyendo aspectos como la movilidad, la sostenibilidad y la integración territorial. Se mencionan explícitamente las infraestructuras como elementos condicionantes del desarrollo urbano, lo cual es relevante para estudios sobre la integración del ferrocarril.

El documento concluye que muchos municipios presentan debilidades estructurales, como una configuración urbana poco eficiente, carencias en infraestructuras y servicios, y dificultades para adaptar sus instrumentos de planificación a los nuevos desafíos. Asimismo, identifica amenazas como la expansión urbana desordenada, la despoblación en áreas rurales, la degradación del entorno natural y cultural, y la rigidez normativa.

Frente a este panorama, se reconocen fortalezas como la experiencia acumulada en planificación territorial, la riqueza del patrimonio natural y agrícola, y la existencia de redes de transporte que favorecen la conectividad. También se destacan oportunidades relevantes, como la posibilidad de regenerar espacios urbanos degradados, mejorar la cohesión entre lo urbano y lo rural, y avanzar hacia modelos de desarrollo más sostenibles e inclusivos.

Entre las recomendaciones, se propone utilizar el análisis DAFO como punto de partida para la elaboración de estrategias locales, asegurando que el proceso sea participativo y adaptado a las particularidades de cada territorio. Se sugiere además complementar esta herramienta con otros métodos de análisis, actualizarla de forma periódica y emplear sus resultados para definir líneas de actuación que refuercen los aspectos positivos y mitiguen los negativos.

Por tanto, el análisis DAFO se presenta como una herramienta flexible, participativa y eficaz para abordar los retos de la planificación urbana contemporánea, especialmente en contextos que buscan avanzar hacia modelos de desarrollo más sostenibles y cohesionados.

Entre las fortalezas, destaca la presencia de una infraestructura urbana bien desarrollada, que incluye redes de transporte, servicios públicos y espacios comunitarios. Esta base sólida facilita la integración de nuevas infraestructuras ferroviarias. Además, la alta conectividad entre diferentes zonas de la ciudad mejora la movilidad y el acceso a servicios esenciales, lo que contribuye a una mejor calidad de vida para los residentes. La diversidad económica de la ciudad, con múltiples sectores productivos, puede absorber y potenciar los beneficios de la integración ferroviaria, fomentando el crecimiento económico. Por último, las comunidades bien establecidas y cohesionadas pueden facilitar la aceptación y el apoyo a nuevos proyectos de infraestructura, promoviendo la participación ciudadana en el proceso de planificación.

Sin embargo, también existen debilidades que deben ser consideradas. La falta de espacio disponible en áreas urbanas consolidadas puede dificultar la implementación de nuevas infraestructuras ferroviarias, requiriendo soluciones creativas y adaptativas. La presencia de infraestructuras antiguas y en deterioro representa un desafío adicional, aumentando los costos y la complejidad de los proyectos de integración.

Las disparidades socioeconómicas dentro de la ciudad pueden generar resistencia a los cambios y dificultar la distribución equitativa de los beneficios de la nueva infraestructura. Además, la densidad urbana puede exacerbar los impactos ambientales negativos, como la contaminación del aire y el ruido, asociados a la construcción y operación de infraestructuras ferroviarias.

En cuanto a las oportunidades, la adopción de tecnologías avanzadas y sostenibles puede mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental de las infraestructuras ferroviarias, ofreciendo soluciones innovadoras para la integración urbana. La integración de infraestructuras ferroviarias puede actuar como catalizador para la revitalización de áreas degradadas, atrayendo inversiones y mejorando la calidad de vida de los residentes. Las políticas y programas gubernamentales enfocados en la sostenibilidad urbana pueden proporcionar apoyo financiero y regulatorio para proyectos de integración ferroviaria. Además, la creciente tendencia hacia la participación ciudadana en la planificación urbana puede facilitar la aceptación y el éxito de los proyectos de infraestructura, asegurando que se alineen con las necesidades y expectativas de la comunidad.

Por último, es importante considerar las amenazas que pueden surgir. La oposición de grupos de interés y residentes a los cambios en el entorno urbano puede retrasar o impedir la implementación de proyectos de infraestructura ferroviaria.



Los altos costes asociados a la construcción y mantenimiento de infraestructuras ferroviarias pueden representar un obstáculo significativo, especialmente en contextos de restricciones presupuestarias. La construcción de nuevas infraestructuras puede causar interrupciones temporales en el tráfico y la movilidad urbana, afectando negativamente a los residentes y negocios locales. Además, los proyectos de infraestructura pueden enfrentar desafíos relacionados con la gestión de riesgos ambientales, como la contaminación y la pérdida de espacios verdes, que pueden generar oposición y complicaciones legales.

La siguiente tabla presenta de forma resumida, los factores internos (Fortalezas y Debilidades) y externos (Oportunidades y Amenazas) que afectan a las áreas urbanas consolidadas en procesos de integración de infraestructuras ferroviarias tomando como referencia lo indicado por la Agenda Urbana Española, Ficha N°2 – Análisis DAFO:

FORTALEZAS	DEBILIDADES
Infraestructura urbana consolidada: redes de transporte, servicios públicos, espacios comunes.	Escasez de espacio físico disponible para nuevas infraestructuras.
Alta conectividad urbana, favoreciendo la movilidad y el acceso a servicios.	Infraestructuras existentes envejecidas o deterioradas que dificultan la adaptación.
Diversificación económica que permite absorber impactos y generar beneficios.	Desigualdades socioeconómicas internas que pueden limitar una distribución equitativa de beneficios.
Comunidades cohesionadas que pueden facilitar la participación y aceptación social.	Alta densidad urbana que intensifica los impactos ambientales (ruido, contaminación, etc.).
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
Uso de tecnologías sostenibles e innovadoras en las infraestructuras ferroviarias.	Oposición social o de grupos de interés ante cambios en el entorno urbano.
Revitalización de zonas urbanas degradadas a través de la integración ferroviaria.	Elevados costes económicos de construcción y mantenimiento.
Acceso a financiación y apoyo institucional por políticas públicas orientadas a la sostenibilidad.	Disrupciones temporales en movilidad y actividad urbana durante la ejecución de obras.
Mayor participación ciudadana en el planeamiento urbano, legitimando los proyectos.	Riesgos ambientales: pérdida de espacios verdes, contaminación, litigios legales.

Figura 1. Análisis DAFO entornos urbanos consolidados. Fuente: Elaboración propia

#### 4.4. Concepto de Integración Urbana

La integración de infraestructuras en un entorno urbano consolidado hace referencia al proceso de diseñar y desarrollar proyectos que se adapten y complementen el paisaje urbano existente. Este proceso requiere una planificación detallada y la consideración de diversos factores esenciales para garantizar que la infraestructura no solo cumpla su propósito, sino que también mejore la calidad de vida de los habitantes y se integre tanto visual como funcionalmente con su entorno.

Este proceso es complejo y demanda una planificación exhaustiva, así como la evaluación de múltiples aspectos para asegurar que la infraestructura no solo sea funcional, sino que también contribuya positivamente al bienestar de los residentes y se fusione de manera armoniosa con el entorno urbano.

Un estudio relevante que aborda la integración de infraestructuras en entornos urbanos consolidados es "*Análisis de entornos urbanos consolidados bajo los planteamientos de ciudades humanas*" de Alfonso Garfias. Este trabajo analiza cómo la planificación y el diseño de infraestructuras deben adaptarse y complementar el paisaje urbano existente, considerando factores esenciales para mejorar la calidad de vida de los habitantes y asegurar una integración visual y funcional armoniosa. Garfias destaca la importancia de la habitabilidad urbana y cómo esta se extiende más allá de los edificios y el espacio público, argumentando que el barrio o vecindario es fundamental para la vida comunitaria, donde los residentes desarrollan un sentido de pertenencia y una identidad propia. El estudio también propone una metodología para identificar elementos de análisis y diagnóstico en los espacios urbanos, con el objetivo de desarrollar estrategias de intervención que humanicen los espacios públicos, barrios y ciudades.

Este enfoque busca mejorar la calidad de vida de los habitantes y asegurar que las infraestructuras se integren de manera armoniosa tanto visual como funcionalmente con el entorno urbano.

El trabajo de Eduard J. Alvarez-Palau "*Ferrocarril y sistema de ciudades. Integración e impacto de las redes ferroviarias en el contexto urbano europeo*" aborda cómo las redes ferroviarias han influido en el desarrollo urbano y territorial en Europa, destacando la interacción entre la infraestructura de transporte y la morfología urbana. En palabras de Alvarez-Palau:

*"Red ferroviaria y sistema de ciudades han estado en constante interacción durante casi dos siglos. El papel que ha tenido la infraestructura de transporte sobre el desarrollo urbano y territorial durante este período es difícilmente cuestionable. El ferrocarril fue proyectado sobre un territorio antropizado y sujeto a fuertes condicionantes geográficos, lo que dificultó su encaje espacial. Las ciudades se vieron obligadas a alterar sus dinámicas de crecimiento para integrar la nueva infraestructura. La morfología urbana, la planificación territorial, el sistema socio-económico o las lógicas de transporte regional fueron algunos de los aspectos que se vieron más condicionados por este proceso".*

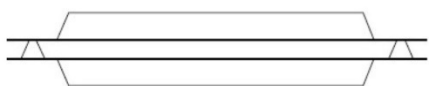
Por su parte, Horacio Capel en su obra "Los ferrocarriles en la ciudad: Redes técnicas y configuración del espacio urbano" examina la evolución histórica de las innovaciones en el transporte ferroviario urbano y cómo estas han transformado las ciudades, subrayando la importancia de reforzar el transporte público en la ciudad moderna. Horacio Capel señala que:

*"Los ferrocarriles transformaron la comunicación en las ciudades, las volvieron más eficaces y les permitió interactuar con áreas lejanas, integrando territorios".*

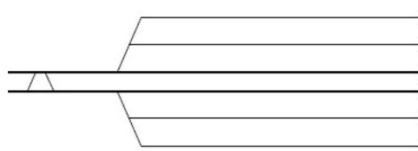
#### 4.5. Estaciones pasantes y estaciones de fondo de saco o terminales

A pesar de los múltiples esfuerzos realizados en distintas ciudades para modernizar y adaptar sus infraestructuras ferroviarias, no se ha identificado un patrón uniforme en las intervenciones urbanas. Esto se debe a que cada ciudad enfrenta desafíos específicos, derivados de su morfología urbana, su red de transporte existente, su densidad poblacional y sus prioridades estratégicas. Por tanto, las soluciones adoptadas deben ser personalizadas y adaptadas al contexto local.

En este contexto, es fundamental definir las dos tipologías más habituales de estaciones ferroviarias en entornos urbanos, ya que la elección entre una u otra influye directamente en la planificación del transporte, la movilidad urbana y la integración territorial:



Esquema tipo estaciones pasantes



Esquema tipo estaciones de fondo de saco o terminales

Es importante señalar que la tipología de las estaciones no solo responde a criterios técnicos, sino también a decisiones históricas y urbanísticas que han influido en la configuración del territorio y en la forma en que las ciudades se han conectado a través del ferrocarril.

Las principales diferencias entre estaciones pasantes y estaciones de fondo de saco radican en su ubicación y diseño, el flujo de tráfico ferroviario que permiten, y su uso funcional dentro de la red ferroviaria.

#### 4.5.1. Estaciones pasantes

Las estaciones pasantes están situadas en medio de una línea ferroviaria, lo que permite que los trenes entren por un extremo y salgan por el otro sin necesidad de invertir la marcha. Este diseño facilita un flujo continuo y eficiente del tráfico ferroviario, lo que las hace ideales para rutas de alta frecuencia y redes de transporte urbano o de alta velocidad, donde la rapidez y la conectividad son esenciales.

Las principales ventajas que ofrece esta tipología son:

- Mejor integración en redes de alta velocidad y cercanías
- Mayor eficiencia operativa
- Mejor integración en redes de alta velocidad y cercanías

Un ejemplo destacado es el proyecto de conexión pasante entre las estaciones de Madrid-Puerta de Atocha y Chamartín.



Figura 2. Proyecto Atocha. Estación Pasante. Fuente: Adif

Tradicionalmente, ambas estaciones funcionaban como terminales, pero con la construcción de un túnel subterráneo de 7,3 km en ancho internacional, se está transformando Atocha en una estación pasante. Esta obra permitirá que los trenes de alta velocidad que vienen del sur

(Andalucía) y del este (Levante) puedan continuar hacia el norte y noroeste sin necesidad de trasbordos.

Esta transformación representa un avance estratégico para la red ferroviaria española, al mejorar la conectividad transversal y reducir los tiempos de viaje.

Otro caso es el de la futura nueva estación de Valencia Parque Central, que reemplazará el actual diseño en fondo de saco por una configuración pasante. Esta estación se convertirá en un nodo clave del Corredor Mediterráneo, facilitando el paso fluido de trenes de cercanías, media y larga distancia.

#### 4.5.2. Estaciones de fondo de saco

Por otro lado, las estaciones de fondo de saco (también llamadas estaciones terminales) se encuentran al final de una línea ferroviaria. En este tipo de estaciones, los trenes deben entrar y salir por la misma dirección, lo que puede requerir maniobras adicionales para cambiar de sentido, especialmente si el tren debe continuar su recorrido en otra dirección. Este diseño es común en estaciones principales de grandes ciudades, donde los trenes inician o terminan su trayecto.

Entre las principales ventajas que ofrecen destaca:

- Mayor capacidad de estacionamiento de trenes.
- Facilita el control de operaciones en líneas de inicio/fin de trayecto.
- Ubicación céntrica que favorece el acceso peatonal.

Un ejemplo actual es la estación de Almería, que está siendo renovada para acoger trenes de alta velocidad. Esta estación mantendrá su configuración de fondo de saco, lo que implica que los trenes que lleguen deberán invertir la marcha para continuar hacia destinos como Murcia o Granada. Aunque esto puede parecer una desventaja operativa, también tiene beneficios: al estar ubicada en el centro urbano, facilita el acceso de los pasajeros y puede convertirse en un punto estratégico del Corredor Mediterráneo, atrayendo más servicios y viajeros.

#### 4.6. Principales estudios sobre la integración del ferrocarril en las ciudades

Los primeros estudios sobre la integración de los ferrocarriles en las ciudades comenzaron a surgir a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. Estos estudios se centraron en cómo las infraestructuras ferroviarias impactaban el desarrollo urbano y la organización de las ciudades. Un ejemplo temprano es la obra de Ildefonso Cerdá, quien en su "Teoría General de la Urbanización" (1867) ya reconocía la importancia de los caminos y las redes de transporte en la configuración urbana. En palabras de Ildefonso Cerdá:

*"El ferrocarril, como medio de comunicación moderno, no debe ser considerado un simple instrumento de transporte, sino un elemento estructurador del territorio urbano. Su trazado no puede imponerse a la ciudad como un cuerpo extraño, sino que debe integrarse armónicamente en su tejido, facilitando tanto la movilidad como el desarrollo equilibrado de todas sus partes".*

Estas ideas se plasmaron en su Plan del Ensanche de Barcelona, donde propuso una red ortogonal de calles amplias y una distribución racional de los servicios, anticipando la necesidad de infraestructuras ferroviarias integradas en el diseño urbano.

A lo largo del siglo XX, la planificación urbana y el urbanismo moderno continuaron explorando la relación entre el ferrocarril y la ciudad. Así, en la década de 1960, se realizaron estudios más sistemáticos y multidisciplinarios que abordaban no solo los aspectos técnicos y económicos, sino también los sociales y ambientales.

Cabe destacar la obra de Jane Jacobs titulada "The Death and Life of Great American Cities" (1961). Jacobs criticó duramente la planificación urbana tecnocrática de mediados del siglo XX, incluyendo la forma en que las grandes infraestructuras (como autopistas y ferrocarriles) fragmentaban comunidades urbanas. Su enfoque humanista y su defensa del tejido urbano diverso y conectado influyeron en posteriores enfoques de integración ferroviaria más sensibles al entorno social. Jane Jacobs introdujo el concepto de "border vacuums", es decir, espacios urbanos que, por su diseño o función, interrumpen la continuidad del tejido urbano y generan zonas de baja vitalidad social y económica. Jacobs argumenta que estas infraestructuras, si no se integran adecuadamente, pueden fragmentar comunidades, dificultar la movilidad peatonal y debilitar la vida urbana.

Su enfoque fue revolucionario porque desplazó el foco del urbanismo tecnocrático hacia una visión más humana y vivencial de la ciudad, donde la diversidad de usos, la escala peatonal y la interacción social son fundamentales.

Por su parte, la obra de Kevin Lynch “The Image of the City” (1960), aunque no se centra exclusivamente en el ferrocarril, resulta fundamental para entender cómo las infraestructuras, incluidas las ferroviarias, afectan la percepción y legibilidad del espacio urbano. Lynch introdujo conceptos como “*nodos*” y “*bordes*”, que son clave para analizar el impacto de estaciones y trazados ferroviarios en la estructura mental de la ciudad.

Además, Lynch introduce uno de los cinco elementos fundamentales en la construcción de la imagen mental de la ciudad: los “*paths*” (caminos). En su análisis, los ferrocarriles y otras infraestructuras lineales no son solo medios de transporte, sino estructuras cognitivas que organizan la experiencia urbana. Son ejes de orientación, de memoria y de significado. Lynch también advierte que cuando estas infraestructuras se convierten en “*edges*” (bordes) demasiado dominantes o inaccesibles, pueden actuar como barreras físicas y psicológicas, fragmentando la ciudad y dificultando su legibilidad.

En las últimas décadas, la integración del ferrocarril en entornos urbanos ha sido objeto de numerosos estudios y proyectos innovadores en todo el mundo, reflejando una creciente preocupación por la sostenibilidad y la calidad de vida urbana.

Luis Santos y Ganges en su obra titulada “Urbanismo y ferrocarril. La construcción del espacio ferroviario en las ciudades medias españolas” (2011), resultado de una tesis doctoral, analiza cómo el ferrocarril ha influido en la configuración urbana de ciudades medias en España. Santos y Ganges destaca que, históricamente, ha existido una desconexión entre la lógica ferroviaria y la lógica urbanística, lo que ha generado conflictos espaciales y funcionales. El libro incluye estudios de caso y propone soluciones urbanísticas desarrolladas durante los dos últimos tercios del siglo XX. En palabras de Luis Santos y Ganges:

*“La lógica ferroviaria y la lógica urbanística se han dado la espalda en España ya desde el siglo XIX. La relación entre ferrocarril y ciudad se ha caracterizado por el escaso diálogo entre las disciplinas responsables, hasta llegar al tan habitual como impropio modo de contemplar el ferrocarril como un problema urbano”.*

En este fragmento, Luis Santos y Ganges pone de manifiesto la falta de coordinación que históricamente ha existido entre el desarrollo ferroviario y la planificación urbana, lo que acaba generando conflictos espaciales, funcionales y sociales en muchas ciudades. Santos y Ganges propone superar esta dicotomía mediante una visión integrada, que considere al ferrocarril no como un obstáculo, sino como una oportunidad estructurante del espacio urbano.



También destacan los trabajos de investigación llevados a cabo por María Alejandra Saus, quien en su artículo “Infraestructura ferroviaria y ciudad: su cambiante correspondencia espacial” publicado en 2013 en la Revista de Estudios Sociales, ofrece una lectura historiográfica y epistemológica de la relación entre ciudad y ferrocarril, desde el siglo XIX hasta el presente. Saus analiza cómo los paradigmas científicos y urbanísticos han influido en la forma de integrar (o segregar) las infraestructuras ferroviarias en el tejido urbano.

En particular, destaca el papel del neopositivismo funcionalista en los años 60, que promovía una visión técnica y sectorial del urbanismo, a menudo en detrimento de la cohesión social y ambiental.

En palabras de María Alejandra Saus:

*“Desde la amable articulación entre infraestructuras ferroviarias y espacios públicos decimonónicos, pasando por la controversial convivencia que el urbanismo advirtió entre ambos dominios, hasta la reciente integración urbana de infraestructuras obsoletas, se suscitaron una serie de ciclos históricos que evidencian una fluctuante interrelación. [...] Proponemos como interpretación que en la determinación de esas unidades [históricas] tuvieron incidencia los paradigmas de las ciencias sociales, los modelos historiográficos predominantes y las directrices urbanísticas hegemónicas que, al establecer discontinuidades en la producción de conocimiento disciplinar y en los modos de concebir lo urbano, propiciaron quiebres en la manera de abordar las relaciones espaciales entre infraestructura y ciudad.”*

Este fragmento destaca cómo la relación entre ciudad y ferrocarril ha sido históricamente inestable, influida por los paradigmas científicos y urbanísticos dominantes en cada época. Saus subraya que los cambios en la forma de pensar lo urbano —desde el positivismo técnico hasta enfoques más culturales y sociales— han generado rupturas epistemológicas que afectan directamente la manera en que se integran (o segregan) las infraestructuras ferroviarias en el tejido urbano.

Fernando Ruiz Ruiz de Gopegui en su artículo “La integración del ferrocarril en las ciudades” publicado en la Revista de Obras Públicas (n.º 3629, julio-agosto 2021), recoge las conclusiones de una jornada organizada por el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, donde se debatieron distintas estrategias para integrar el ferrocarril en el tejido urbano.

En este artículo destaca:

*“El acceso ferroviario se convierte en una barrera frecuentemente denostada por considerarse una cicatriz en el tejido urbano, que dificulta la comunicación entre barrios y origina áreas degradadas. [...] La solución, por tanto, no es única y es preciso tener en consideración circunstancias como la dificultad técnica del soterramiento, el valor de los terrenos liberados y la capacidad generadora de ‘ciudad’ que puede producir la estación, como polo de atracción para personas que no siempre viajan”.*

Este enfoque destaca la necesidad de soluciones adaptadas al contexto local, considerando no solo los costes y la viabilidad técnica, sino también el potencial urbano y social de las estaciones ferroviarias como nodos de centralidad.

#### 4.7. Desarrollo Orientado al Transporte (DOT)

La planificación urbana contemporánea se esfuerza por integrar el ferrocarril con el desarrollo urbano de manera coherente y eficiente. Un concepto clave en este contexto es el de Desarrollo Orientado al Transporte (DOT), también conocido por sus siglas en inglés como Transit-Oriented Development (TOD).

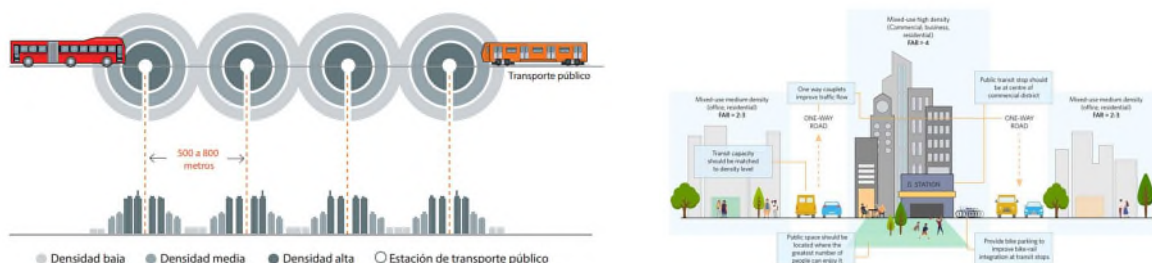


Figura 3. Representación esquemática de los DOTs. (Fuente: Energy Innovation).

Los gráficos muestran la lógica detrás de los DOTs. La densidad debe estar alineada con la capacidad del transporte, y las paradas de transporte público deben ubicarse en los lugares más convenientes para que el mayor número posible de personas pueda acceder a ellas. El índice de edificabilidad (FAR, por sus siglas en inglés) debe ser más alto cerca de las paradas de transporte con mayor capacidad

Este enfoque promueve la creación de comunidades compactas y accesibles, donde el transporte ferroviario y las infraestructuras peatonales y ciclistas están bien integrados. Este modelo no solo mejora la movilidad, sino que también fomenta la cohesión social y reduce el impacto ambiental.

El concepto de Desarrollo Orientado al Transporte (DOT) —conocido en inglés como Transit-Oriented Development (TOD)— surgió en los Estados Unidos a principios de la década de 1990 como una respuesta crítica al modelo de urbanización dispersa (*urban sprawl*) y a la creciente dependencia del automóvil privado.

Este enfoque fue popularizado por el urbanista y arquitecto Peter Calthorpe, quien es ampliamente reconocido como uno de sus principales impulsores. En su influyente libro “The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream” (1993), Calthorpe propuso el DOT como una estrategia integral para reconectar el desarrollo urbano con el transporte público, promoviendo comunidades más compactas, caminables, mixtas y sostenibles.

El DOT se basa en la idea de que el desarrollo urbano debe estar centrado en torno a nodos de transporte público, como estaciones de tren y paradas de autobús, para crear comunidades más sostenibles y habitables. Este enfoque busca maximizar el uso del transporte público y minimizar la necesidad de desplazamientos en automóvil, promoviendo así un desarrollo urbano más denso y eficiente. Las áreas alrededor de las estaciones de transporte se diseñan para ser accesibles a pie y en bicicleta, con una mezcla de usos residenciales, comerciales y de ocio que fomentan la actividad económica y social.

La implementación del DOT ha demostrado tener múltiples beneficios. Al concentrar viviendas, comercios y servicios cerca de los corredores y estaciones de transporte público, se reduce la congestión del tráfico y las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, se mejora la calidad de vida de los residentes al reducir los tiempos de desplazamiento y aumentar las oportunidades de interacción social. Las ciudades que han adoptado el DOT, como Portland en Oregón y Arlington en Virginia, han visto mejoras significativas en la sostenibilidad urbana y la cohesión comunitaria.

La integración del ferrocarril no solo tiene implicaciones técnicas, sino también sociales y económicas. La mejora de la conectividad puede revitalizar áreas degradadas y promover el desarrollo urbano. Además, la reubicación de estaciones puede generar nuevos polos de desarrollo y mejorar la calidad de vida de los residentes.

#### **4.8. Zonas de Actividades Concertadas (ZAC)**

Las Zonas de Actividades Concertadas (ZAC) son un instrumento de planificación urbana desarrollado en Francia a partir de la Ley Marco sobre la Propiedad de 1967. Su objetivo es facilitar el desarrollo o la transformación de sectores urbanos mediante una intervención coordinada entre el sector público y privado, especialmente en áreas con potencial de renovación o reconversión funcional (Corti, 2015).

Las ZAC permiten a las autoridades locales definir un perímetro de actuación dentro del cual se planifica y ejecuta un proyecto urbano integral, que puede incluir viviendas, equipamientos públicos, espacios verdes, actividades económicas y, de forma destacada, infraestructuras de transporte.

Este modelo de gestión urbana se ha consolidado como una herramienta eficaz para abordar operaciones complejas, como la integración del ferrocarril en entornos urbanos consolidados. En particular, las ZAC permiten transformar antiguos terrenos ferroviarios en nuevos espacios urbanos multifuncionales, aplicando principios de sostenibilidad, densificación controlada y movilidad intermodal.

Uno de los casos más emblemáticos es el de Paris Rive Gauche, una operación urbana de más de 130 hectáreas desarrollada sobre antiguos terrenos industriales y ferroviarios de la SNCF. Esta ZAC ha permitido reconectar barrios históricamente fragmentados, introducir nuevos usos urbanos y mejorar la calidad del espacio público, todo ello bajo una lógica de planificación concertada y control público del desarrollo (Garnier, 2006).

En el caso de Lyon, las ZAC han sido fundamentales para proyectos como la transformación del entorno de la estación Part-Dieu, donde se ha buscado no solo modernizar la infraestructura ferroviaria, sino también crear un nuevo centro urbano mixto, con oficinas, viviendas, espacios verdes y equipamientos públicos. También destaca la ZAC de la Guillotière, donde la reconfiguración del eje ferroviario se acompaña de una estrategia de regeneración urbana que incluye la creación de corredores verdes, la mejora de la conectividad peatonal y ciclista, y la integración de criterios de resiliencia climática.

Estas experiencias demuestran que las ZAC no solo son un instrumento técnico de ordenación del suelo, sino también una herramienta de gobernanza urbana que permite articular intereses diversos, garantizar la coherencia del proyecto urbano y asegurar su viabilidad social, económica y ambiental.

#### 4.9. Soluciones de integración comúnmente implementadas

La integración del ferrocarril en el entorno urbano es una cuestión compleja que ha sido abordada desde múltiples disciplinas —urbanismo, geografía, economía y sociología— y que ha dado lugar a diversas soluciones técnicas y estratégicas cada una con implicaciones urbanísticas, económicas y sociales distintas.

Concretamente,

- 1) Solución de soterramiento
- 2) Elevación de las vías (viaductos)
- 3) Creación de corredores verdes son las más destacadas

El soterramiento de las vías es, sin duda, una de las soluciones más demandadas por la ciudadanía, especialmente en ciudades donde el trazado ferroviario ha actuado históricamente como una barrera física y simbólica. Esta solución permite liberar suelo en superficie, eliminar pasos a nivel y reconectar barrios previamente fragmentados.

Un ejemplo paradigmático es el caso de Valladolid, ampliamente documentado en el *“Estudio Soterramiento del ferrocarril y transformaciones urbanísticas en Valladolid”* (Calderón, Sainz Guerra y García Cuesta, 2003), donde se analiza cómo esta operación puede convertirse en una oportunidad para redefinir la estructura urbana, aunque también se advierten riesgos como la especulación inmobiliaria y la dependencia de la financiación mediante plusvalías urbanísticas.

En esta misma línea, el artículo académico *“Del soterramiento deseado a la integración posible”* (Saus, 2023) ofrece una lectura crítica del proceso en Valladolid, destacando tanto las buenas prácticas como los errores de planificación y gestión. El texto subraya que el soterramiento, aunque deseable, no siempre es viable ni sostenible, y que deben considerarse otras alternativas más adaptadas al contexto local.

Una de esas alternativas es la elevación de las vías, que ha sido implementada con éxito en varias ciudades. Esta solución permite mantener la funcionalidad ferroviaria mientras se mejora la permeabilidad urbana, al liberar el espacio inferior para usos públicos o comerciales. No obstante, su impacto visual y acústico puede generar rechazo social si no se acompaña de un diseño arquitectónico y paisajístico de calidad.

Una referencia destacada que aborda la elevación de las vías ferroviarias y su impacto urbano es el libro *“Los ferrocarriles en la ciudad. Redes técnicas y configuración del espacio urbano”* de Horacio Capel (2011). Esta obra, publicada por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, ofrece un análisis profundo sobre cómo las infraestructuras ferroviarias han configurado históricamente el espacio urbano y cómo su transformación —incluyendo la elevación de las vías— ha influido en la morfología y funcionalidad de las ciudades.

Capel examina casos internacionales, incluyendo ciudades como Tokio y Chicago, donde la elevación de las vías ha sido una estrategia clave para mejorar la conectividad urbana sin interrumpir el tráfico ferroviario. El autor destaca que, si bien esta solución permite liberar el espacio inferior para usos públicos o comerciales, también puede generar impactos negativos si no se acompaña de un diseño arquitectónico y paisajístico adecuado. En particular, se señala el riesgo de crear espacios residuales o inseguros bajo los viaductos si no se planifican con criterios de integración urbana.

También María Alejandra Saus (2013) en su artículo académico *“Infraestructura ferroviaria y ciudad: su cambiante correspondencia espacial”* publicado en la Revista de Estudios Sociales, complementa esta visión al analizar cómo las infraestructuras ferroviarias elevadas han sido reinterpretadas en el urbanismo contemporáneo. Saus argumenta que estas estructuras, lejos de ser meros elementos técnicos, deben entenderse como componentes culturales y simbólicos del paisaje urbano, cuya integración depende de factores históricos, sociales y estéticos.

Finalmente, en algunos casos se ha optado por el desvío del trazado ferroviario fuera del núcleo urbano, especialmente en el caso de líneas de alta velocidad. Esta solución, aunque efectiva para liberar el centro de infraestructuras pesadas, puede generar nuevos desafíos en términos de accesibilidad y pérdida de centralidad de las estaciones.

Una referencia clave sobre el impacto urbano del desvío del trazado ferroviario fuera del núcleo urbano, especialmente en el contexto de líneas de alta velocidad, es el estudio *“Logroño 1901–1958: la desviación del ferrocarril y su papel en la estructura urbana”*, disponible en Academia.edu. Este trabajo analiza cómo el traslado del trazado ferroviario fuera del centro de Logroño transformó profundamente la estructura urbana, liberando suelo para nuevos desarrollos y eliminando una barrera física histórica. Sin embargo, también se documentan los efectos secundarios, como la pérdida de centralidad de la estación y la necesidad de reconfigurar los sistemas de movilidad urbana para mantener la accesibilidad.

Otra fuente relevante es el documento técnico “*Recomendaciones de diseño para proyectos de infraestructura ferroviaria*” (MIDEPLAN - SECTRA, 2003), que ofrece criterios detallados sobre el diseño de trazados ferroviarios, incluyendo el desvío de líneas y la ubicación de estaciones en la periferia urbana. Este documento subraya que, si bien el desvío permite mejorar la eficiencia operativa y reducir el impacto urbano directo, también plantea desafíos en términos de conectividad intermodal y cohesión territorial.

Ambos estudios coinciden en que el éxito de esta estrategia depende en gran medida de la planificación integrada del transporte urbano y regional, así como de la capacidad de las ciudades para reconvertir los antiguos corredores ferroviarios en espacios públicos o infraestructuras verdes que mantengan la vitalidad urbana.

#### **4.10. Aplicación del análisis multicriterio**

Se define la toma de decisiones como un proceso que implica la identificación y selección de alternativas basadas en los valores y preferencias definidas por los Decisores de Alto Nivel (DAN) o personas responsables de tomar la decisión. Los métodos de decisión son herramientas que están diseñadas para minimizar la subjetividad, mediante la creación de filtros de selección que facilitan la elección entre opciones complejas. Estos métodos son útiles en diversas etapas del proceso. Inicialmente, permiten descomponer el problema, tarea u objetivo en un conjunto finito de requisitos. Una vez definidos estos requisitos, los métodos permiten jerarquizarlos según su importancia relativa o el peso asignado a cada criterio para cada alternativa.

Los métodos multicriterio desempeñan un papel fundamental para abordar la toma de decisión en proyectos de integración del ferrocarril en entornos urbanos, especialmente, durante la fase de Estudio Informativo y Estudios de Viabilidad.

En la literatura especializada, se encuentran numerosos ejemplos de métodos de decisión multicriterio, varios de los cuales se describen brevemente en este trabajo fin de máster. No es objeto del presente trabajo fin de máster el estudio detallado de los tipos de métodos multicriterio. No obstante, es fundamental recordar que la mayoría de estos métodos se basan en una matriz de decisión, donde la subjetividad del decisor desempeña un papel muy importante.

La historia de los métodos de decisión multicriterio (MCDM *Multi-Criteria Design Method*) ha evolucionado significativamente a lo largo del tiempo, reflejando la creciente complejidad de las decisiones que deben tomarse en diversos campos. Estos métodos surgieron como una

respuesta a la necesidad de tomar decisiones complejas que involucren múltiples criterios, a menudo en conflicto entre sí. Sus raíces se encuentran en diversas disciplinas como la estadística, la teoría de la probabilidad, la teoría económica y la investigación operativa.

Uno de los primeros enfoques formales fue la "álgebra moral" de Benjamin Franklin en 1772, que proponía un sistema para tomar decisiones importantes mediante la evaluación de argumentos positivos y negativos. Sin embargo, el desarrollo formal de los métodos de decisión multicriterio comenzó a mediados del siglo XX. En la década de 1960, se introdujeron los primeros modelos matemáticos y técnicas sistemáticas para abordar problemas de decisión complejos. Durante este período, se desarrollaron métodos como el Análisis de Decisión de Múltiples Atributos (MADM) y el Análisis de Decisión de Múltiples Objetivos (MODM), que se convirtieron en pilares fundamentales del campo.

En la década de 1980, Hwang y Yoon propusieron una clasificación de los métodos MCDM en dos categorías principales en su libro *"Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer-Verlag"*. Este libro es una obra fundamental en el campo de la toma de decisiones multicriterio y presenta una clasificación clave de los métodos, además de introducir el conocido método TOPSIS.

Concretamente, Hwang y Yoon propusieron las siguientes dos categorías:

- Métodos de toma de decisión multiatributo (MADM)
- Métodos de toma de decisión multiobjetivo (MODM)

Los métodos MADM se utilizan para problemas discretos donde las alternativas están predeterminadas, mientras que los métodos MODM se aplican a problemas continuos donde las alternativas no están predeterminadas y se buscan soluciones óptimas bajo ciertas restricciones.

A lo largo de las décadas siguientes, el campo de MCDM experimentó un crecimiento exponencial. Se desarrollaron numerosos métodos y técnicas avanzadas para abordar problemas de decisión cada vez más complejos. Algunos de los métodos más conocidos incluyen TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*), VIKOR (*Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*) y AHP (*Analytic Hierarchy Process*), cada uno con sus propias características y aplicaciones específicas.



En las últimas décadas, los métodos de decisión multicriterio han encontrado aplicaciones en una amplia variedad de campos, desde la planificación urbana y la gestión ambiental hasta la ingeniería y la economía. De hecho, el método AHP, desarrollado por Thomas L. Saaty en la década de 1970, se ha utilizado ampliamente para la toma de decisiones en proyectos de infraestructura, gestión de recursos y planificación estratégica.

Keeney y Raiffa en su influyente obra *“Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs, Keeney y Raiffa”* (1993) presentan un marco teórico sólido para abordar decisiones complejas que involucran múltiples criterios. Su principal contribución es el desarrollo del enfoque de utilidad multiatributo (MAUT), una extensión de la teoría de la utilidad clásica que permite representar y analizar las preferencias del decisor cuando se enfrentan alternativas que afectan a varios objetivos simultáneamente.

El enfoque parte de la premisa de que las decisiones racionales deben basarse en una representación coherente de las preferencias del decisor. Para ello, los autores proponen construir una función de utilidad multiatributo, que asigna un valor numérico a cada alternativa en función de su desempeño en los distintos criterios considerados. Esta función permite comparar alternativas complejas de manera sistemática, incluso cuando los criterios son de naturaleza heterogénea (por ejemplo, coste, calidad, impacto ambiental).

Uno de los aspectos más innovadores del enfoque es su capacidad para evaluar compensaciones entre criterios. A través de un proceso estructurado, el decisor puede expresar cuánto está dispuesto a sacrificar en un criterio para mejorar en otro, lo que permite construir una función de utilidad que refleje fielmente sus prioridades. Este análisis de compensaciones, o trade-offs, es esencial para entender las verdaderas preferencias del decisor y para justificar las decisiones tomadas.

Keeney y Raiffa también subrayan la importancia de la modelización explícita de los objetivos. En lugar de centrarse únicamente en las alternativas disponibles, proponen comenzar el proceso de decisión identificando y estructurando los objetivos fundamentales del decisor. Esta clarificación de objetivos no solo mejora la calidad del modelo, sino que también aporta transparencia y facilita la comunicación entre los distintos actores implicados en la decisión.

Finalmente, el enfoque MAUT promueve una toma de decisiones transparente, participativa y racional, al exigir que se expliciten las preferencias, los objetivos y las compensaciones. Esto lo convierte en una herramienta especialmente valiosa en contextos donde se requiere rendición de cuentas o donde participan múltiples partes interesadas, como en la formulación de políticas públicas, la planificación estratégica o la evaluación de proyectos complejos.

Posteriormente, Belton y Stewart en su obra *“Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach, Belton y Stewart”* (2002) proponen una visión innovadora y práctica del análisis de decisiones multicriterio (MCDA), que se distingue por su enfoque integrador. A diferencia de otros modelos centrados exclusivamente en los resultados cuantitativos, estos autores destacan la importancia de considerar tanto los aspectos técnicos como los humanos y organizativos del proceso de decisión. Su propuesta se basa en la idea de que una buena decisión no depende únicamente de la elección final, sino también de la calidad del proceso mediante el cual se llega a ella.

Uno de los pilares de su enfoque es la combinación de técnicas cuantitativas con elementos cualitativos. Esto implica no solo evaluar alternativas en función de criterios medibles, sino también incorporar valores, percepciones y juicios subjetivos de los actores involucrados. Para ello, introducen el concepto de valoración estructurada, que permite descomponer el problema en componentes más manejables —como objetivos, criterios y alternativas— y organizar el pensamiento del decisor de forma clara y lógica. Esta estructuración facilita la identificación de conflictos, la exploración de compensaciones y la mejora de la comunicación entre los participantes.

Belton y Stewart también subrayan que el análisis multicriterio debe entenderse como un proceso de aprendizaje y reflexión. En este sentido, el objetivo no es únicamente encontrar la “mejor” alternativa desde un punto de vista técnico, sino fomentar la comprensión del problema, el diálogo entre las partes interesadas y la construcción de consenso. Esta perspectiva resulta especialmente valiosa en contextos complejos y participativos, donde intervienen múltiples actores con intereses diversos.

Además, los autores reconocen el papel fundamental del software como herramienta de apoyo en el análisis multicriterio. Lejos de sustituir el juicio humano, estas herramientas permiten visualizar relaciones entre criterios, realizar análisis de sensibilidad y explorar distintos escenarios, lo que enriquece el proceso de toma de decisiones. Programas como HiView, Equity o Decision Explorer son ejemplos de plataformas que facilitan la aplicación práctica de este enfoque.

La propuesta de Belton y Stewart representa una evolución significativa en el campo del MCDA, al ofrecer un marco que no solo es metodológicamente sólido, sino también sensible a las dimensiones humanas y organizativas de la decisión. Su enfoque integrador ha influido profundamente en la forma en que se aplican los métodos multicriterio en la práctica, especialmente en ámbitos como la planificación estratégica, la gestión pública, la sostenibilidad y la toma de decisiones en grupo.

En 2011, Tzeng y Huang publicaron *“Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications”* donde ofrecen una contribución significativa al campo de la toma de decisiones multicriterio (MCDM), con un enfoque marcadamente orientado a la aplicación práctica. A diferencia de otros trabajos más centrados en los fundamentos teóricos, esta obra se distingue por su utilidad para resolver problemas reales en ámbitos como la ingeniería, la economía, la gestión empresarial y la planificación estratégica.

Uno de los principales aportes del libro es la presentación clara y sistemática de varios métodos MCDM ampliamente utilizados, entre ellos TOPSIS, VIKOR y DEMATEL. Cada uno de estos métodos se explica no solo desde el punto de vista técnico, sino también en términos de su aplicabilidad a distintos tipos de problemas. Por ejemplo, TOPSIS se basa en la idea de seleccionar la alternativa más cercana a la solución ideal y más alejada de la solución anti-ideal, mientras que VIKOR introduce el concepto de solución de compromiso, útil cuando se busca un equilibrio entre criterios en conflicto. DEMATEL, por su parte, permite analizar relaciones de causa y efecto entre criterios, lo que resulta especialmente valioso en sistemas complejos.

Una de las ideas centrales del enfoque de Tzeng y Huang es precisamente el concepto de solución de compromiso, que adquiere especial relevancia en contextos donde las decisiones deben tomarse en grupo o cuando existen múltiples partes interesadas con prioridades divergentes. En lugar de buscar una solución óptima desde un único punto de vista, se propone identificar alternativas que representen un equilibrio aceptable entre los distintos criterios, lo que facilita la aceptación y legitimidad de la decisión final.

Además, los autores destacan la importancia de adaptar los métodos a las características específicas del problema y del entorno decisional. Para ello, ofrecen numerosos ejemplos y estudios de caso que ilustran cómo aplicar los métodos en situaciones reales, desde la selección de proveedores hasta la evaluación de políticas públicas o la planificación de infraestructuras.

Finalmente, cabe mencionar el trabajo de Greco, Ehrgott y Figueira. Su obra *“Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys”* (2016), constituye uno de los compendios más completos y actualizados sobre el campo de la toma de decisiones multicriterio (MCDA/MCDM). Este volumen reúne las contribuciones de numerosos expertos internacionales y ofrece una visión panorámica del estado del arte, tanto en lo que respecta a los fundamentos teóricos como a las aplicaciones prácticas de los métodos multicriterio.

Una de las principales fortalezas de esta obra es su capacidad para integrar y sistematizar el conocimiento acumulado en décadas de investigación. A través de capítulos temáticos, se abordan tanto los métodos clásicos —como AHP, ELECTRE, PROMETHEE o MAUT— como los enfoques emergentes, incluyendo técnicas híbridas, métodos basados en lógica difusa, y herramientas de apoyo a la decisión en entornos de incertidumbre. Esta amplitud metodológica convierte al libro en una referencia esencial para investigadores, profesionales y estudiantes avanzados del área.

El compendio también profundiza en aspectos metodológicos clave como la robustez de las decisiones, la gestión de la incertidumbre, y la interacción entre criterios, elementos que son fundamentales en contextos reales donde los datos pueden ser incompletos, ambiguos o conflictivos. Se exploran técnicas para realizar análisis de sensibilidad, evaluar la estabilidad de las soluciones y modelar las preferencias del decisor de forma más realista.

Además, la obra destaca por su enfoque aplicado. A lo largo de sus capítulos se presentan numerosos casos de estudio y aplicaciones en sectores como la logística, la energía, la salud pública, la gestión ambiental y la sostenibilidad. Estos ejemplos ilustran cómo los métodos MCDA pueden adaptarse a distintos contextos y necesidades, y cómo contribuyen a mejorar la calidad y legitimidad de las decisiones en escenarios complejos y multidimensionales.

Por tanto, los estudios de Keeney y Raiffa, Belton y Stewart, Tzeng y Huang, así como el compendio editado por Greco y colaboradores, coinciden en señalar que los métodos de decisión multicriterio (MCDM) no solo son herramientas eficaces para comparar alternativas complejas, sino que también desempeñan un papel fundamental en la promoción de la transparencia, la participación y la comprensión profunda de los problemas. En el contexto específico de la integración del ferrocarril en entornos urbanos, estos enfoques ofrecen un marco metodológico robusto que permite abordar la complejidad inherente a este tipo de decisiones.

En primer lugar, los métodos MCDM facilitan la estructuración clara del problema, permitiendo identificar y jerarquizar objetivos clave como la reducción del impacto ambiental, la mejora de la movilidad urbana, la cohesión territorial y la viabilidad económica de las intervenciones. Esta estructuración ayuda a alinear las decisiones con las prioridades estratégicas de las ciudades.

En segundo lugar, estos enfoques permiten incorporar múltiples perspectivas en el proceso de decisión, incluyendo las de autoridades locales, operadores ferroviarios, ciudadanía, urbanistas, ecologistas y otros actores relevantes. Esta inclusión favorece la legitimidad de las decisiones y mejora la calidad del análisis al integrar conocimientos diversos.

Además, los métodos multicriterio permiten evaluar las alternativas de forma equilibrada, considerando tanto criterios cuantitativos —como costes, tiempos de ejecución o emisiones contaminantes— como cualitativos, tales como la aceptación social, el impacto visual o el valor patrimonial de las zonas afectadas. Esta capacidad de integrar diferentes tipos de información es esencial en contextos urbanos, donde los factores técnicos y sociales están estrechamente entrelazados.

Por último, los enfoques MCDM facilitan la exploración de soluciones de compromiso, especialmente útiles cuando existen tensiones entre la eficiencia técnica y la aceptación social. En lugar de buscar una única solución óptima, se identifican alternativas que logran un equilibrio razonable entre los distintos intereses en juego, lo que resulta crucial para la implementación exitosa de proyectos ferroviarios en entornos urbanos densamente poblados y diversos.

En este contexto, resulta fundamental comparar los principales métodos de análisis multicriterio (AMC) utilizados en la evaluación de alternativas en entornos urbanos complejos. A pesar de compartir una estructura común basada en la ponderación y comparación de múltiples criterios, cada enfoque metodológico presenta características específicas que lo hacen más o menos adecuado según la naturaleza del problema, el tipo de datos disponibles y los objetivos de la planificación. La siguiente tabla sintetiza las principales ventajas, limitaciones y aplicaciones típicas de algunos de los métodos más relevantes —como AHP, VIKOR, PROMETHEE, TOPSIS o ELECTRE—, todos ellos ampliamente utilizados en la literatura técnica y científica en ámbitos relacionados con la infraestructura y la gestión urbana.

Método	Ventajas	Limitaciones	Aplicaciones típicas
<b>AHP</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intuitivo y fácil de aplicar</li> <li>- Permite descomposición jerárquica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Subjetividad en juicios pareados</li> <li>- Escasa escalabilidad con muchos criterios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planificación urbana, priorización de infraestructuras, selección de alternativas</li> </ul>
<b>VIKOR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enfocado en soluciones de compromiso</li> <li>- Maneja bien criterios conflictivos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere normalización precisa</li> <li>- Menos conocido en ámbitos técnicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desarrollo sostenible, selección de ubicación de instalaciones</li> </ul>
<b>PROMETHEE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibilidad en la elección de funciones de preferencia</li> <li>- Maneja tanto datos cuantitativos como cualitativos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere parametrización detallada- Sensible a los pesos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transporte, ordenación territorial, energía renovable</li> </ul>
<b>TOPSIS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simplicidad computacional</li> <li>- Basado en distancia a la solución ideal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asume proporcionalidad entre criterios</li> <li>- No capta relaciones entre criterios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluación de políticas, gestión ambiental</li> </ul>
<b>ELECTRE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Robusto ante inconsistencias</li> <li>- Maneja información imprecisa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Complejidad en interpretación</li> <li>- Elevada carga computacional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Selección de proyectos, gestión de residuos, energía</li> </ul>

Figura 4. Tabla comparativa de los enfoques metodológicos revisados. Fuente: Elaboración propia a partir de Belton & Stewart (2002), Penadés-Plà et al. (2016), y Yepes (2018).

#### **4.11. El análisis multicriterio en otros sectores urbanos: una herramienta transversal para la toma de decisiones complejas**

El análisis multicriterio (AMC) se ha consolidado como una metodología de referencia en la toma de decisiones urbanas, gracias a su capacidad para integrar y ponderar simultáneamente factores técnicos, económicos, sociales y ambientales. Si bien su aplicación en la planificación ferroviaria ha demostrado resultados relevantes, su verdadero potencial radica en su versatilidad para abordar problemáticas diversas dentro de la gestión urbana contemporánea.

En el sector del agua, el AMC ha sido utilizado para priorizar inversiones en infraestructuras de abastecimiento y saneamiento, permitiendo una evaluación equilibrada entre criterios como la eficiencia operativa, el rendimiento ambiental, el impacto social y la viabilidad financiera. Esta perspectiva ha resultado especialmente útil en contextos de escasez hídrica o vulnerabilidad climática, favoreciendo decisiones más resilientes y ajustadas al territorio (Gómez et al., 2014).

En el ámbito energético, su aplicación ha sido clave para apoyar procesos de transición hacia modelos sostenibles. El AMC permite comparar distintas fuentes de generación (renovables vs. convencionales) y analizar su implantación teniendo en cuenta aspectos como la eficiencia, el coste nivelado de energía, la aceptación social, el impacto paisajístico y la seguridad del suministro. Además, ha sido empleado para definir la localización óptima de infraestructuras energéticas, minimizando conflictos territoriales y maximizando su integración en el entorno (Pohekar & Ramachandran, 2004).

La gestión de residuos sólidos urbanos es otro campo donde el AMC ha aportado valor estratégico. Diversos estudios han demostrado su eficacia en la evaluación de modelos de recogida, tratamiento y disposición final, incorporando indicadores como los costes operativos, las emisiones, el empleo generado o la aceptación vecinal. Este enfoque facilita la selección de sistemas coherentes con los principios de la economía circular y con los objetivos de sostenibilidad locales (Banar et al., 2009).

Más allá de estos sectores, el AMC ha sido progresivamente adoptado en áreas como la ordenación del suelo, la adaptación climática, la movilidad multimodal, la selección de tecnologías urbanas o la evaluación de políticas públicas. Su estructura flexible, orientada a decisiones con múltiples actores e intereses, lo convierte en una herramienta idónea para enfrentar los dilemas urbanos actuales desde un enfoque sistémico y participativo.

## 5. ANÁLISIS DE LOS RETOS Y OPORTUNIDADES QUE PLANTEA LA INTEGRACIÓN DEL FERROCARRIL EN CIUDADES CONSOLIDADAS

Como centros neurálgicos de actividad económica, social y cultural, las ciudades enfrentan desafíos particularmente complejos al abordar la transformación o ampliación de sus sistemas de transporte. Este apartado propone examinar de forma crítica los principales retos y oportunidades que implica la integración del ferrocarril en entornos urbanos consolidados. En este análisis se consideran tanto las limitaciones impuestas por la estructura física y el marco normativo existente, como las posibilidades que ofrece esta intervención para impulsar procesos de regeneración urbana, mejorar la conectividad y fomentar el desarrollo económico a escala local.

A modo resumen, en este apartado se abordan los siguientes retos y oportunidades a considerar en los estudios de alternativas para buscar la mejor solución de integración de la infraestructura ferroviaria en las ciudades:

PRINCIPALES RETOS	OPORTUNIDADES
● Restricciones Espaciales	● Regeneración Urbana
● Normativas y Regulaciones	● Desarrollo Económico Local
● Impacto en la Comunidad	● Sostenibilidad
● Costos Elevados	● Mejora de la Movilidad
● Ausencia de un patrón claro	

### 5.1. Principales Retos

#### 5.1.1. Restricciones Espaciales

Uno de los desafíos más significativos en la integración del ferrocarril en entornos urbanos consolidados es la limitación espacial en las ciudades. La alta densidad del tejido urbano, combinada con la escasez de suelo disponible, dificulta considerablemente la implantación, ampliación o reconfiguración de infraestructuras ferroviarias. Esta situación se ve aún más condicionada por la necesidad de preservar el patrimonio arquitectónico y cultural, así como los espacios verdes urbanos, que constituyen elementos clave en la calidad de vida y la identidad de las ciudades.



### 5.1.2. Normativas y Regulaciones

El marco normativo y las regulaciones urbanísticas, si bien fundamentales para garantizar un desarrollo urbano ordenado, seguro y respetuoso con el entorno, pueden convertirse en una fuente significativa de rigidez en los procesos de planificación e implementación de infraestructuras ferroviarias. En muchos casos, la complejidad administrativa y la fragmentación competencial entre distintos niveles de gobierno y organismos reguladores generan barreras burocráticas que no solo ralentizan el avance de los proyectos, sino que también penalizan la toma de decisiones informadas y oportunas.

Estas restricciones pueden limitar la capacidad de los responsables de planificación para seleccionar la alternativa más adecuada desde el punto de vista técnico, económico o social, obligándolos a optar por soluciones subóptimas que se ajusten a los marcos normativos vigentes, aunque no necesariamente respondan a las necesidades reales del territorio. En este contexto, se vuelve imprescindible fomentar una mayor coordinación interinstitucional y promover mecanismos de flexibilización normativa, que permitan adaptar las regulaciones a las particularidades de cada proyecto sin comprometer los principios de sostenibilidad, seguridad y equidad urbana.

### 5.1.3. Impacto en la Comunidad

Las intervenciones necesarias para la integración del ferrocarril en entornos urbanos suelen implicar obras de construcción de gran envergadura que, inevitablemente, generan impactos temporales sobre la vida cotidiana de los residentes. Entre las principales molestias se encuentran el aumento del ruido ambiental, la emisión de polvo, la alteración de la movilidad local y la interrupción de servicios urbanos. Estos efectos, aunque transitorios, pueden deteriorar significativamente la calidad de vida de la población durante el periodo de ejecución de las obras, provocando resistencia social y oposición al proyecto, especialmente si no se gestionan de forma adecuada.

Ante este escenario, resulta fundamental implementar estrategias de mitigación proactivas que minimicen el impacto sobre la comunidad. Medidas como la restricción de horarios de trabajo a franjas de menor sensibilidad, la instalación de barreras acústicas, el control de emisiones de partículas y la planificación de desvíos de tráfico bien señalizados son esenciales para reducir las molestias percibidas.

Además, la comunicación transparente y continua con la ciudadanía, junto con la participación activa de los residentes en el proceso de planificación, permite identificar preocupaciones específicas y adaptar las soluciones a las características del entorno local.

La incorporación de mecanismos de participación comunitaria no solo contribuye a anticipar conflictos, sino que también fortalece la legitimidad del proyecto y mejora su aceptación social. Escuchar y responder a las inquietudes de la población afectada no debe considerarse un trámite, sino una parte integral del proceso de diseño e implementación de infraestructuras urbanas sostenibles y socialmente responsables.

#### 5.1.4. Costos Elevados

La construcción y adaptación de infraestructuras ferroviarias en áreas urbanas densamente pobladas conlleva desafíos técnicos y económicos de gran envergadura. Uno de los principales factores que incrementan los costes en este tipo de intervenciones es la necesidad de minimizar el impacto sobre las estructuras existentes y sobre la vida cotidiana de los ciudadanos. La proximidad a edificaciones, redes de servicios urbanos y espacios públicos obliga a adoptar soluciones constructivas altamente especializadas, lo que eleva significativamente la complejidad y el presupuesto de los proyectos.

En este contexto, la planificación y ejecución deben abordarse con un alto grado de precisión y coordinación, a fin de evitar daños colaterales a infraestructuras preexistentes y garantizar la continuidad funcional de la ciudad durante el desarrollo de las obras.

Dada la magnitud de las inversiones requeridas, la financiación de estos proyectos suele demandar esquemas de colaboración público-privada, así como la exploración de fuentes de financiamiento innovadoras, como fondos europeos, instrumentos de financiación verde o mecanismos de captación de plusvalías urbanas. En este sentido, una evaluación económica rigurosa, que contemple tanto los costes directos como los beneficios sociales y territoriales a largo plazo, resulta esencial para justificar la inversión.

Asimismo, la gestión de riesgos financieros se convierte en un componente crítico para asegurar la viabilidad del proyecto. Esto incluye la identificación temprana de incertidumbres, la elaboración de escenarios alternativos y la implementación de mecanismos de control presupuestario y contractual que permitan mitigar desviaciones durante la ejecución.

### 5.1.5. Sin patrón definido de solución

Tal como se ha expuesto, no existe una solución universal ni un modelo único aplicable a la integración del ferrocarril en entornos urbanos, especialmente considerando la naturaleza estructuralmente rígida del ferrocarril. La elección entre alternativas como el soterramiento mediante túnel, la construcción en viaducto o la implementación de variantes de trazado depende de múltiples factores contextuales —urbanísticos, técnicos, económicos y sociales— que deben ser cuidadosamente evaluados en cada caso.

Cada una de estas soluciones presenta ventajas y limitaciones específicas. El túnel, por ejemplo, minimiza el impacto visual y la fragmentación urbana, pero implica mayores costes y complejidad constructiva. El viaducto, por su parte, puede ser más económico y rápido de ejecutar, aunque conlleva un mayor impacto paisajístico y posibles barreras físicas. Las variantes de trazado permiten evitar zonas densamente urbanizadas, pero pueden requerir expropiaciones o afectar áreas periurbanas sensibles.

En muchos casos, la solución más adecuada no se encuentra en la aplicación aislada de una única tipología, sino en la combinación estratégica de varias de ellas, adaptadas a las condiciones específicas del territorio. Esta flexibilidad en el diseño permite optimizar el equilibrio entre funcionalidad ferroviaria, integración urbana y sostenibilidad del proyecto.

A continuación, se describen las principales ventajas e inconvenientes de estas soluciones.

#### **Soterramiento**

La decisión de soterrar o no el ferrocarril a su llegada al centro de las ciudades ha sido siempre un tema que ha generado mucho debate, sin concluir en unos patrones claros a seguir para futuras actuaciones.

Entre los principales argumentos a favor del soterramiento de las líneas férreas en ciudades se encuentran varios aspectos clave. En primer lugar, desde una perspectiva estética y de aprovechamiento del espacio, estas infraestructuras, al estar situadas bajo tierra, no alteran el paisaje urbano ni ocupan espacio en la superficie, lo que permite un uso más eficiente del entorno. En segundo lugar, las soluciones soterradas contribuyen a la reducción del ruido en la superficie, mejorando así la calidad de vida de los residentes. Finalmente, al no interferir con el tráfico vehicular ni peatonal, estas infraestructuras pueden ayudar a disminuir los problemas de congestión en la ciudad.

Entre las desventajas del soterramiento de infraestructuras ferroviarias, destacan los altos costes, ya que tanto la construcción como el mantenimiento de estas infraestructuras suelen ser más caros debido a la complejidad técnica y los riesgos asociados.

Además, los proyectos subterráneos suelen requerir más tiempo para completarse, lo que puede influir en la toma de decisiones durante la fase de planificación del proyecto. En situaciones de emergencia, la evacuación y el acceso a las infraestructuras subterráneas pueden ser más complicados, lo que también afecta la accesibilidad. Los usuarios, a menudo con equipaje, deben superar desniveles, a pesar de la presencia de escaleras mecánicas y ascensores. Esta incomodidad relativa se traduce en un aumento del tiempo necesario para acceder a los andenes.

Entre las ciudades que han optado por soluciones de soterramiento destaca Madrid con el proyecto de Chamartín, con una solución que permitirá la creación de nuevos espacios urbanos y mejorará la conectividad entre barrios, o Málaga donde el soterramiento de las vías del tren ha permitido la regeneración urbana de áreas anteriormente divididas por las vías, mejorando la cohesión social y urbana.



Figura 6. Recreación virtual proyecto de Chamartín. Fuente: Adif

Fuera de España, destacan casos como Boston en EE.UU. con el Big Dig. Aunque principalmente es conocido por el soterramiento de autopistas, el proyecto también incluyó el soterramiento de líneas ferroviarias, mejorando significativamente la calidad de vida urbana y reduciendo la congestión, o Durchmesserlinie en Zúrich, Suiza. Este proyecto incluyó el soterramiento de una línea ferroviaria clave en el centro de Zúrich, mejorando la capacidad y eficiencia del transporte público y liberando espacio para el desarrollo urbano.

## Soluciones elevadas

Las soluciones elevadas se presentan como una alternativa al soterramiento de las vías del tren. En términos de coste, los viaductos suelen ser más económicos y rápidos de construir en comparación con las soluciones subterráneas. Además, ofrecen mejor visibilidad y seguridad, ya que son más accesibles y visibles.

Otra ventaja es que no requieren excavaciones profundas, lo cual es beneficioso en áreas con suelos inestables, zonas urbanas con gran número de servicios afectados o con infraestructuras subterráneas existentes (metro, por ejemplo).

No obstante, las soluciones en viaducto también presentan desventajas significativas. Estas estructuras pueden alterar negativamente el paisaje urbano y la estética de la ciudad debido a su notable impacto visual. Además, es probable que aumenten los niveles de ruido, lo cual puede resultar molesto para los residentes cercanos y afectar el tráfico y la movilidad en la superficie, especialmente durante la fase de construcción. Similar a las soluciones soterradas, las soluciones elevadas pueden dificultar la accesibilidad de los usuarios, ya que deben superar desniveles, lo que incrementa el tiempo necesario para acceder a los andenes.

Aunque las soluciones elevadas no han sido comúnmente utilizadas en ciudades españolas, están comenzando a ser más frecuentes, como se observa en Birmingham, Reino Unido. Actualmente, se encuentra en construcción el proyecto de alta velocidad HS2 entre Londres y Birmingham y la entrada del ferrocarril en Birmingham hasta la estación principal de Curzon Street se realizará a través de una serie de viaductos, lo que permitirá la creación de nuevos espacios públicos debajo de las vías elevadas.



Figura 7. Recreación virtual de HS2 en Birmingham. Fuente: WW+P

Otro ejemplo notable de solución elevada es la línea ferroviaria México-Toluca, actualmente conocida como la Línea Insurgentes. Este proyecto es un claro ejemplo de cómo las infraestructuras elevadas pueden integrarse en un entorno urbano consolidado.

La mayor parte del trazado de esta línea, incluidas las estaciones, se encuentra en estructuras elevadas, lo que permitió una integración eficiente en el entorno urbano sin la necesidad de realizar excavaciones extensivas o afectar significativamente el tráfico en la superficie.

La Línea Insurgentes se diseñó para mejorar la conectividad entre la Ciudad de México y Toluca, una de las áreas metropolitanas más importantes del país. Al estar elevada, la línea minimiza la interferencia con las actividades diarias de la ciudad, permitiendo un flujo continuo de tráfico vehicular y peatonal debajo de las vías. Además, las estaciones elevadas ofrecen vistas panorámicas de la ciudad, lo que puede ser un atractivo adicional para los usuarios.

## **Variantes**

Una tercera solución que se ha considerado en ocasiones es la construcción de variantes de población lo que implica desviar las vías del ferrocarril fuera de los entornos urbanos.

Entre las principales ventajas de alejar las vías del tren del centro urbano se incluye la reducción del ruido, la mejora de la seguridad al eliminar posibles cruces a nivel y la disposición de mayor espacio urbano, permitiendo que las áreas previamente ocupadas por las vías se reutilicen para parques, viviendas u otras infraestructuras urbanas.

No obstante, esta solución presenta desventajas considerables. La construcción de nuevas vías fuera del entorno urbano puede resultar extremadamente costosa, tanto desde una perspectiva financiera, como temporal. Además, las nuevas rutas pueden tener un impacto adverso en las áreas metropolitanas o rurales, ya que las estaciones actúan como centros de atracción económica y comercial. Al ubicarse lejos del centro urbano, se puede dificultar el acceso de los pasajeros, disminuyendo así la conveniencia del transporte ferroviario.

Un ejemplo de una variante de población que no tuvo el éxito esperado es el caso de algunas líneas ferroviarias en México. En municipios como Empalme y Nuevo Casas Grandes, la desaparición de la actividad ferroviaria y el desvío de las vías fuera de las áreas urbanas llevaron a un declive económico significativo. Estos municipios, que se habían desarrollado alrededor del ferrocarril, vieron cómo su economía se deterioraba al perder esta infraestructura clave.



En España tenemos el caso de Segovia con la estación de alta velocidad Segovia-Guiomar. Esta estación se construyó a unos 6 kilómetros del centro de la ciudad. Esta ubicación ha sido criticada por su falta de integración con el núcleo urbano, lo que ha llevado a una menor utilización del servicio ferroviario por parte de los residentes y visitantes.

Además, la necesidad de utilizar transporte adicional para llegar a la estación ha incrementado los costos y el tiempo de viaje para los usuarios. Estos problemas ilustran por qué la localización de estaciones ferroviarias lejos del núcleo urbano no siempre es la solución más adecuada, a pesar de las posibles ventajas en términos de costos de construcción y reducción de impacto en el centro de la ciudad.

Por tanto, se puede concluir que no existe una solución única para integrar el ferrocarril en las ciudades. Cada alternativa presenta ventajas y desventajas que deben ser evaluadas de forma integral, considerando no solo criterios técnicos y económicos, sino también sociales y urbanísticos.

La tabla siguiente presenta de forma sintética, las ventajas y desventajas de cada una de las soluciones descritas:

Criterio	Soterramiento (Túnel)	Soluciones Elevadas (Viaducto)	Variantes de Trazado (Desvío)
<b>Impacto visual y paisajístico</b>	Muy bajo. No altera el paisaje urbano.	Alto. Estructuras visibles que pueden alterar la estética de la ciudad.	Nulo en el centro urbano, pero puede generar impacto en áreas periurbanas o rurales.
<b>Integración urbana</b>	Alta. Permite coser el tejido urbano y recuperar espacio en superficie.	Media. Puede generar nuevas oportunidades bajo las vías, pero también barreras físicas.	Baja. Aleja la infraestructura del núcleo urbano, dificultando su integración.
<b>Coste económico</b>	Muy alto. Costes de construcción y mantenimiento elevados.	Medio. Menores costes que el soterramiento.	Alto. Requiere adquisición de nuevos terrenos e infraestructuras complementarias.

Criterio	Soterramiento (Túnel)	Soluciones Elevadas (Viaducto)	Variantes de Trazado (Desvío)
<b>Plazo de ejecución</b>	Largo. Mayor complejidad técnica y tiempos de obra prolongados.	Medio. Construcción más rápida que la solución soterrada.	Largo. Necesita planificación territorial y construcción de nuevas líneas.
<b>Accesibilidad y movilidad</b>	Media. Desniveles y accesos complejos para los usuarios.	Media. También requiere salvar alturas para acceder a los andenes.	Baja. Las estaciones alejadas del centro urbano reducen la accesibilidad directa.
<b>Impacto acústico</b>	Bajo. Reducción significativa del ruido en superficie.	Alto. Puede incrementar la contaminación acústica en zonas próximas.	Bajo en el entorno urbano, aunque puede trasladar el ruido a otras zonas.
<b>Flexibilidad constructiva</b>	Baja. Condicionado por geología y servicios existentes.	Alta. Apto para zonas con suelos problemáticos o infraestructuras subterráneas.	Media. Depende de la disponibilidad de suelo y conectividad externa.
<b>Efectos socioeconómicos</b>	Positivos. Mejora la cohesión urbana y puede dinamizar zonas centrales.	Mixtos. Puede generar oportunidades bajo las estructuras, pero también dividir barrios.	Negativos si no se garantiza la conexión adecuada con el centro. Puede afectar la economía local.
<b>Ejemplos destacados</b>	Madrid (Chamartín), Málaga, Boston (Big Dig), Zúrich (Durchmesserlinie)	Birmingham (HS2), México-Toluca (Línea Insurgentes)	Segovia-Guiomar (España), Empalme y Nuevo Casas Grandes (México)

Figura 8. Tabla resumen solución de integración tradicionalmente consideradas.



## 5.2. Oportunidades

### 5.2.1. La integración ferroviaria como motor de regeneración urbana

La incorporación estratégica del sistema ferroviario en el tejido urbano representa una oportunidad significativa para la revitalización de zonas urbanas degradadas. Esta integración no solo permite la modernización de la infraestructura existente, sino que también actúa como un catalizador para la atracción de inversiones privadas y públicas, promoviendo un entorno propicio para el desarrollo de nuevos espacios públicos, soluciones habitacionales y actividades comerciales. En consecuencia, se impulsa el crecimiento económico y se fortalece la cohesión social en el entorno urbano.

La regeneración urbana, concebida desde una perspectiva integral e inclusiva, debe garantizar una distribución equitativa de los beneficios generados, asegurando que todos los sectores de la población se vean favorecidos. En este contexto, la planificación urbana debe incorporar criterios de sostenibilidad, accesibilidad universal y participación ciudadana, con el fin de consolidar comunidades resilientes y dinámicas.

La construcción de nuevas estaciones ferroviarias no solo mejora la conectividad y la movilidad intraurbana, sino que también puede desempeñar un papel clave como nodo de desarrollo económico. Estas infraestructuras tienen el potencial de atraer actividades comerciales, servicios y emprendimientos, generando empleo y dinamizando la economía local. Asimismo, contribuyen a la integración territorial al conectar áreas previamente marginadas con el resto de la ciudad, incrementando su atractivo como lugares para vivir, trabajar e invertir.

La modernización de estaciones existentes también constituye un componente esencial en los procesos de regeneración urbana. La rehabilitación de infraestructuras obsoletas puede transformar entornos deteriorados en polos de actividad contemporánea. Un caso paradigmático es el de la estación de King's Cross en Londres, que pasó de ser una zona industrial en declive a convertirse en un hub de transporte nacional e internacional, gracias a su conexión con el Eurostar.

Este proyecto no solo mejoró la funcionalidad del nodo ferroviario, sino que también impulsó una transformación urbana integral en su entorno inmediato. Actualmente, King's Cross alberga oficinas corporativas, comercios, restaurantes y espacios públicos de alta calidad, consolidándose como un referente de regeneración urbana éxitos.

### 5.2.2. Conectividad ferroviaria como vector de desarrollo económico sostenible

La mejora en la conectividad ferroviaria constituye un factor estratégico para el impulso del desarrollo económico territorial. Al facilitar el acceso eficiente a mercados, recursos y servicios, se generan condiciones favorables para la atracción de inversiones, la dinamización del turismo y la consolidación de ecosistemas empresariales. Las estaciones de tren, cuando están adecuadamente localizadas e integradas en el entorno urbano, pueden convertirse en auténticos polos de actividad económica, promoviendo el comercio, la innovación y la generación de empleo en sus áreas de influencia.

La infraestructura ferroviaria, además de su función de transporte, puede actuar como un catalizador para la formación de clústeres económicos especializados, fomentando sinergias entre empresas, instituciones y centros de conocimiento. En este contexto, resulta fundamental diseñar e implementar estrategias de desarrollo económico que maximicen los beneficios derivados de la conectividad ferroviaria, promoviendo la competitividad territorial, la diversificación productiva y la sostenibilidad.

Un caso paradigmático de éxito en este ámbito es el proyecto Crossrail (actualmente conocido como Elizabeth Line) en Londres, Reino Unido. Esta iniciativa, una de las más ambiciosas en materia de infraestructura ferroviaria en Europa, fue concebida para mejorar sustancialmente la capacidad y eficiencia del sistema de transporte metropolitano. Iniciado en 2009 e inaugurado en 2022, Crossrail ha transformado la movilidad urbana y ha generado un impacto económico profundo y sostenido.

La Elizabeth Line conecta de manera transversal zonas clave del este y oeste de Londres, atravesando el núcleo urbano. Esta línea de alta capacidad ha reducido significativamente los tiempos de desplazamiento, mejorado la accesibilidad y descongestionado otras líneas del sistema de transporte público. Como resultado, se ha facilitado el acceso a oportunidades laborales, educativas y de servicios, beneficiando tanto a residentes como a visitantes.

El impacto económico ha sido notable: las zonas adyacentes a las nuevas estaciones han experimentado un incremento en el valor del suelo y de los activos inmobiliarios, así como un aumento en la inversión comercial. Un ejemplo destacado es la estación de Canary Wharf, que ha sido objeto de un proceso intensivo de desarrollo urbano, con la construcción de nuevos edificios de oficinas, espacios residenciales y equipamientos comerciales. Este entorno ha atraído a empresas multinacionales y ha generado miles de empleos, consolidando un nodo económico de escala internacional.



Figura 9. Recreación virtual Elizabeth Line Estación Canary Wharf – Londres. Fuente: Crossrail

Asimismo, Crossrail ha actuado como motor de regeneración urbana. Áreas previamente subutilizadas o en declive, como Tottenham Court Road, han sido revitalizadas mediante intervenciones integrales que incluyen la mejora del espacio público, la modernización de infraestructuras y la creación de entornos urbanos más atractivos y funcionales.

Desde una perspectiva ambiental, el proyecto ha incorporado principios de sostenibilidad en todas sus fases. La línea opera con trenes eléctricos de alta eficiencia energética y ha adoptado medidas para mitigar el impacto ambiental durante la construcción. Además, la mejora en la conectividad ha incentivado un cambio modal desde el vehículo privado hacia el transporte público, contribuyendo a la reducción de emisiones de carbono y a la mejora de la calidad del aire en la ciudad.

### 5.2.3. Ferrocarril y sostenibilidad urbana: una estrategia integral para la movilidad baja en carbono

El ferrocarril representa una alternativa de transporte significativamente más sostenible en comparación con el vehículo privado, al contribuir de manera directa a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la mitigación de la congestión vial. La promoción del transporte público ferroviario se alinea con los objetivos globales de lucha contra el cambio climático, al tiempo que mejora la calidad del aire y la salud pública en entornos urbanos densamente poblados.

La integración del ferrocarril en los sistemas de movilidad urbana favorece un cambio modal hacia medios de transporte más sostenibles, disminuyendo la dependencia del automóvil y fomentando patrones de movilidad activa. Este enfoque no solo reduce la huella ambiental del transporte, sino que también promueve estilos de vida más saludables y resilientes. En este contexto, la planificación y el diseño de infraestructuras ferroviarias deben incorporar principios de sostenibilidad, incluyendo el uso de tecnologías limpias, eficiencia energética, electrificación de redes y la utilización de fuentes de energía renovable.

Un ejemplo destacado de integración ferroviaria sostenible es la ciudad de Friburgo, en Alemania, reconocida internacionalmente por su enfoque pionero en movilidad urbana sostenible. Friburgo ha desarrollado una red de tranvías electrificados de alta eficiencia, plenamente integrada con las líneas ferroviarias regionales y nacionales. Esta conectividad multimodal ha permitido una movilidad fluida, accesible y ambientalmente responsable tanto para residentes como para visitantes.

La red de tranvías de Friburgo opera con electricidad proveniente de fuentes renovables, lo que ha contribuido de forma significativa a la reducción de emisiones de carbono y a la mejora de la calidad del aire. Además, la ciudad ha implementado políticas de planificación urbana orientadas al desarrollo orientado al transporte (Transit-Oriented Development, TOD), promoviendo una alta densidad de usos mixtos en torno a las estaciones de transporte público. Estas zonas integran viviendas, comercios y servicios, reduciendo la necesidad de desplazamientos en vehículo privado y facilitando el acceso a la movilidad sostenible.

Asimismo, Friburgo ha priorizado la infraestructura para peatones y ciclistas, consolidando un modelo de ciudad compacta, accesible y saludable. Esta estrategia ha generado beneficios económicos tangibles, como el aumento del valor inmobiliario, la atracción de inversiones sostenibles y el fortalecimiento de clústeres económicos en torno a los nodos de transporte.

El sistema de transporte eficiente y bajo en carbono ha elevado la calidad de vida de los habitantes, posicionando a Friburgo como un referente internacional en sostenibilidad urbana y movilidad inteligente. Su experiencia demuestra que la integración del ferrocarril, cuando se articula con políticas urbanas coherentes, puede ser un instrumento poderoso para alcanzar ciudades más verdes, inclusivas y competitivas.

#### 5.2.4. Optimización de la Movilidad Urbana a través de la Expansión Ferroviaria

La expansión de las redes ferroviarias urbanas constituye una estrategia fundamental para abordar los desafíos contemporáneos de movilidad en entornos metropolitanos densamente poblados. Al proporcionar una alternativa de transporte público de alta capacidad, eficiente y confiable, el ferrocarril urbano permite reducir significativamente los tiempos de desplazamiento, mejorar la accesibilidad territorial y elevar la calidad de vida de la población. Asimismo, una movilidad urbana más eficiente incide positivamente en la cohesión social, al facilitar el acceso equitativo a oportunidades laborales, educativas y de servicios esenciales.

Desde una perspectiva de planificación, la movilidad debe abordarse de manera integral, incorporando principios de intermodalidad y conectividad entre los distintos modos de transporte —ferrocarril, autobuses, tranvías, bicicletas y movilidad peatonal— con el objetivo de garantizar una experiencia de viaje fluida, accesible y ambientalmente sostenible.

Un caso paradigmático de éxito en la mejora de la movilidad urbana mediante la integración ferroviaria es el sistema Mass Transit Railway (MTR) de Hong Kong. Este sistema, reconocido internacionalmente por su eficiencia operativa, cobertura territorial y sostenibilidad financiera, ha transformado de manera sustancial la movilidad en la región.

El MTR conecta de forma eficaz diversas zonas urbanas y suburbanas, reduciendo de manera significativa los tiempos de viaje y mejorando la accesibilidad para millones de usuarios diarios. Su elevada frecuencia, puntualidad y fiabilidad lo han consolidado como la opción preferente frente al transporte por carretera, contribuyendo a la descongestión del tráfico y a la reducción de emisiones contaminantes.

Uno de los elementos clave del éxito del MTR es su integración funcional con otros modos de transporte, como autobuses, minibuses y tranvías, lo que permite una intermodalidad eficiente. Esta conectividad ha fortalecido la cohesión social al ampliar el acceso a oportunidades en toda la región metropolitana, especialmente para sectores con menor acceso a transporte privado.

La planificación del sistema ha sido holística, considerando no solo la eficiencia del transporte, sino también su impacto en el desarrollo urbano sostenible. Las zonas adyacentes a las estaciones han sido objeto de intervenciones urbanísticas orientadas al desarrollo de alta densidad y uso mixto, lo que ha facilitado el acceso a servicios, reducido la necesidad de desplazamientos motorizados y promovido una ciudad más compacta y habitable.

Desde una perspectiva económica, el impacto del MTR ha sido igualmente significativo. Las áreas circundantes a las estaciones han experimentado un notable incremento en el valor del suelo y en la inversión inmobiliaria y comercial. Este dinamismo ha generado empleo, impulsado el crecimiento económico local y consolidado un modelo de desarrollo urbano basado en la movilidad sostenible.

El caso de Hong Kong demuestra que un sistema ferroviario bien planificado, integrado y gestionado puede constituir un instrumento transformador para la movilidad urbana, la equidad social y el desarrollo económico sostenible, sirviendo como referencia para otras ciudades que buscan transitar hacia modelos de transporte más resilientes y sostenibles.

## 6. DISEÑO DE UN MARCO METODOLÓGICO BASADO EN EL ANÁLISIS MULTICRITERIO

La toma de decisiones en contextos empresariales y gubernamentales requiere herramientas que permitan estructurar problemas complejos y evaluar alternativas.

Los análisis multicriterio (MCDA) se han utilizado históricamente en la selección de alternativas para proyectos ferroviarios debido a su capacidad para gestionar la complejidad y multidimensionalidad inherentes a estos proyectos.

En palabras de Moreno-Jiménez (1996),

*“se entiende por Decisión multicriterio, el conjunto de aproximaciones, métodos, modelos, técnicas y herramientas dirigidas a mejora la calidad integral de los procesos de decisión seguidos por los individuos y sistemas, esto es a mejorar la efectividad, eficacia y eficiencia de los procesos de decisión y a incrementar el conocimiento de los mismos (valor añadido del conocimiento)”* .

Como se ha comentado anteriormente, Hwang y Yoon (1981) propusieron una clasificación de los métodos MCDM en dos tipos: métodos de decisión multi-atributo (MADM) o discretos, propios de la Escuela Americana y métodos de decisión multi-objetivo (MODM) o continuos, propios de la Escuela Europea. La diferencia fundamental entre ambos grupos radica en la naturaleza y la cantidad de alternativas a evaluar:

- **Métodos de toma de decisión multi-atributo (*Multi-attribute decision-making, MADM*)**. El análisis multicriterio discreto se utiliza cuando el número de alternativas que el decisor debe evaluar es limitado y generalmente pequeño. Esto lo hace especialmente útil en situaciones donde las alternativas están claramente definidas y no son demasiadas, permitiendo una evaluación detallada de cada una. Dentro de este grupo se incluyen métodos como Electre, Promethee, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y el Proceso Analítico en Red (ANP).
- **Métodos de toma de decisión multi-objetivo (*Multiobjective decision-making, MODM*)**. Los análisis multicriterio continuos son más adecuados para problemas donde las alternativas no están predefinidas y se busca encontrar la mejor solución dentro de un rango continuo de opciones. Estos incluyen técnicas como la programación lineal multicriterio, la programación por metas y la optimización multiobjetivo.



Tal y como indica Víctor Yepes Piqueras (UPV, 2018) en su artículo “*Clasificación de los métodos de toma de decisión multicriterio multiatributo*”, los métodos MADM pueden clasificarse según el tipo de información inicial (determinista, estocástica o incierta) o según los grupos de decisores (un solo grupo o varios grupos). Sin embargo, la clasificación más común es la propuesta por Hajkwociz y Collins (2007) y De Brito y Evers (2016), que incluye los siguientes métodos:

- **Métodos de puntuación directa (*Scoring Methods*):** Son los más simples y se basan en evaluar las alternativas mediante operaciones aritméticas básicas. SAW y COPRAS son ejemplos de estos métodos. SAW, siendo más antiguo, se utiliza cuando se desea maximizar un criterio. COPRAS, una evolución de SAW, se aplica tanto para maximizar como para minimizar criterios.
- **Métodos basados en la distancia (*Distance-based Methods*):** Calculan la distancia entre cada alternativa y un punto específico. El método GP busca la alternativa que cumpla un conjunto de metas, mientras que el método CP busca la alternativa más cercana al punto óptimo hipotético. VIKOR y TOPSIS, basados en CP, se diferencian en la normalización de los criterios; VIKOR considera la distancia a la solución ideal, mientras que TOPSIS considera tanto la distancia a la solución ideal como a la no ideal.
- **Métodos de comparación por pares (*Pairwise Comparision Methods*):** Son útiles para obtener los pesos de los diferentes criterios y evaluar criterios subjetivos comparando las alternativas entre sí. AHP, uno de los métodos más utilizados, fue el primero en desarrollarse. ANP es una evolución de AHP que permite usar criterios dependientes entre sí. MACBETH es similar a AHP pero con diferencias conceptuales.
- **Métodos de superación (*Outranking Methods*):** Establecen una relación de preferencia entre un conjunto de soluciones, mostrando un grado de dominación sobre las otras respecto a un criterio. Estos métodos pueden manejar información incompleta y difusa, permitiendo clasificar las alternativas según la relación de preferencia. PROMETHEE y ELECTRE son ejemplos de este grupo.
- **Métodos basados en funciones de utilidad o valor (*utility/value methods*):** Como MAUT (utilidad) y MAVT (valor), definen funciones que determinan el grado de satisfacción de una alternativa respecto a un criterio. Estas funciones convierten



las valoraciones de las alternativas en un grado de satisfacción para cada criterio. MIVES es un derivado de estos métodos, proporcionando ecuaciones que definen las diferentes funciones de satisfacción.

Grupo MADM	Método MADM
Métodos de puntuación directa	Simple additive weighting (SAW)
	Complex proportional assessment (COPRAS)
Métodos basados en la distancia	Goal programming (GP)
	Compromise programming (CP)
	Technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)
	Multicriteria optimization and compromise solution (VIKOR)
Métodos de comparación por pares	Analytic hierarchy process (AHP)
	Analytic network process (ANP)
	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH)
Métodos de superación	Preference ranking organization method for enrichment of evaluations (PROMETHEE)
	Elimination and choice expressing reality (ELECTRE)
Métodos basados en funciones de utilidad o valor	Multi-attribute utility theory (MAUT)
	Multi-attribute value theory (MAVT)
	Modelo integrado de valor para evaluaciones sostenibles (MIVES)

Figura 10. Clasificación de los métodos MADM (Penadés-Plà et al., 2016) – Víctor Yepes (UPV, 2018)

Numerosos investigadores han explorado exhaustivamente cada uno de estos métodos, destacando las ventajas que ofrecen cada uno de ellos. Sin embargo, el propósito de este TFM no es profundizar en el análisis detallado de los métodos de análisis multicriterio, sino identificar las metodologías más adecuadas para abordar la integración del ferrocarril en las ciudades donde las soluciones a evaluar suponen un reto importante al combinar tanto aspectos cuantitativos, como cualitativos.

Se considera que los análisis multicriterio discretos son métodos que pueden resultar más adecuados para la toma de decisiones en soluciones ferroviarias, especialmente cuando se trata de evaluar un número limitado de alternativas claramente definidas. Esto permite una evaluación detallada y comparativa de cada opción, lo cual es crucial en proyectos específicos como la selección de trazados o tecnologías ferroviarias.

Además, estos métodos son altamente versátiles y pueden adaptarse a diversos contextos y tipos de problemas, permitiendo la inclusión de una amplia gama de criterios y subcriterios. En el ámbito de los proyectos ferroviarios, esta versatilidad es esencial para abordar las diversas restricciones y oportunidades específicas de cada entorno urbano.

Asimismo, estos métodos proporcionan un marco transparente y riguroso para la toma de decisiones, lo cual es crucial en proyectos de gran envergadura y con múltiples partes interesadas (*stakeholders*).

### **6.1. Factores a considerar en un análisis multicriterio**

Antes de profundizar en el análisis de los métodos de decisión más adecuados para abordar la integración del ferrocarril en entornos urbanos consolidados, es crucial identificar los factores clave que deben considerarse en el proceso de toma de decisiones.

- **Alternativas (A).** Las alternativas representan diferentes propuestas para abordar un mismo problema. Estas deben derivarse de una exploración sistemática de los objetivos perseguidos. En el contexto de los métodos multicriterio discretos, se definirá un número finito de alternativas, siendo esencial no plantear un número excesivo que pueda complicar innecesariamente el proceso y, por ende, la selección de la solución más adecuada. Cada alternativa debe describirse con precisión, detallando su fundamento y las características que la distinguen de las demás propuestas.
- **Criterios de decisión (C).** Tal y como se ha descrito anteriormente, es fundamental establecer las condiciones que permitan discriminar entre las alternativas y definir una serie de preferencias para el decisor. Los criterios actúan como puntos de referencia sobre los cuales se basará la decisión. En el ámbito de la ingeniería, se reconoce que cada proyecto es único, y las soluciones deben adaptarse a las particularidades del entorno urbano en el que se desarrollan. Por lo tanto, la selección de los criterios es un paso crucial en el proceso de toma de decisiones multicriterio.
- **Pesos (w).** Sirven para poder cuantificar la importancia que cada uno de los criterios tiene para el decisor. Existen múltiples formas de asignar los pesos en análisis multicriterio:
  - i. Método de asignación directa. Este método implica que los decisores asignen directamente un peso a cada criterio basado en su juicio y experiencia. Por tanto, el decisor asigna de manera explícita y directa un valor numérico a cada criterio, reflejando su importancia relativa en

el contexto del problema de decisión. Estos pesos pueden ser asignados en una escala ordinal (por ejemplo, del 1 al 10) o en una escala de razón (por ejemplo, porcentajes que sumen 100%).

- ii. Método de Entropía: Basado en la teoría de la información, este método evalúa la cantidad de incertidumbre o diversidad presente en los datos. Un criterio recibirá un mayor peso si muestra una mayor variabilidad en las evaluaciones de las alternativas.
- iii. Método de Regresión: Emplea técnicas estadísticas para asignar pesos a los criterios, utilizando datos históricos o analizando la relación entre los criterios y los resultados esperados.
- iv. Método de Análisis de Componentes Principales (PCA): Este método reduce la dimensionalidad de los datos y asigna pesos a los criterios basándose en las componentes principales que explican la mayor parte de la variabilidad en los datos.
- v. Método del Autovector: Se fundamenta en el cálculo del autovector principal de una matriz de comparaciones pareadas, reflejando así las preferencias del decisor.

Una vez definidas las alternativas, criterios y pesos asociados, el decisor puede construir un **matriz de evaluación** que le ayudará en la toma de decisión y la elección de la solución más adecuada donde las filas son las alternativas y las columnas son los criterios:

**Matriz de Evaluación (X)**

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} \end{pmatrix}$$

**Vector de Pesos ( $\gamma$ )**

$$\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_j)$$

**Matriz de Evaluación Normalizada (N)**

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} \end{pmatrix} \rightarrow N = \begin{pmatrix} n_{11} & \dots & n_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{i1} & \dots & n_{ij} \end{pmatrix}$$

Figura 11. Matriz de decisión. Fuente: Modelos Avanzados en Ingeniería Civil II – UE. Profesor: José Luís López Oliete.

Donde:

- $A_i$ : alternativas propuestas
- $C_j$ : criterios que se utilizarán para analizar cada alternativa  $A_i$
- Vector de Medición. Cada alternativa  $A_i$  quedará caracterizada por un vector fila  $x_i = (x_{i1}, x_i, \dots, x_{ij})$ , que da la medición de la alternativa según cada criterio.
- **Vector de Pesos.** La importancia relativa de cada criterio viene definida mediante un vector de pesos  $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_j)$ . Estos pesos se normalizan, es decir,  $\sum_{j=1} \gamma_j = 1$ .

## 6.2. Propuesta metodológica para aborda la problemática objeto de estudio

En el presente trabajo fin de máster se propone la utilización de un enfoque metodológico que combina dos herramientas de decisión multicriterio, el método AHP (Analytic Hierarchy Process) y el método VIKOR, como marco analítico para abordar los complejos procesos de integración del ferrocarril en áreas urbanas consolidadas. La sinergia entre estos métodos permite gestionar de manera sistemática y rigurosa la toma de decisiones en contextos donde interactúan múltiples factores y perspectivas.

### 6.2.1. El método AHP: análisis jerárquico como base para la toma de decisiones

El método AHP es una herramienta que descompone un problema complejo en una estructura jerárquica de objetivos, criterios y subcriterios, lo que permite un análisis estructurado de las alternativas disponibles. Mediante la comparación por pares, el AHP facilita la evaluación cualitativa y cuantitativa de los criterios implicados, asignando pesos relativos en función de su importancia. Este método se fundamenta en la capacidad para integrar juicios subjetivos en una base matemática sólida, derivando los pesos a través del cálculo de autovectores.

En el ámbito de la integración ferroviaria en entornos urbanos, el AHP resulta especialmente útil para:

- Estructurar el problema de decisión organizando criterios relevantes, como impacto ambiental, viabilidad técnica, costos de implementación, aceptación social y contribución a la mejora de la movilidad urbana.
- Evaluar prioridades que permite identificar la relevancia relativa de cada criterio a partir de valoraciones proporcionadas por expertos o grupos de interés, logrando un análisis transparente y fundamentado.

- Proveer una base cuantitativa mediante los pesos derivados que reflejan la prioridad de cada criterio, lo que facilita su integración en etapas posteriores del análisis.

#### 6.2.2. El método VIKOR: enfoque para soluciones de compromiso

El método VIKOR complementa al AHP al enfocarse en la selección de alternativas que se aproximen de manera equilibrada a la solución ideal, definida como el mejor desempeño teórico en todos los criterios evaluados. Este enfoque es particularmente relevante en situaciones donde las decisiones implican resolver conflictos entre múltiples objetivos, considerando tanto la distancia a la solución ideal como a la no ideal.

En el contexto de la integración ferroviaria, el método VIKOR permite:

- Evaluar alternativas globalmente analizando su desempeño respecto a los pesos asignados en la etapa previa mediante el AHP.
- Identificar soluciones de compromiso ya que proporciona alternativas que equilibran las prioridades, favoreciendo aquellas que optimizan los beneficios y minimizan los impactos negativos.
- Incorporar diferentes perspectivas pues permite considerar los intereses de múltiples actores, lo que es clave en proyectos urbanos donde la diversidad de opiniones y valores está presente en prácticamente, la totalidad de los casos.

#### 6.2.3. Integración metodológica AHP-VIKOR

La metodología propuesta integra ambos métodos en un proceso secuencial. Inicialmente, el AHP se utiliza para establecer una jerarquía estructurada del problema, identificar los criterios relevantes y asignarles un peso relativo. Posteriormente, el método VIKOR emplea esta ponderación para evaluar las alternativas disponibles y determinar cuál de ellas representa un compromiso adecuado entre las diferentes prioridades.

Tanto el AHP como el VIKOR son métodos bien establecidos y ampliamente aceptados en la literatura académica y en la práctica profesional. Su combinación ha sido validada en numerosos estudios y aplicaciones, lo que proporciona una base sólida para su uso en estudios de integración ferroviaria.

El enfoque AHP-VIKOR destaca por:

- Rigor analítico. Combina la descomposición estructurada del problema con un análisis multicriterio orientado a soluciones.

- Capacidad de gestión de conflictos. Facilita la identificación de soluciones aceptables para un conjunto amplio de actores.
- Flexibilidad metodológica. Es aplicable a contextos diversos, permitiendo la integración de criterios tanto cuantitativos como cualitativos.

La elección de este enfoque metodológico responde a la necesidad de gestionar de forma eficiente los retos asociados a la integración ferroviaria en entornos urbanos consolidados, caracterizados por la interacción de múltiples criterios en conflicto, muchos de ellos de carácter subjetivo y la participación de actores con intereses diversos.

Entre las principales ventajas de este marco se destacan:

- Sistematización del análisis. El método AHP proporciona una estructura clara para descomponer el problema, mientras que el VIKOR ofrece un mecanismo robusto para la selección de alternativas.
- Equilibrio entre criterios. El enfoque permite considerar de forma simultánea criterios cuantitativos y cualitativos, asegurando una evaluación integral.
- Facilitación del consenso. La capacidad del método VIKOR para identificar soluciones de compromiso contribuye a la aceptación de los resultados por parte de diferentes grupos de interés.
- Razonabilidad y transparencia. La combinación de métodos asegura que el proceso de toma de decisiones sea trazable y defendible desde una perspectiva académica y profesional.

## **7. IDENTIFICACIÓN Y CATEGORIZACIÓN DE LOS CRITERIOS CLAVE PARA LA INTEGRACIÓN FERROVIARIA EN ENTORNOS URBANOS CONSOLIDADOS**

La incorporación del sistema ferroviario en contextos urbanos consolidados constituye un proceso de alta complejidad que exige un análisis riguroso, multidimensional y contextualizado. Este tipo de intervenciones no solo implica desafíos técnicos y económicos, sino también una profunda interacción con las dinámicas sociales, territoriales y ambientales del entorno urbano. Para garantizar que las soluciones propuestas sean viables y sostenibles, resulta imprescindible identificar y estructurar de manera sistemática los factores críticos que inciden en la planificación y el diseño de estas infraestructuras.

La definición y clasificación de estos criterios permite establecer una base metodológica sólida que facilita la organización lógica del análisis, así como la comparación objetiva entre distintas alternativas de intervención. Esta estructuración no solo mejora la comprensión del contexto urbano y ferroviario, sino que también optimiza la toma de decisiones en escenarios de alta incertidumbre y complejidad. Tal enfoque ha sido ampliamente respaldado por la literatura especializada, que destaca la necesidad de integrar herramientas de análisis multicriterio en la evaluación de proyectos de infraestructura urbana compleja (*“Ferrocarril de alta velocidad: impactos socioeconómicos, efectos territoriales y oportunidades de renovación urbana”*. Herce Vallejo, 2020 CIUDAD Y TERRITORIO Estudios Territoriales, XLI (159) 2009).

En este marco, el proceso de identificación y categorización de criterios constituye el fundamento para la aplicación de metodologías de análisis multicriterio (AMC), como el AHP (Analytic Hierarchy Process) o el método ELECTRE, ampliamente utilizados en la evaluación de proyectos de transporte urbano. Estas metodologías permiten integrar de forma equilibrada las distintas dimensiones del problema, asegurando que todas las perspectivas relevantes —incluidas las necesidades del sistema ferroviario y las particularidades del entorno urbano— sean consideradas de manera equitativa. Así, se promueve el desarrollo de soluciones integradas que respondan de forma coherente a los desafíos de sostenibilidad, resiliencia y equidad urbana (Macharis et al., 2009).

Además, la implementación de herramientas analíticas avanzadas, como los sistemas de información geográfica (SIG), modelos de simulación urbana y técnicas de evaluación participativa, fortalece la capacidad de los planificadores para anticipar impactos, gestionar conflictos de interés y fomentar procesos de toma de decisiones más inclusivos y transparentes. En este sentido, estudios como el de Reyes Pavón (2023) han demostrado cómo la infraestructura ferroviaria puede actuar como catalizador de transformación urbana, siempre que se integre de manera coherente con las dinámicas sociales y espaciales del territorio.

En definitiva, la integración del sistema ferroviario en entornos urbanos consolidados requiere un enfoque metodológico robusto, interdisciplinario y adaptativo, que articule de manera coherente los distintos niveles de análisis y promueva soluciones sostenibles, resilientes y socialmente aceptables. Solo a través de esta perspectiva integral será posible avanzar hacia modelos de movilidad urbana más eficientes, equitativos y respetuosos con el entorno construido y natural.

### **7.1. Definición de Criterios para el Análisis Multicriterio**

Para asegurar la validez, la transparencia y la utilidad práctica de los resultados derivados del análisis multicriterio, es fundamental que los criterios seleccionados cumplan con una serie de propiedades metodológicas esenciales. Estas características garantizan la coherencia del proceso evaluativo y permiten una comparación objetiva entre las distintas alternativas analizadas.

A continuación, se describen los principios que deben regir la formulación de dichos criterios:

- **Medibles y Objetivos**

Cada criterio debe estar claramente definido y ser cuantificable, ya sea mediante indicadores numéricos o, en su defecto, a través de escalas cualitativas estandarizadas. Esta condición es indispensable para asegurar la transparencia del proceso evaluativo y su replicabilidad en distintos contextos.

- **Independientes**

Los criterios deben ser mutuamente excluyentes en cuanto a su contenido evaluativo, evitando redundancias o solapamientos conceptuales. La independencia entre criterios minimiza el riesgo de sesgos en la ponderación y mejora la precisión del análisis.



- **Relevantes**

Todo criterio incluido debe estar directamente relacionado con los objetivos del estudio y tener un impacto significativo en la evaluación de las alternativas. La inclusión de criterios irrelevantes puede distorsionar los resultados y dificultar la toma de decisiones fundamentada.

- **Comparables**

Los criterios deben estar formulados de manera que permitan una comparación coherente y uniforme entre todas las alternativas evaluadas. Esto implica la utilización de escalas homogéneas y metodologías de evaluación consistentes.

- **Completo**

El conjunto de criterios debe abarcar de forma integral todas las dimensiones relevantes del problema de decisión. La omisión de factores clave puede comprometer la validez del análisis y conducir a conclusiones incompletas o sesgadas.

- **Sencillos y Comprensibles**

A pesar de la complejidad inherente al análisis multicriterio, los criterios deben ser formulados de manera comprensible y accesible tanto para expertos como para otros actores involucrados en el proceso decisional. Esta claridad favorece la comunicación de los resultados y su aceptación por parte de las partes interesadas.

- **Sensibles**

Los criterios deben ser capaces de reflejar adecuadamente las diferencias entre las alternativas, permitiendo identificar con claridad sus fortalezas y debilidades relativas. Esta propiedad es esencial para garantizar la utilidad práctica del análisis en contextos de planificación y toma de decisiones.

## 7.2. Criterios Técnicos (CT)

Los criterios técnicos constituyen un componente fundamental en la evaluación y diseño de soluciones ferroviarias, ya que garantizan que las propuestas sean operativamente funcionales, estructuralmente seguras y plenamente compatibles con la infraestructura urbana existente.

Esta categoría de criterios abarca aspectos clave relacionados con el rendimiento del sistema, la seguridad operacional y la integración física y funcional con el entorno construido:

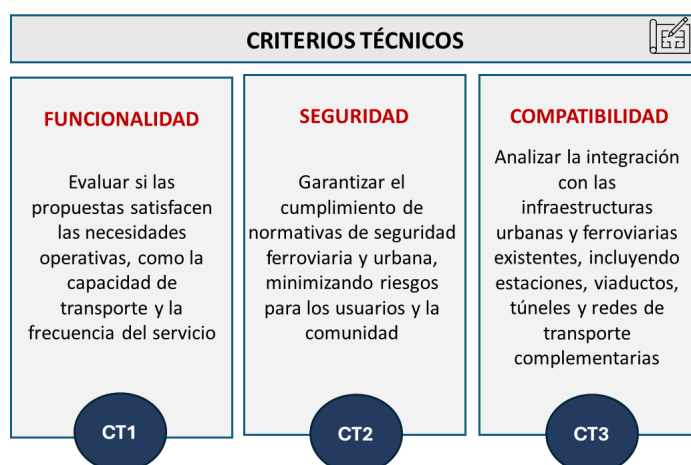


Figura 12. Principales Criterios Técnicos a considerar. Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, el diseño del sistema ferroviario debe orientarse a la optimización de la funcionalidad y del rendimiento operativo, lo que implica la reducción de los tiempos de desplazamiento, la maximización de la capacidad de transporte y la mejora de la eficiencia en la conectividad intermodal. La interoperabilidad con otros modos de transporte urbano — como autobuses, tranvías o sistemas de micromovilidad— es esencial para garantizar una red de movilidad integrada y resiliente.

En términos de seguridad, la infraestructura debe cumplir con los más altos estándares técnicos, incorporando tecnologías avanzadas de señalización, control automático de trenes y sistemas de supervisión en tiempo real. Además, es necesario prever medidas de mitigación de riesgos que aborden de forma proactiva las posibles interacciones conflictivas con peatones, vehículos y otras actividades urbanas, especialmente en zonas de alta densidad.

Por otro lado, la compatibilidad con el entorno urbano consolidado exige un enfoque de diseño sensible al contexto. Esto implica minimizar las interferencias físicas, visuales y acústicas con la infraestructura preexistente, al tiempo que se identifican oportunidades para la regeneración urbana. La integración ferroviaria puede actuar como un vector de transformación positiva, revitalizando espacios públicos, incentivando el desarrollo económico local y contribuyendo a la mejora de la calidad de vida de los residentes.

En conjunto, estos criterios técnicos no solo aseguran la viabilidad operativa del sistema ferroviario, sino que también refuerzan su papel como instrumento de desarrollo urbano sostenible y cohesionado.

### **CT1: Funcionalidad**

Tal y como se ha indicado, el sistema debe estar diseñado para cumplir eficientemente con su propósito de transporte, teniendo en cuenta:

- **Capacidad y frecuencia:** Es esencial que el diseño del ferrocarril esté alineado con el volumen proyectado de pasajeros y/o mercancías, garantizando que su capacidad sea suficiente para satisfacer la demanda en períodos de alta afluencia sin comprometer la calidad del servicio. Asimismo, la frecuencia del sistema debe ser planificada estratégicamente para minimizar los tiempos de espera, optimizando la experiencia del usuario y maximizando la productividad del transporte. Esto implica el uso de tecnologías avanzadas en la gestión del tráfico ferroviario, como sistemas automáticos de señalización y control que permitan ajustar dinámicamente los intervalos entre trenes según las fluctuaciones en la demanda.
- **Intermodalidad:** La funcionalidad del ferrocarril se potencia significativamente cuando se integra de manera eficiente con otros sistemas de transporte urbano, promoviendo una movilidad multimodal y sostenible. Esta interconectividad implica la creación de nodos de transferencia que permitan conexiones fluidas entre el ferrocarril y otros modos de transporte, tales como autobuses, metros, tranvías y bicicletas. Además, se deben diseñar estaciones que faciliten la accesibilidad universal, optimicen los tiempos de transferencia y promuevan el uso combinado de diferentes medios de transporte, contribuyendo a una experiencia de movilidad más ágil y coherente.
- **Adaptabilidad:** El diseño del sistema ferroviario debe prever la capacidad de adaptación frente a las necesidades cambiantes de la población y los patrones de desarrollo urbano. Esto incluye la flexibilidad para realizar ampliaciones de la red,

aumentar la capacidad de las estaciones o implementar actualizaciones tecnológicas que mejoren la eficiencia del servicio. La infraestructura y los sistemas asociados deben ser diseñados con una visión de largo plazo, utilizando configuraciones modulares y escalables que permitan acomodar cambios en la densidad demográfica, la expansión de áreas urbanas o el aumento en la demanda de transporte sin incurrir en costos disruptivos.

## **CT2: Seguridad**

La integración de un sistema ferroviario en zonas urbanas consolidadas debe priorizar criterios rigurosos de seguridad, considerando que este aspecto es esencial para garantizar el bienestar de los usuarios, la protección del personal operativo y la preservación del entorno urbano. Esto implica el cumplimiento de estándares nacionales e internacionales de seguridad ferroviaria, así como la implementación de tecnologías avanzadas y protocolos operativos que minimicen riesgos y mitiguen posibles impactos negativos.

El diseño de una infraestructura ferroviaria segura implica una planificación y construcción que minimicen los riesgos de accidentes y promuevan la seguridad integral. Las vías deben estar protegidas mediante barreras físicas, sistemas de detección de obstáculos y otras medidas que reduzcan el riesgo de intrusión o accidentes en las zonas operativas. Las estaciones deben contar con accesos a los andenes controlados y una señalización clara para orientar a los usuarios y prevenir accidentes. Además, es fundamental eliminar los cruces ferroviarios a nivel, sustituyéndolos por pasos elevados o soterramientos que reduzcan los conflictos entre trenes, vehículos y peatones.

La gestión del tráfico ferroviario requiere la implementación de tecnologías avanzadas para asegurar tanto la seguridad operativa como la eficiencia del sistema. Los sistemas de señalización inteligente utilizan control automatizado para supervisar en tiempo real la posición de los trenes, permitiendo la detección temprana de posibles colisiones o incidentes. La operación centralizada implica la integración de centros de control ferroviario que coordinan y supervisan las operaciones en toda la red, ajustando frecuencias y trayectorias para evitar conflictos y garantizar la fluidez del tránsito. Además, la redundancia tecnológica es crucial, incorporando sistemas de respaldo que aseguren la continuidad de la operación en caso de fallos en los equipos principales.

La capacidad para responder eficazmente a situaciones críticas es un componente indispensable en el diseño y operación de sistemas ferroviarios. Los planes de evacuación deben incluir protocolos que contemplen rutas claras y seguras para evacuar a los usuarios en caso de emergencias, considerando escenarios como incendios, descarrilamientos o atentados terroristas. Es esencial contar con equipamiento de emergencia, como extintores, alarmas, sistemas de comunicación y otros dispositivos para la rápida gestión de incidentes. Además, la capacitación continua del personal operativo y la realización periódica de simulacros de emergencia son fundamentales para garantizar una respuesta ágil y coordinada.

### CT3: Compatibilidad con la infraestructura existente

La integración armónica de un sistema ferroviario en áreas urbanas consolidadas requiere un enfoque técnico que priorice la adaptación al contexto urbano existente y la minimización de los impactos negativos asociados a la infraestructura. Este proceso debe ser cuidadosamente planificado y ejecutado para garantizar que el ferrocarril se convierta en un elemento funcional y estético que aporte valor al entorno en lugar de generar conflictos.

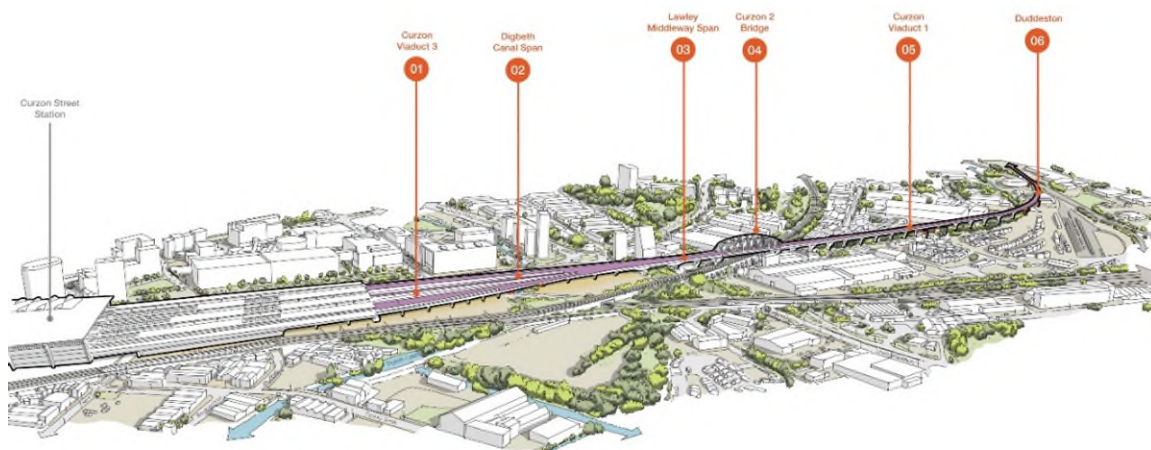


Figura 13. Corredor propuesta alta velocidad en Birmingham. Reino Unido. Fuente: WW+P

La minimización de interferencias es crucial en el diseño del trazado ferroviario para reducir al máximo las afectaciones a la infraestructura urbana existente y planeada. Esto incluye la realización de análisis de viabilidad técnica, que evalúan las posibles interferencias con edificios, carreteras y otras infraestructuras críticas, proponiendo alternativas que minimicen estos impactos. También es esencial la protección de servicios públicos, identificando y reubicando estratégicamente redes de agua potable, saneamiento, gas, electricidad y telecomunicaciones para garantizar su continuidad durante y después de la construcción.

Además, es fundamental colaborar con autoridades locales y urbanistas para integrar el proyecto ferroviario dentro de los planes de desarrollo urbano, respetando reservas viales y planes de expansión.

Además, la optimización del uso del suelo es crucial en zonas urbanas densamente pobladas. Para lograr un uso eficiente del espacio urbano, se pueden incorporar soluciones tridimensionales, como trazados elevados en viaductos que eviten intersecciones con la red vial y liberen espacio en superficie, o trazados soterrados mediante túneles que eliminen interferencias y preserven la funcionalidad del espacio urbano. Es importante minimizar los desplazamientos, evitando en lo posible el desalojo de residentes o la reubicación de actividades económicas mediante un diseño que aproveche corredores existentes o terrenos menos conflictivos. Además, las estaciones ferroviarias deben ser diseñadas como espacios multifuncionales, combinando servicios de transporte con áreas comerciales o recreativas para maximizar el valor del espacio utilizado.

Para evaluar el criterio CT3 se pueden utilizar diversos indicadores y métodos:

- Se debería realizar un análisis de interferencias, que consiste en identificar y cuantificar las posibles interferencias con edificios, carreteras y otras infraestructuras críticas existentes o futuras, así como evaluar la severidad de cada interferencia en una escala cualitativa (baja, media, alta).
- Puede ser fundamental proteger los servicios públicos afectados, identificando y cuantificando las redes de agua potable, saneamiento, gas, electricidad y telecomunicaciones que podrían verse afectadas, y evaluando la existencia y calidad de los planes de reubicación de estos servicios.
- Se deberá optimizar el uso del suelo, midiendo la proporción de trazados elevados o soterrados en el diseño del proyecto, y evaluando el número de residentes y actividades económicas que necesitarían ser reubicados. En este sentido, la colaboración con las autoridades locales será esencial, contabilizando las reuniones y acuerdos alcanzados con autoridades locales y urbanistas, y evaluando en qué medida el proyecto ferroviario se integra con los planes de desarrollo urbano existentes.

### 7.3. Criterios Económicos (CE)

La integración del ferrocarril en un entorno urbano consolidado representa un desafío multidimensional, siendo el aspecto económico uno de los más determinantes. Tal y como se ha comentado, este proceso implica la armonización de una infraestructura de gran escala con las características preexistentes de un tejido urbano densamente desarrollado, lo que genera una complejidad significativa en términos de planificación, ejecución y operación.

Desde un punto de vista económico, es esencial abordar estos desafíos con un enfoque que priorice tanto la viabilidad inicial, como la sostenibilidad a largo plazo, asegurando que los beneficios superen los costos asociados.

Los principales criterios económicos abarcan:



Figura 14. Principales Criterios Económicos a considerar. Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, la viabilidad inicial de los proyectos requiere un análisis exhaustivo que contemple los costes de diseño, construcción e implementación. Estos costes no solo incluyen los gastos directos relacionados con la infraestructura ferroviaria, sino también los indirectos asociados al impacto en el entorno urbano, como la necesidad de reubicación de servicios públicos, el manejo de externalidades negativas (por ejemplo, interrupciones temporales al tráfico o a la actividad económica) y las medidas para mitigar el impacto ambiental. La planificación económica debe tener en cuenta las limitaciones presupuestarias inherentes a los entornos urbanos consolidados, donde la disponibilidad de espacio y los conflictos de uso del suelo pueden incrementar significativamente los costes.

En segundo lugar, la sostenibilidad a largo plazo de las intervenciones debe evaluarse en función de su capacidad para operar de manera eficiente y generar beneficios económicos duraderos.

Esto implica considerar no solo los costes operativos y de mantenimiento de la infraestructura, sino también su capacidad para adaptarse a las demandas futuras, maximizando la eficiencia en el uso de recursos. La sostenibilidad financiera está estrechamente vinculada a la capacidad del proyecto de generar retornos tangibles e intangibles, que incluyan desde ingresos directos por tarifas hasta beneficios indirectos como el aumento en la productividad urbana, la valorización del suelo y las mejoras en la calidad de vida de la población.

Por último, la evaluación de los criterios económicos debe enmarcarse en un enfoque integral que considere tanto los aspectos cuantitativos como cualitativos. Más allá de la contabilidad de costes y beneficios inmediatos, es crucial integrar en el análisis los impactos sistémicos, como la contribución del ferrocarril a la resiliencia urbana, la reducción de desigualdades socioeconómicas y el cumplimiento de metas de desarrollo sostenible.

Estos factores no solo aumentan la justificación económica del proyecto, sino que también refuerzan su aceptación social y su alineación con los objetivos estratégicos de las ciudades.

### **CE1: Costes de implementación**

El análisis de los costes de implementación es un componente esencial en la evaluación económica en este tipo de proyectos. Este criterio abarca la identificación y estimación de los gastos necesarios para llevar a cabo las obras e intervenciones requeridas, tomando en consideración las particularidades técnicas, sociales y económicas del entorno.

A continuación, se describen con mayor detalle los aspectos clave involucrados:

- **Diseño y planificación**

La fase inicial de diseño y planificación constituye la base del éxito del proyecto. Los costes asociados incluyen:

- **Diseño.** Desarrollo de los proyectos de detalle teniendo en cuenta las particularidades del entorno urbano donde se implante la infraestructura, tales como restricciones espaciales y la integración con otras infraestructuras y modos de transporte existentes.



- Estudios de impacto ambiental. Evaluación de los efectos que el proyecto tendrá sobre el medio ambiente y la calidad de vida urbana, incluyendo medidas para mitigar impactos negativos.
  - Estudio de viabilidad. Estudios de prefactibilidad y factibilidad técnica, económica y social, que permitan determinar si el proyecto es viable y rentable.
  - Planificación urbana. Adaptación del diseño ferroviario a las dinámicas urbanas existentes, considerando aspectos como accesibilidad, conectividad con otros sistemas de transporte y compatibilidad con los planes de desarrollo urbano.
- Construcción e infraestructura

La etapa de construcción e implementación es, con frecuencia, la más costosa y compleja. Los principales componentes incluyen:

- Infraestructura ferroviaria. Construcción de estaciones, vías, puentes, túneles y otras estructuras necesarias para el funcionamiento del sistema ferroviario.
  - Sistemas de señalización, electrificación y tecnología. Implementación de sistemas avanzados de control y señalización para garantizar la seguridad y eficiencia del servicio.
  - Reubicación de servicios afectados. Modificación o reubicación de redes de servicios públicos (agua, electricidad, gas, telecomunicaciones, etc.) que interfieran con el trazado o las obras.
- Restricciones presupuestarias

En contextos urbanos consolidados, los recursos financieros son limitados y suelen competir con otras prioridades urbanas. Este factor implica:

- Evaluación de fuentes de financiamiento. Identificación de mecanismos de financiación adecuados, que pueden incluir recursos públicos, colaboración público-privada (APP) y herramientas innovadoras como bonos de infraestructura o impuestos específicos.
- Priorización de recursos. Tomar decisiones sobre qué componentes o fases del proyecto implementar primero, basándose en criterios de costo-efectividad y beneficio social.

- Impacto en la comunidad durante la ejecución

Las obras de integración ferroviaria pueden generar molestias durante el tiempo que dura la obra que, aunque no sean costes directos, deben ser considerados en la evaluación económica. Destacan:

- Interrupciones al tráfico. Cambios o desvíos temporales en las rutas de tránsito vehicular y peatonal, lo que puede aumentar los tiempos de desplazamiento y afectar la productividad.
- Impacto en la actividad económica. Afectaciones a negocios locales ubicados en las áreas de construcción, debido a la reducción del acceso y el ruido generado por las obras.

## **CE2: Costes operativos y de mantenimiento**

Una vez construida la infraestructura ferroviaria, garantizar su funcionamiento eficiente y seguro requiere una planificación económica rigurosa. Los costes operativos y de mantenimiento incluyen:

- Personal. Salarios del personal técnico, operadores y personal de mantenimiento.
- Mantenimiento y conservación de la infraestructura. Reparaciones periódicas, renovación de materiales y actualización de tecnología para garantizar la durabilidad.
- Energía y consumibles. Gastos relacionados con el consumo energético de los trenes y los sistemas asociados (iluminación, señalización, seguridad).

Un análisis detallado en esta etapa es fundamental para evitar que los costes operativos excedan los ingresos generados, poniendo en riesgo la sostenibilidad del proyecto.

## **CE3: Retorno de la inversión (ROI)**

La integración ferroviaria debe considerarse no solo como un gasto, sino como una inversión que puede generar beneficios económicos significativos a largo plazo. Este enfoque implica varios aspectos clave.

Primero, el aumento de la actividad económica local, ya que la mejora en el acceso a mercados, la generación de empleo y la atracción de inversiones son facilitadas por la conectividad que proporciona el ferrocarril.

En segundo lugar, la revalorización del suelo urbano, dado que la proximidad a estaciones ferroviarias suele incrementar el valor de las propiedades, lo que puede traducirse en mayores ingresos municipales a través de impuestos.

Por otro lado, la eficiencia económica, con la reducción de costos asociados al tráfico vehicular, como la congestión, los accidentes y la contaminación, al promover el transporte ferroviario como alternativa.

Finalmente, los beneficios sociales y ambientales, aunque indirectos, incluyen la mejora en la calidad de vida, el acceso a oportunidades laborales y la disminución de emisiones de gases contaminantes, todos los cuales tienen un impacto económico medible a lo largo del tiempo.



Figura 15. Imagen de la estación de Santa Justa en Sevilla antes de la llegada de la Alta Velocidad y después

## 7.4. Criterios Ambientales (CA)

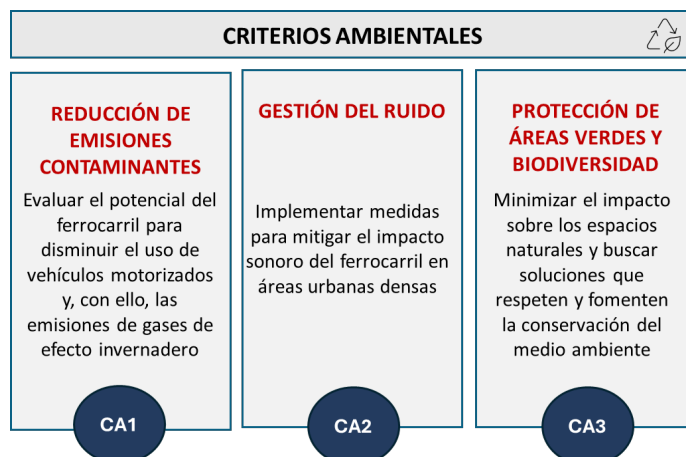


Figura 16. Principales Criterios Ambientales a considerar. Fuente: Elaboración propia.

### CA1: Reducción de emisiones contaminantes

El ferrocarril tiene el potencial de reducir significativamente el uso de vehículos motorizados, lo que a su vez disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero. Al promover el uso del tren, se puede reducir la dependencia de automóviles y camiones, que son grandes emisores de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros contaminantes. La reducción de estas emisiones contaminantes contribuye significativamente a mejorar la calidad del aire en las ciudades, lo que a su vez reduce problemas de salud pública relacionados con enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

El proyecto Crossrail en Londres se distinguió por su exhaustivo Plan de Gestión Ambiental, diseñado para minimizar los impactos negativos durante la construcción y operación del nuevo sistema ferroviario. Este plan incluyó una serie de medidas innovadoras y sostenibles. Entre las acciones más destacadas se encuentra la adopción de tecnologías de construcción con bajas emisiones, lo que ayudó a reducir significativamente la huella de carbono del proyecto. Además, se implementaron prácticas rigurosas de gestión de residuos, asegurando que los materiales fueran reciclados o eliminados de manera responsable. Para mejorar la calidad del aire y proporcionar beneficios ambientales adicionales, se crearon zonas verdes a lo largo de las áreas afectadas, contribuyendo a un entorno más saludable y agradable para los residentes y trabajadores.

## **CA2: Gestión del ruido**

El ruido es uno de los principales desafíos en la integración del ferrocarril en áreas urbanas densas. Para mitigar el impacto sonoro, se pueden implementar varias medidas, como la instalación de barreras acústicas, el uso de materiales de construcción que absorban el sonido y la optimización del diseño de las vías. Además, la modernización del material rodante, como la sustitución de frenos de hierro fundido por frenos de material compuesto, puede reducir significativamente el ruido generado por los trenes. La planificación de horarios de operación que eviten las horas nocturnas también puede minimizar la perturbación del descanso de los residentes.

Un ejemplo representativo donde se aplicaron estas medidas de mitigación del ruido ferroviario fue en el proyecto QUIET-TRACK, financiado por la Unión Europea. Para mitigar el impacto sonoro, se implementaron varias medidas. Entre ellas, la instalación de barreras acústicas a lo largo de las vías para bloquear y absorber el sonido, y el uso de materiales de construcción que absorben el ruido, como paneles acústicos y revestimientos especiales. Además, se optimizó el diseño de las vías para minimizar la generación de ruido, incorporando sistemas de fijación que reducen la rugosidad y el desgaste de los rieles.

## **CA3: Impacto en zonas verdes**

La construcción y operación de infraestructuras ferroviarias deben considerar la protección de áreas verdes y la biodiversidad en las zonas donde se construyen. Si bien este aspecto puede tener un menor impacto en zonas urbanas, resulta crucial minimizar el impacto sobre los espacios naturales mediante la planificación cuidadosa de las soluciones y la implementación de medidas de mitigación, como la creación de corredores ecológicos que permitan el paso seguro de la fauna. Además, se deben emplear técnicas de construcción que reduzcan la fragmentación de hábitats y la alteración de ecosistemas. La reforestación y la restauración de áreas afectadas también son prácticas recomendadas para fomentar la conservación del medio ambiente.

## 7.5. Criterios Sociales (CS)



Figura 17. Propuesta de Criterios Sociales a considerar. Fuente: Elaboración propia.

### CS1: Impacto en la población

La identificación precisa de los impactos y la implementación de estrategias de mitigación adecuadas son esenciales para minimizar los desplazamientos, molestias y perjuicios para los habitantes.

Para abordar los desplazamientos de población en proyectos de integración del ferrocarril en zonas urbanas, es fundamental realizar una evaluación demográfica exhaustiva. Este proceso implica identificar las áreas residenciales que podrían verse afectadas mediante estudios demográficos y censos locales. Estos datos permiten comprender mejor la distribución de la población y las características socioeconómicas de los residentes.

Además, es crucial llevar a cabo un análisis detallado del uso del suelo. Este análisis consiste en mapear el uso actual del suelo para determinar las zonas residenciales, comerciales e industriales que podrían verse impactadas por el proyecto ferroviario. Al conocer la distribución y el tipo de uso del suelo, se pueden planificar mejor las medidas de mitigación y los posibles reasentamientos.



Por último, es necesario realizar estudios de movilidad para analizar los patrones de desplazamiento de los residentes. Estos estudios ayudan a prever cómo cambiarán los desplazamientos diarios debido a la nueva infraestructura ferroviaria. Al entender los patrones de movilidad, se pueden diseñar soluciones que minimicen las interrupciones en la vida cotidiana de los habitantes y mejoren la conectividad urbana.

Respecto a las posibles molestias y perjuicios que pueda ocasionar a la población, en primer lugar, es necesario realizar estudios acústicos y de vibraciones para evaluar el impacto del ruido y las vibraciones generadas tanto por la construcción como por la operación del ferrocarril. Estos estudios permiten identificar las áreas más afectadas y desarrollar estrategias para mitigar estos efectos.

Además, es crucial monitorear la calidad del aire para identificar posibles aumentos en la contaminación debido a las obras y al tráfico ferroviario. Este monitoreo ayuda a implementar medidas que reduzcan la emisión de contaminantes y protejan la salud de los residentes.

Otro aspecto importante es evaluar cómo la infraestructura ferroviaria puede afectar la accesibilidad y conectividad entre diferentes partes de la ciudad. Este análisis permite diseñar soluciones que mejoren la movilidad urbana y minimicen las interrupciones en la vida cotidiana de los habitantes.

En Logroño, por ejemplo, se optó por el soterramiento de las vías del tren para eliminar la barrera física que representaba el ferrocarril y mejorar la integración urbana. Este proyecto no solo redujo el ruido y las vibraciones, sino que también liberó espacio para el desarrollo urbano y mejoró la conectividad entre diferentes partes de la ciudad.



Figura 18. Nueva Estación Logroño. Fuente: Arquitectura Viva

## **CS2: Accesibilidad**

La accesibilidad es un principio fundamental en los proyectos de integración ferroviaria en ciudades, ya que garantiza que todas las personas, independientemente de sus capacidades físicas, puedan utilizar el sistema ferroviario de manera segura y cómoda. La mejora de la conectividad y la facilidad de acceso al sistema ferroviario son especialmente importantes para colectivos vulnerables, como personas con discapacidad, ancianos y familias con niños pequeños.

Para lograr una integración ferroviaria inclusiva, es esencial diseñar estaciones que faciliten el acceso a todos los usuarios. Las estaciones deben estar equipadas con rampas y ascensores que permitan a las personas con movilidad reducida acceder fácilmente a los andenes. Estos elementos deben ser amplios y estar bien señalizados para garantizar su uso seguro y eficiente.

Además, la instalación de señalización táctil en el suelo y señales visuales claras es crucial para ayudar a las personas con discapacidad visual a orientarse dentro de las estaciones. Estas medidas aseguran que todos los pasajeros puedan moverse con confianza y autonomía.

La implementación de sistemas de información tanto auditiva como visual en las estaciones y dentro de los trenes es fundamental para asegurar que todos los pasajeros, incluidos aquellos con discapacidades auditivas o visuales, puedan recibir información sobre horarios, paradas y emergencias. Estos sistemas deben ser claros y accesibles para todos.

Las aplicaciones móviles accesibles también juegan un papel importante, proporcionando información en tiempo real sobre horarios, retrasos y accesibilidad de las estaciones. Estas aplicaciones facilitan la planificación de viajes para todos los usuarios, mejorando la experiencia de viaje.

El personal de las estaciones y los trenes debe recibir formación específica para asistir a personas con discapacidad, asegurando un trato respetuoso y adecuado. La capacitación en atención a personas con discapacidad es crucial para crear un entorno inclusivo y acogedor.

Además, la creación de puntos de asistencia en las estaciones donde los pasajeros puedan solicitar ayuda es fundamental para mejorar la experiencia de viaje de los colectivos vulnerables. Estos puntos de asistencia deben estar bien señalizados y ser fácilmente accesibles.

## **CS3: Cohesión urbana**



Asegurar la cohesión urbana en este tipo de proyectos es crucial para el desarrollo sostenible y la mejora de la calidad de vida de los habitantes. La cohesión urbana se refiere a la integración armoniosa de diferentes áreas de la ciudad, promoviendo la conectividad, la inclusión social y el desarrollo económico. La integración del ferrocarril puede desempeñar un papel fundamental en este proceso, especialmente en la conexión de áreas urbanas previamente desconectadas.

Esto no solo mejora la movilidad de los residentes, sino que también facilita el acceso a servicios esenciales como educación, salud y empleo. La integración del ferrocarril puede transformar áreas marginadas en zonas vibrantes y accesibles, fomentando la inclusión social y reduciendo las desigualdades urbanas.

La inclusión social es un aspecto clave de la cohesión urbana. Al mejorar la conectividad, el ferrocarril permite que personas de diferentes partes de la ciudad interactúen y accedan a las mismas oportunidades. Esto es especialmente importante para colectivos vulnerables, como personas con discapacidad, ancianos y familias de bajos ingresos. La accesibilidad mejorada puede ayudar a estos grupos a participar plenamente en la vida urbana, promoviendo una sociedad más equitativa y cohesionada.

Las estaciones de tren pueden convertirse en centros de actividad económica, atrayendo negocios y fomentando el comercio local. Además, la mejora de la conectividad puede atraer inversiones y promover el desarrollo de infraestructuras complementarias, como centros comerciales, oficinas y viviendas. Esto no solo crea empleos, sino que también revitaliza áreas urbanas que anteriormente estaban en declive.

Un ejemplo destacado de cómo la integración del ferrocarril puede promover la cohesión urbana es el proyecto de la Estación de la Sagrera en Barcelona. Este proyecto no solo busca mejorar la conectividad ferroviaria, sino también transformar significativamente el entorno urbano.

La Estación de la Sagrera será la estación más grande de Cataluña y uno de los nodos de transporte más importantes de Europa. Este proyecto incluye la construcción de una estación intermodal que integrará trenes de alta velocidad, Rodalies, metro y autobuses urbanos e interurbanos. Esta intermodalidad facilitará el acceso y la movilidad de millones de personas, descongestionando otras estaciones clave como la de Sants.

Además de su función como centro de transporte, la Estación de la Sagrera está diseñada para ser un motor de regeneración urbana. El proyecto incluye la creación de un parque lineal verde de más de 4 kilómetros sobre las antiguas vías del tren. Este parque no solo proporcionará un espacio público de calidad, sino que también conectará los barrios de Sant Andreu-Sagrera y Sant Martí, promoviendo la cohesión social y mejorando la calidad de vida de los residentes.



Figura 19. Recreación virtual de la futura estación de la Sagrera de Barcelona, vista desde Sant Martí y anfiteatro. Fuente: B720 / BSAV

Otro ejemplo es el Proyecto de Integración Ferroviaria de Medellín, en Colombia. Este proyecto ha sido un pilar fundamental para la cohesión urbana y el desarrollo sostenible de la ciudad. Al conectar áreas urbanas previamente desconectadas, ha mejorado significativamente el acceso a servicios esenciales y oportunidades económicas para miles de residentes.

El proyecto también ha tenido un impacto positivo en la revitalización de áreas urbanas degradadas. La construcción de nuevas estaciones y la renovación de las existentes han impulsado el desarrollo económico local, atrayendo inversiones y generando empleo. Asimismo, se han creado espacios públicos y zonas verdes alrededor de las estaciones, mejorando la calidad de vida de los residentes y fomentando la cohesión social.

## 7.6. Nuevos criterios propuestos (NC)



Figura 20. Propuestas Nuevos Criterios a considerar. Fuente: Elaboración propia.

### NC1: Corredores verdes

Los corredores verdes son espacios naturales que se integran en el entorno urbano para conectar diferentes áreas de la ciudad, incluyendo estaciones ferroviarias, parques y otras zonas verdes. Estos corredores no solo mejoran la conectividad y la movilidad sostenible, sino que también promueven la biodiversidad y el bienestar de los ciudadanos.

Los corredores verdes juegan un papel crucial en la conservación de la biodiversidad urbana. Al proporcionar hábitats para una amplia variedad de especies de flora y fauna, estos espacios naturales ayudan a mantener y aumentar la biodiversidad en las ciudades. La presencia de plantas nativas y la creación de microhábitats favorecen la supervivencia de insectos, aves y pequeños mamíferos, contribuyendo a un ecosistema urbano más equilibrado y resiliente.

La vegetación presente en los corredores verdes desempeña un papel importante en la reducción de la contaminación del aire. Las plantas actúan como filtros naturales que capturan partículas contaminantes y absorben dióxido de carbono, mejorando la calidad del aire en las áreas urbanas. Además, los corredores verdes ayudan a mitigar el efecto de isla de calor urbano, ya que las áreas verdes tienden a ser más frescas que las zonas urbanizadas, lo que contribuye a regular la temperatura y a crear un microclima más agradable.

Estos espacios verdes ofrecen áreas recreativas y de esparcimiento para los residentes, lo que mejora significativamente su calidad de vida. Proporcionan lugares para actividades al aire libre como caminar, correr, hacer ejercicio y disfrutar de la naturaleza, fomentando un estilo de vida más saludable, lo que puede reducir el estrés y mejorar el bienestar mental y físico de los ciudadanos.

Al conectar estaciones ferroviarias con parques y otras áreas naturales, los corredores verdes facilitan el uso de medios de transporte sostenibles como caminar y andar en bicicleta. Estos corredores actúan como rutas seguras y agradables que incentivan a los ciudadanos a optar por modos de transporte no motorizados, reduciendo así la dependencia del automóvil y contribuyendo a una movilidad urbana más sostenible.

En la ciudad de Copenhague, se han implementado varios corredores verdes que conectan estaciones de tren con parques y áreas naturales. Estos corredores no solo mejoran la movilidad sostenible, sino que también actúan como pulmones verdes para la ciudad.

Berlín cuenta con una extensa red de corredores verdes que integran el ferrocarril con el entorno urbano. Un ejemplo destacado es el "Gleisdreieck Park", un parque urbano que conecta antiguas vías ferroviarias con espacios verdes, promoviendo tanto la biodiversidad como el bienestar de los ciudadanos.

Un ejemplo destacado de la implementación de corredores verdes en proyectos ferroviarios es HS2 en el Reino Unido. Este proyecto de alta velocidad pretende crear una franja continua de vegetación y hábitats naturales a lo largo de su recorrido, desde Londres hasta Birmingham. La iniciativa busca establecer una red de hábitats más amplios, mejor conectados y resilientes al cambio climático, además de proporcionar nuevos espacios verdes para el disfrute público.

El proyecto contempla la plantación de nuevos bosques, la creación de estanques, praderas y pastizales, así como la mejora de la biodiversidad en las áreas adyacentes. Asimismo, se esfuerza por minimizar y compensar el impacto ambiental derivado de la construcción del tren.



Figura 21. Recreación de la estación de HS2 Old Oak Common en Londres. Fuente: HS2

## NC2: Tecnologías inteligentes

La implementación de tecnologías inteligentes, como la inteligencia artificial (IA) y el big data, en la gestión y control ferroviario está revolucionando la integración del ferrocarril en los entornos urbanos. Estas tecnologías permiten optimizar el flujo de trenes y mejorar la eficiencia energética, ofreciendo múltiples ventajas. Además, pueden predecir fallos y necesidades de mantenimiento antes de que ocurran, lo que reduce el tiempo de inactividad y los costes asociados.

Tal y como indica MAFEX - Industria Ferroviaria Española, en su artículo de 28 de febrero de 2024, la inteligencia artificial (IA) está inaugurando una nueva era que promete revolucionar el transporte, ofreciendo numerosos beneficios en diversos ámbitos como la conducción autónoma de trenes, el control en tiempo real de las operaciones, el mantenimiento predictivo, la mejora de la eficiencia y el incremento de la seguridad, entre otros muchos aspectos. Sin embargo, el sector deberá enfrentar desafíos significativos relacionados con el acceso a los datos, la escalabilidad y la ciberseguridad.

Las tecnologías basadas en IA están comenzando a ganar terreno en el sector ferroviario, un ámbito con un gran potencial para su desarrollo y donde se espera que desempeñen un papel cada vez más importante. Aunque actualmente se encuentran en una fase emergente, la adopción de estos avances abre un amplio abanico de posibilidades para transformar el ferrocarril en un modo de transporte más seguro, eficiente, sostenible y atractivo.



Figura 22. Ventajas aplicación IA en el ferrocarril. Fuente: MAFEX



La capacidad de las máquinas para programar tareas con características similares al razonamiento humano ofrece una nueva perspectiva en la movilidad a nivel global. Los desarrollos actuales y futuros que incorporen estas soluciones tendrán un impacto significativo en la transformación de la industria ferroviaria. La utilización de sistemas que emulan la inteligencia y habilidades humanas, a través del análisis de datos y la automatización de tareas, contribuirá a optimizar el funcionamiento diario de las redes de transporte, tanto de pasajeros como de mercancías.

Actualmente, el sistema de gestión ferroviaria de Transport for London (TfL) en Londres, Reino Unido, utiliza IA, en concreto algoritmos de aprendizaje automático, para ajustar dinámicamente los horarios y las rutas de los trenes, asegurando un servicio más puntual y eficiente.

La aplicación de la IA en el sector ferroviario conlleva grandes desavíos, pues resulta crucial abordar retos como la integración con la infraestructura y los equipos existentes. La interoperabilidad entre diferentes sistemas de inteligencia artificial representa un desafío significativo, ya que los distintos actores del sector pueden utilizar tecnologías y estándares diversos.



Figura 23. Desafíos aplicación IA en el ferrocarril. Fuente: MAFEX.

Por otro lado, la utilización de big data permite monitorizar y ajustar el consumo energético de los trenes, optimizando su funcionamiento y reduciendo el impacto ambiental.

La implementación de big data en el sector ferroviario proporciona una capacidad sin precedentes para monitorizar y ajustar el consumo energético de los trenes, optimizando su rendimiento y reduciendo significativamente el impacto ambiental. A través del análisis de grandes volúmenes de datos en tiempo real, se puede obtener una visión detallada y precisa del consumo energético de cada componente del sistema ferroviario, desde los motores hasta los sistemas de climatización e iluminación.

El big data permite identificar patrones de uso y detectar ineficiencias que, de otro modo, pasarían desapercibidas. Por ejemplo, los sistemas de gestión energética basados en big data pueden ajustar automáticamente la velocidad de los trenes y otros parámetros operativos para maximizar la eficiencia energética. Esto no solo reduce el consumo de energía, sino que también disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental. De hecho, la red ferroviaria de Tokio emplea actualmente big data para monitorizar el consumo energético y ajustar las operaciones en tiempo real, logrando una mayor eficiencia energética.

Además, la capacidad de procesar y analizar datos en tiempo real permite a los operadores ferroviarios responder rápidamente a cambios en las condiciones operativas, como variaciones en la demanda de pasajeros o en las condiciones climáticas. Esta adaptabilidad mejora la resiliencia del sistema ferroviario y asegura un funcionamiento óptimo en todo momento.

El uso de big data también facilita el mantenimiento predictivo, al permitir la monitorización continua del estado de los equipos y la infraestructura. Esto ayuda a predecir y prevenir fallos antes de que ocurran, reduciendo los tiempos de inactividad y los costos asociados al mantenimiento correctivo.

En España, la adopción de tecnologías de mantenimiento predictivo en la red de Cercanías ha logrado una notable reducción de los tiempos de inactividad y una mejora en la puntualidad de los trenes. Estas tecnologías permiten la monitorización continua del estado de los equipos y la infraestructura, lo que facilita la identificación y resolución de problemas antes de que se conviertan en fallos críticos.

Por otro lado, la implementación de big data e inteligencia artificial (IA) en el sector ferroviario puede desempeñar un papel crucial en la predicción y gestión de catástrofes naturales, como

las inundaciones causadas por la DANA en Valencia ya que el uso de big data permite la recopilación y análisis de grandes volúmenes de datos en tiempo real provenientes de diversas fuentes, como estaciones meteorológicas, sensores de humedad del suelo, niveles de agua en ríos y datos proporcionados por los satélites. Estos datos pueden ser procesados por algoritmos de IA para identificar patrones y tendencias que preceden a eventos catastróficos.

Los modelos predictivos basados en IA pueden analizar estos datos para prever la ocurrencia de desastres naturales. Por ejemplo, Google ha desarrollado modelos que utilizan IA para predecir patrones de inundación en India, lo que permite una respuesta más precisa y efectiva en caso de emergencia. Estos modelos pueden ser adaptados para predecir inundaciones en regiones específicas, proporcionando alertas tempranas y permitiendo la implementación de medidas preventivas.

Por tanto, la IA puede ayudar en la planificación y respuesta a desastres mediante la simulación de diferentes escenarios y la evaluación de sus impactos. Esto permite a los gestores ferroviarios desarrollar planes de contingencia más efectivos y coordinar mejor los recursos durante una emergencia, para evitar consecuencias tan desastrosas como las ocurridas en octubre de 2024 en Valencia por los efectos de la DANA.

Algunas técnicas que actualmente se están implementando en el sector del ferroviario son:

- *Google Flood Forecasting Initiative*: Utiliza IA y big data para predecir inundaciones en tiempo real en India, proporcionando alertas tempranas y ayudando a mitigar los impactos de las inundaciones.
- *Bee2FireDetection*: Utiliza IA para predecir incendios forestales mediante el análisis de datos meteorológicos y ambientales, lo que podría ser adaptado para predecir otros tipos de desastres naturales.

### **NC3: Participación ciudadana**

La inclusión de la participación ciudadana en la toma de decisiones para la integración del ferrocarril en entornos urbanos consolidados no solo asegura que las soluciones propuestas reflejen las necesidades y deseos de la comunidad, sino que también fomenta la transparencia, la legitimidad y la aceptación de los proyectos.

Es fundamental involucrar a la ciudadanía en el proceso de planificación, ya que esto garantiza que las soluciones sean verdaderamente representativas de las necesidades y aspiraciones de los residentes. Este enfoque participativo permite a los ciudadanos expresar sus



preocupaciones, sugerencias y expectativas, resultando en proyectos más inclusivos y adaptados a la realidad local.

Cuando los ciudadanos participan desde las etapas iniciales de planificación, se genera un sentido de confianza y legitimidad en los proyectos. Esto es crucial para evitar conflictos y resistencias que pueden surgir cuando las decisiones se perciben como impuestas. La transparencia también facilita la rendición de cuentas, ya que los responsables del proyecto deben justificar sus decisiones ante la comunidad.

Los proyectos de integración ferroviaria que incorporan la participación ciudadana tienden a tener un impacto positivo en la calidad de vida y el bienestar social. Al considerar las opiniones y necesidades de los residentes, se pueden diseñar soluciones que no solo mejoren la movilidad, sino que también contribuyan al desarrollo urbano sostenible. Esto incluye la creación de espacios públicos, la mejora de la accesibilidad y la promoción de la cohesión social.

La participación activa en la planificación urbana empodera a los ciudadanos, dándoles un sentido de propiedad y responsabilidad sobre su entorno. Este empoderamiento se traduce en un mayor compromiso con el mantenimiento y cuidado de las infraestructuras, así como en una mayor disposición a colaborar en futuros proyectos. Además, cuando los ciudadanos sienten que sus voces son escuchadas y valoradas, se fortalece el sentido de pertenencia y la identidad comunitaria.

Ejemplos internacionales subrayan la importancia de la participación ciudadana en la integración ferroviaria. Volviendo a los ejemplos de Copenhague y Berlín, en ambos casos se han implementado procesos participativos para la creación de corredores verdes que conectan estaciones ferroviarias con parques y áreas naturales. Estos proyectos no solo mejoraron la movilidad sostenible, sino que también ayudaron a promover la biodiversidad y el bienestar de los ciudadanos.

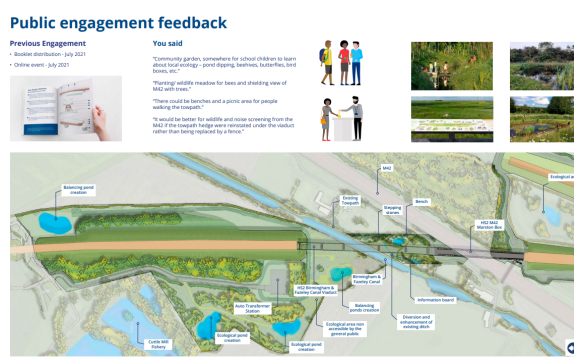


Figura 24. Ejemplo de consulta pública HS2 Birmingham & Fazeley Canal Viaduct. Fuente: HS2

#### NC4: Economía circular

La economía circular se presenta como un criterio innovador y esencial en la toma de decisiones para la integración del ferrocarril en entornos urbanos consolidados. Este enfoque promueve el uso de materiales reciclados y sostenibles en la construcción y mantenimiento de infraestructuras ferroviarias, contribuyendo significativamente a la sostenibilidad ambiental y económica.



Figura 25. Beneficios de la implementación de la economía circular. Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el reto demográfico.

Por otro lado, para cumplir con los objetivos de la Estrategia Española de Economía Circular para el año 2030 y posicionar a España como líder internacional en gestión, reciclaje y reutilización de residuos, en marzo 2024 se aprobó el Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE) de Economía Circular. Esta iniciativa fue propuesta por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO).

La economía circular optimiza el uso de recursos al maximizar la reutilización y el reciclaje de materiales. Esto no solo reduce los costos de producción y mantenimiento, sino que también mitiga los riesgos asociados a la fluctuación de precios de las materias primas. En el sector ferroviario, la implementación de prácticas de economía circular puede incluir la reutilización de componentes ferroviarios y la recuperación de materiales al final de su vida útil, lo que resulta en una gestión más eficiente y económica de los recursos.

El PERTE se enfoca en dos líneas de acción principales, que abarcan 18 instrumentos de actuación. Estas líneas se dividen en intervenciones en sectores clave, como el textil, el plástico y los bienes de equipo para la industria de las energías renovables. Además, incluye acciones transversales destinadas a promover la Economía Circular en las empresas, ofreciendo ayudas para proyectos que necesiten apoyo adicional para complementar sus esfuerzos en cualquier sector.

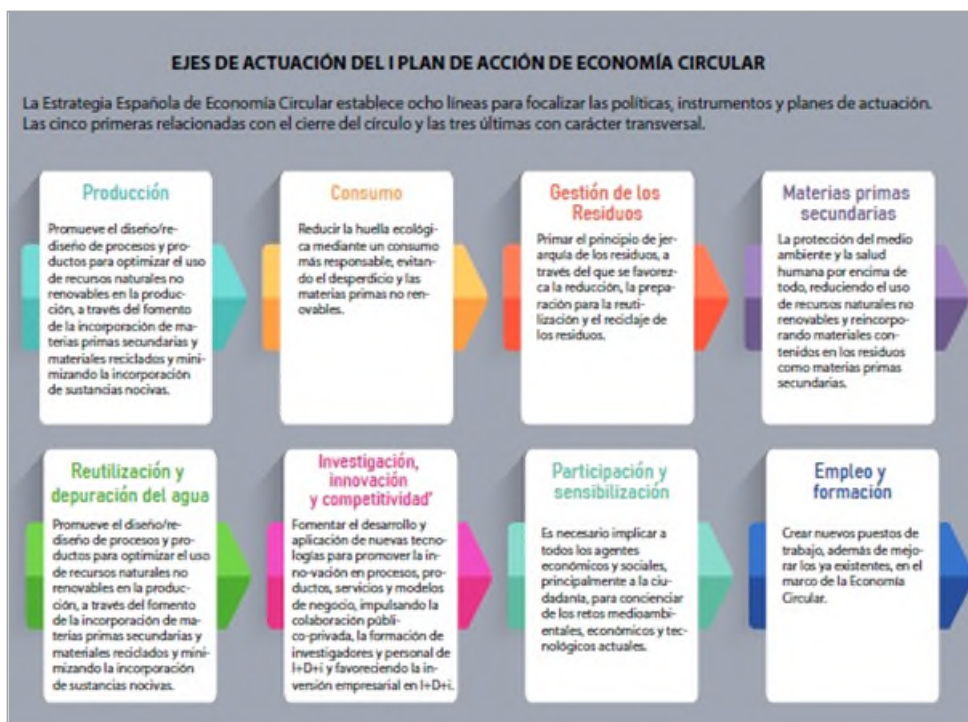


Figura 26. Ejes de Actuación del I Plan de Acción de Economía Circular. Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y reto demográfico

El uso de materiales reciclados y sostenibles en la construcción ferroviaria puede reducir la extracción de recursos naturales y disminuir la generación de residuos. Este enfoque minimiza la huella de carbono asociada a la producción de nuevos materiales y contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Por ejemplo, la utilización de balasto reciclado y durmientes de plástico reciclado no solo disminuye la demanda de materiales vírgenes, sino que también prolonga la vida útil de las infraestructuras.

Un buen ejemplo es el proyecto Neoballast de Adif. Se trata de una iniciativa innovadora que busca mejorar las prestaciones del balasto ferroviario mediante el uso de materiales reciclados, específicamente neumáticos fuera de uso (NFU).

Este proyecto tiene como objetivo principal dotar al balasto, tanto natural como reciclado, de mayores durabilidad y resistencia a la fragmentación, así como mejorar sus propiedades antivibratorias y antirruido.

En los Países Bajos, la empresa ProRail ha implementado prácticas de economía circular en la renovación de vías férreas, utilizando materiales reciclados y promoviendo la reutilización de componentes ferroviarios. Este enfoque ha resultado en una reducción significativa de los residuos y una mejora en la eficiencia de los recursos.

Por otro lado, la red ferroviaria de Japón ha adoptado el uso de durmientes de plástico reciclado, que no solo son más duraderos que los de madera, sino que también contribuyen a la reducción de residuos plásticos.

### **NC5: Impacto visual**

El diseño del sistema ferroviario debe ser respetuoso con el entorno urbano, integrándose de manera armoniosa en el paisaje existente.

El análisis del impacto visual es fundamental en la toma de decisiones para la integración del ferrocarril en entornos urbanos. Este enfoque no solo busca minimizar los efectos negativos sobre la estética y el confort de la población, sino que también promueve la armonización de las infraestructuras ferroviarias con el paisaje urbano.

Esto implica la incorporación de diseños arquitectónicos que se alineen con la estética del área urbana, utilizando acabados y estructuras que complementen el entorno. La elección de materiales, colores y formas debe ser cuidadosamente considerada para evitar la creación de elementos discordantes que puedan alterar la percepción visual de la ciudad.

La reducción del impacto visual es esencial para mantener la calidad de vida de los residentes y preservar la identidad visual de la ciudad.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la incorporación y corredores verdes alrededor de las infraestructuras ferroviarias puede ayudar a suavizar su impacto visual.

Las mejoras paisajísticas, como la plantación de árboles y arbustos, la creación de senderos peatonales y la instalación de elementos decorativos, pueden transformar áreas afectadas por la construcción en espacios atractivos y acogedores. Estas intervenciones no solo mitigan el impacto visual, sino que también promueven la cohesión social y el uso comunitario de los espacios públicos.

## 7.7. Conclusión

La elección de los criterios que estructuran un análisis multicriterio no es un ejercicio neutro ni meramente técnico: es una decisión estratégica que condiciona profundamente los resultados del proceso de evaluación y, por tanto, la calidad y legitimidad de las decisiones que de él se derivan. En el contexto de la integración ferroviaria en entornos urbanos consolidados —donde confluyen restricciones físicas, tensiones sociales, impactos ambientales y oportunidades de regeneración—, la selección de criterios debe responder a una lógica que combine rigor metodológico, sensibilidad territorial y alineación con los objetivos de sostenibilidad y equidad urbana.

Tal y como se ha expuesto, tras los trabajos de investigación llevados a cabo, en este Trabajo Fin de Máster se ha optado por una estructura de cinco grandes grupos de criterios: **técnicos, económicos, ambientales, sociales y emergentes**. Esta clasificación no ha sido arbitraria, pues responde a tres fundamentos clave:

1. **Representatividad de las dimensiones críticas del problema:** La integración ferroviaria no es solo una operación de ingeniería, sino una intervención urbana de alto impacto. Por ello, los criterios seleccionados buscan capturar las distintas escalas y dimensiones implicadas: desde la eficiencia operativa del sistema hasta su capacidad para transformar el entorno urbano y mejorar la calidad de vida.
2. **Capacidad discriminativa y no redundancia:** Cada criterio ha sido definido para aportar información específica y no solapada respecto a los demás. Se ha evitado incluir variables redundantes o de difícil medición, priorizando aquellos indicadores que permiten comparar de forma clara y objetiva las distintas alternativas.
3. **Relevancia estratégica y operativa:** Los criterios seleccionados no solo responden a la literatura académica y a buenas prácticas internacionales, sino que han sido contrastados con casos reales y adaptados a las prioridades actuales de la planificación urbana: sostenibilidad, resiliencia, inclusión y gobernanza.

Así, los **criterios técnicos** (como la funcionalidad, la interoperabilidad o la compatibilidad con la infraestructura existente) permiten evaluar la viabilidad operativa de las soluciones propuestas. Los **criterios económicos** (costes de inversión, mantenimiento y retorno social) aseguran que las alternativas sean sostenibles desde el punto de vista financiero y generen valor a largo plazo. Los **criterios ambientales** (reducción de emisiones, gestión del ruido, impacto sobre zonas verdes) reflejan el compromiso con una movilidad baja en carbono y con la mejora del entorno urbano.

La inclusión de **criterios sociales** (como la accesibilidad, la cohesión urbana o la aceptación ciudadana) responde a la necesidad de que las infraestructuras no solo funcionen, sino que también sean justas, inclusivas y legítimas. Finalmente, los **nuevos criterios emergentes** — como la resiliencia climática, la economía circular, la percepción ciudadana o la incorporación de tecnologías inteligentes— permiten anticipar desafíos futuros y alinear los proyectos con los marcos internacionales de sostenibilidad (ODS, Nueva Agenda Urbana).

En definitiva, la selección de estos criterios no pretende ser exhaustiva ni universal, sino pertinente, operativa y adaptada al contexto específico del análisis. Su combinación permite construir una matriz de evaluación robusta, sensible a las particularidades del territorio y capaz de guiar decisiones complejas en escenarios urbanos densos, dinámicos y en transformación.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los criterios seleccionados en cada grupo, junto con una breve descripción.


	CRITERIOS TÉCNICOS	CT1	FUNCIONALIDAD	Evaluar si las propuestas satisfacen las necesidades operativas, como la capacidad de transporte y la frecuencia del servicio
		CT2	SEGURIDAD	Garantizar el cumplimiento de normativas de seguridad ferroviaria y urbana, minimizando riesgos para los usuarios y la comunidad
		CT3	COMPATIBILIDAD	Analizar la integración con las infraestructuras urbanas y ferroviarias existentes, incluyendo estaciones, viaductos, túneles y redes de transporte complementarias
	CRITERIOS ECONÓMICOS	CE1	COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN	Estimación de los gastos necesarios para ejecutar las intervenciones, considerando las restricciones presupuestarias
		CE2	COSTOS OPERATIVOS Y MANTENIMIENTO	Análisis de los recursos necesarios para mantener la infraestructura y los servicios en condiciones óptimas
		CE3	RETORNO DE LA INVERSIÓN	Identificación de beneficios económicos a largo plazo, como el aumento de la actividad económica local y la valorización del suelo urbano
	CRITERIOS AMBIENTALES	CA1	REDUCCIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES	Evaluar el potencial del ferrocarril para disminuir el uso de vehículos motorizados y, con ello, las emisiones de gases de efecto invernadero
		CA2	GESTIÓN DEL RUIDO	Implementar medidas para mitigar el impacto sonoro del ferrocarril en áreas urbanas densas
		CA3	PROTECCIÓN DE ÁREAS VERDES Y BIODIVERSIDAD	Minimizar el impacto sobre los espacios naturales y buscar soluciones que respeten y fomenten la conservación del medio ambiente
	CRITERIOS SOCIALES	CS1	IMPACTO EN LA POBLACIÓN	Identificación y mitigación de posibles desplazamientos, molestias o perjuicios para los habitantes
		CS2	ACCESIBILIDAD	Mejora de la conectividad y facilidad de acceso al sistema ferroviario, especialmente para colectivos vulnerables
		CS3	COHESIÓN URBANA	Contribución a la integración de áreas urbanas previamente desconectadas, fomentando la inclusión y el desarrollo local
	NUEVOS CRITERIOS	NC1	CORREDORES VERDES	Mejora de la conectividad y la movilidad sostenible, además de promover la biodiversidad y el bienestar de los ciudadanos
		NC2	TECNOLOGÍAS INTELIGENTES	Mejorar la eficiencia energética, predecir fallos y necesidades de mantenimiento antes de que ocurran, lo para reducir el tiempo de inactividad y los costes asociados
		NC3	PARTICIPACIÓN CIUDADANA	Cumplir con las necesidades y deseos de la comunidad, fomentar la transparencia, la legitimidad y la aceptación de los proyectos.
		NC4	ECONOMÍA CIRCULAR	Promover el uso de materiales reciclados y sostenibles en la construcción y mantenimiento contribuyendo significativamente a la sostenibilidad ambiental y económica
		NC5	IMPACTO VISUAL	Minimizar los efectos negativos sobre la estética y el confort de la población y promover la armonización de las infraestructuras ferroviarias con el paisaje urbano

Figura 27. Tabla Resumen Listado de Criterios a considerar en los Análisis Multicriterio. Fuente: Elaboración propia.



## **8. APLICACIÓN DE LA NUEVA METODOLOGÍA PROPUESTA EN TRES CASOS DE ESTUDIO: ZARAGOZA (ESPAÑA), MEDELLÍN (COLOMBIA) Y LYON (FRANCIA)**

### **8.1. Introducción**

Tal y como se ha comentado en los apartados anteriores, la integración del ferrocarril en entornos urbanos consolidados plantea desafíos complejos que requieren enfoques metodológicos capaces de adaptarse a contextos diversos. Para validar la aplicabilidad y robustez del nuevo marco de análisis multicriterio propuesto en este Trabajo Fin de Máster, se han seleccionado tres ciudades con características urbanas, sociales y territoriales diferentes: Zaragoza (España), Medellín (Colombia) y Lyon (Francia).

La elección de estas tres ciudades responde a una decisión intencionada que busca comparar contextos urbanos diferentes, con el objetivo de comprobar la capacidad del modelo para adaptarse a distintas realidades y obtener aprendizajes útiles que puedan aplicarse en otros casos similares.

**Zaragoza** representa un entorno europeo con una infraestructura ferroviaria consolidada, pero con tensiones urbanas derivadas de la obsolescencia parcial de ciertos corredores y su impacto en la conectividad interna. El tramo entre las estaciones de El Portillo y Delicias actúa como una barrera física que fragmenta el tejido urbano y limita el desarrollo de nuevas centralidades. La ciudad, sin embargo, cuenta con una sólida trayectoria en planificación urbana sostenible y ha implementado proyectos relevantes como el tranvía moderno, lo que la convierte en un laboratorio ideal para explorar soluciones de regeneración urbana, eficiencia técnica y desarrollo orientado al transporte (DOT). Su caso permite analizar cómo una ciudad intermedia europea puede reconfigurar su red ferroviaria para mejorar la cohesión territorial y la calidad de vida urbana.

**Medellín**, por su parte, ofrece un contexto radicalmente distinto. Se trata de una ciudad latinoamericana que ha experimentado una profunda transformación urbana en las últimas décadas, marcada por la superación de desigualdades territoriales, la innovación en movilidad y la participación ciudadana. La red ferroviaria histórica de Medellín, actualmente subutilizada, presenta un gran potencial para ser reactivada como infraestructura de movilidad sostenible, especialmente mediante soluciones como el tren-tram.



La experiencia de Medellín en la integración de sistemas como el Metro y los Metrocables, junto con su enfoque en la equidad social y la resiliencia urbana, aporta una perspectiva valiosa sobre cómo la infraestructura ferroviaria puede convertirse en un instrumento de inclusión y justicia espacial en contextos de alta vulnerabilidad.

**Lyon**, finalmente, se incorpora como un caso de estudio representativo de una gran ciudad europea con un sistema ferroviario maduro, pero sometido a nuevas presiones urbanas. La coexistencia de estaciones como Part-Dieu y Perrache, junto con corredores ferroviarios elevados que fragmentan el espacio urbano, plantea retos significativos en términos de integración funcional, paisajística y social. Lyon destaca por su compromiso con la planificación orientada al transporte, la regeneración sostenible y la movilidad activa, siendo pionera en la implementación de zonas de actividades concertadas (ZAC) y corredores verdes. Su inclusión permite evaluar cómo una metrópoli avanzada puede abordar la saturación de nodos ferroviarios y la fragmentación urbana mediante estrategias de soterramiento, reurbanización y desarrollo intermodal.

En conjunto, estos tres casos permiten construir un análisis comparado amplio y riguroso. Zaragoza aporta una visión desde la modernización infraestructural en una ciudad intermedia europea; Medellín ofrece un enfoque desde la equidad territorial y la transformación social en el sur global; y Lyon representa un modelo de sostenibilidad integral y eficiencia intermodal en un entorno metropolitano consolidado.

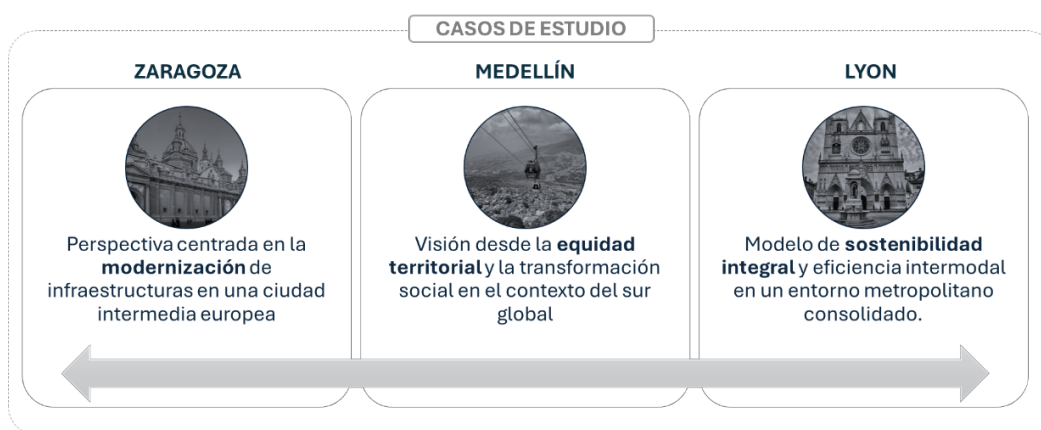


Figura 28. Casos de Estudio del TFM. Fuente: Elaboración propia

Esta triangulación metodológica fortalece la validez del marco propuesto y proporciona una base sólida para su replicabilidad en futuros proyectos de integración ferroviaria en ciudades con realidades diversas.

Todos los cálculos se ejecutaron mediante entorno MATLAB® R2022b.

## **8.2. Caso de Estudio 1: Zaragoza (España)**

### **8.2.1. Introducción y Contexto Actual**

Zaragoza, quinta ciudad más poblada de España y capital de la Comunidad Autónoma de Aragón, se encuentra en una posición geográfica privilegiada dentro del eje Madrid-Barcelona, lo que la convierte en un nodo logístico y ferroviario de gran relevancia a nivel nacional. Esta centralidad ha favorecido históricamente su desarrollo económico y su conectividad territorial, consolidando una infraestructura ferroviaria robusta que, sin embargo, hoy plantea importantes desafíos en términos de integración urbana.

Uno de los principales focos de conflicto urbano se localiza en el tramo ferroviario comprendido entre las estaciones de El Portillo y Zaragoza-Delicias. Este corredor, que atraviesa zonas densamente urbanizadas, actúa como una barrera física y funcional que fragmenta el tejido urbano, limita la conectividad transversal entre barrios y genera impactos negativos tanto ambientales como sociales. La presencia de infraestructuras ferroviarias en superficie, con escasa permeabilidad peatonal y visual, ha contribuido a la desconexión entre distritos, dificultando la cohesión urbana y restringiendo el desarrollo de nuevas centralidades urbanas.

A esta problemática se suma la obsolescencia parcial de ciertos tramos de la infraestructura, la falta de integración modal con otros sistemas de transporte urbano y la escasa calidad del espacio público adyacente. Además, el corredor ferroviario genera externalidades negativas como ruido, vibraciones y contaminación visual, que afectan directamente a la calidad de vida de los residentes. Estas condiciones hacen evidente la necesidad de una intervención estratégica que no solo resuelva los problemas técnicos y operativos del sistema ferroviario, sino que también contribuya a la regeneración urbana y a la mejora del entorno construido.

En este contexto, la ciudad de Zaragoza se presenta como un caso de estudio especialmente pertinente para aplicar un enfoque de análisis multicriterio en la evaluación de alternativas de integración ferroviaria. La ciudad cuenta con una trayectoria consolidada en planificación urbana sostenible, como lo demuestra la implementación del tranvía moderno y su participación en iniciativas alineadas con la Agenda Urbana Española y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Esta experiencia previa proporciona un marco institucional y técnico favorable para la aplicación de metodologías complejas de evaluación y toma de decisiones.

El presente estudio se plantea como una oportunidad para transformar un espacio de fricción urbana en un eje vertebrador de movilidad sostenible, regeneración urbana y cohesión social. A través de la aplicación de un marco metodológico basado en el análisis multicriterio —que integra criterios técnicos, económicos, ambientales, sociales y emergentes— se evaluarán distintas alternativas de intervención, como el soterramiento parcial de las vías, la elevación mediante viaducto o la reconversión del trazado ferroviario en un corredor tranviario.

La elección de Zaragoza como caso de estudio no solo permite validar la aplicabilidad del modelo propuesto en un contexto español consolidado, sino que también ofrece la posibilidad de generar propuestas replicables en otras ciudades que enfrentan desafíos similares. En definitiva, este análisis busca contribuir a una planificación ferroviaria más integrada, resiliente y centrada en las personas, capaz de responder a los retos contemporáneos de movilidad, sostenibilidad y equidad urbana.

#### 8.2.2. Hipótesis y Problemática

Se parte de la hipótesis de que la infraestructura ferroviaria actual en Zaragoza, especialmente en el tramo entre las estaciones de El Portillo y Delicias, constituye una barrera urbana significativa que fragmenta la ciudad e impide una conectividad eficiente entre distritos. Esta situación reduce la accesibilidad, deteriora la cohesión urbana y limita el desarrollo de nuevas centralidades. La reconfiguración de este eje ferroviario representa una oportunidad estratégica para transformar un espacio de fricción en un eje vertebrador del desarrollo urbano sostenible.

#### 8.2.3. Justificación de los Criterios Seleccionados

Los criterios seleccionados se alinean con las prioridades estratégicas del planeamiento urbano municipal y con las recomendaciones de la Agenda Urbana Española. Se priorizan aspectos de conectividad y eficiencia ferroviaria (CT1, CT2), junto a criterios económicos que aseguren la viabilidad financiera del proyecto (CE1, CE2). Asimismo, la problemática ambiental del corredor (contaminación acústica, visual y atmosférica) justifica la inclusión del criterio CA1.

En el plano social, CS1 y CS2 abordan la permeabilidad peatonal, el acceso equitativo a servicios y la aceptación ciudadana, aspectos fundamentales en procesos participativos como el desarrollado en el ámbito de Zaragoza Vivienda. Finalmente, los nuevos criterios (NC1 y NC2) responden a una visión integrada de ciudad resiliente y orientada al transporte público,

permitiendo evaluar el impacto del proyecto sobre la regeneración urbana y su capacidad de respuesta ante condiciones climáticas extremas.

#### 8.2.4. Alternativas Analizadas

- **A1:** Soterramiento parcial de 1.8 km entre El Portillo y Delicias, con reurbanización en superficie mediante un modelo de Desarrollo Orientado al Transporte (DOT).
- **A2:** Elevación de la infraestructura ferroviaria mediante viaducto, generando corredores verdes y usos mixtos en planta baja.
- **A3:** Variante ferroviaria exterior y reconversión del trazado actual en tranvía urbano.

#### 8.2.5. Marco Metodológico

Se utilizó el método AHP (Analytic Hierarchy Process) para asignar pesos a los criterios, y VIKOR para la ordenación de alternativas. Los criterios y pesos asignados fueron definidos tomando como referencia el MITMA (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana). (2022) *“Integración urbana del ferrocarril. Propuesta metodológica para la evaluación de alternativas*. Madrid: Gobierno de España”.

La elección metodológica de combinar el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) con el método VIKOR en el análisis multicriterio aplicado al caso de Zaragoza responde a la necesidad de abordar un problema de decisión complejo, caracterizado por la presencia de múltiples criterios —técnicos, económicos, sociales, ambientales y emergentes— que interactúan de forma no lineal y, en ocasiones, contradictoria. Esta combinación metodológica permite aprovechar las fortalezas complementarias de ambos enfoques, garantizando una evaluación robusta, transparente y orientada a la toma de decisiones estratégicas en contextos urbanos consolidados.

#### AHP: estructuración jerárquica y ponderación de criterios

Como se ha mencionado en apartados anteriores, el método AHP, desarrollado por Thomas L. Saaty, se utilizó en una primera fase del análisis para estructurar el problema de decisión y asignar pesos relativos a los criterios considerados. Esta herramienta es especialmente útil cuando se requiere integrar juicios de expertos en la valoración de criterios heterogéneos, permitiendo descomponer el problema en una jerarquía lógica de objetivos, criterios y subcriterios.

En el caso de Zaragoza, el AHP permitió:

- Incorporar valoraciones cualitativas de expertos en planificación urbana, movilidad y sostenibilidad.
- Establecer una ponderación coherente y justificada de los criterios, como la capacidad operativa (CT1), el coste de inversión (CE1), la permeabilidad urbana (CS1) o el potencial de regeneración urbana (NC1).
- Asegurar la consistencia interna de los juicios emitidos, mediante el cálculo del índice de consistencia (CI), lo que refuerza la fiabilidad del proceso.

Esta fase fue clave para reflejar las prioridades estratégicas del planeamiento urbano de Zaragoza, así como para adaptar el modelo a las especificidades del contexto local.

#### VIKOR: identificación de soluciones de compromiso

Una vez definidos los pesos mediante AHP, se aplicó el método VIKOR (VIšekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje), desarrollado por Opricovic y Tzeng, para la evaluación y ordenación de las alternativas. VIKOR se basa en el concepto de solución de compromiso, es decir, aquella alternativa que se encuentra más próxima al ideal teórico, considerando simultáneamente la distancia global (función utilidad) y la peor desviación (función de arrepentimiento).

Este enfoque resulta especialmente adecuado en contextos como el de Zaragoza, donde:

- Las alternativas presentan rendimientos dispares en distintos criterios (por ejemplo, una opción puede ser más eficiente técnicamente pero menos aceptada socialmente).
- Se requiere una decisión equilibrada, que no maximice un único criterio, sino que minimice el conflicto entre múltiples objetivos.
- Es necesario identificar una solución robusta y políticamente viable, que pueda ser defendida ante distintos actores institucionales y sociales.

En este sentido, VIKOR permitió ordenar las tres alternativas propuestas (soterramiento parcial, viaducto y variante exterior) en función de su proximidad a la solución ideal, integrando los pesos obtenidos con AHP y los valores normalizados de cada alternativa.

La combinación AHP-VIKOR aporta un valor añadido significativo al análisis. Por un lado, AHP proporciona una base sólida para la ponderación de criterios, incorporando el juicio experto de forma estructurada, mientras que VIKOR permite una evaluación final que

considera tanto la eficiencia global como la equidad entre criterios, lo que es crucial en decisiones con múltiples implicaciones urbanas y sociales. Juntas, ambas metodologías permiten una toma de decisiones más informada, transparente y defendible, alineada con los principios de sostenibilidad, participación y resiliencia urbana.

En definitiva, el uso combinado de AHP y VIKOR en el caso de Zaragoza no solo responde a criterios de rigor metodológico, sino que se justifica plenamente por la naturaleza del problema abordado: una decisión estratégica en un entorno urbano complejo, con múltiples actores, criterios en conflicto y un alto grado de incertidumbre.

La tabla siguiente presenta el listado de criterios considerados en este caso de estudio, junto con los pesos obtenidos mediante la aplicación del método AHP (Analytic Hierarchy Process):

Criterio	Peso
CT1: Capacidad operativa	0.15
CT2: Interoperabilidad	0.10
CE1: Coste de inversión	0.10
CE2: ROI a 30 años	0.15
CA1: Reducción de impactos ambientales	0.15
CS1: Permeabilidad urbana	0.15
CS2: Aceptación ciudadana	0.05
NC1: Regeneración urbana DOT	0.10
NC2: Resiliencia climática	0.05

Figura 29. Criterios y Pesos Casos de Estudio 1: Zaragoza. Fuente: Elaboración propia

### 8.2.6. Resultados y Evaluación Multicriterio

Los rendimientos de cada alternativa se evaluaron en una escala de 1 a 10, y se aplicó normalización para el algoritmo VIKOR:

Criterio	Alternativas		
	A1	A2	A3
CT1	9	6	5
CT2	9	7	4
CE1 (M€)	220	160	100
CE2 (%)	18	12	10
CA1	9	7	6
CS1	9	6	5
CS2	7	8	4
NC1	9	6	7
NC2	8	5	6

Figura 30. Resolución y Evaluación Multicriterio Casos de Estudio 1: Zaragoza. Fuente: Elaboración propia

Resultados VIKOR:

- **A1:**  $Q = 0.27$
- **A2:**  $Q = 0.41$
- **A3:**  $Q = 0.56$

### 8.2.7. Impactos Estimados

- Superficie liberada: 120.000 m<sup>2</sup>
- Reducción de emisiones NO<sub>x</sub> y PM: -38%
- Incremento de valor de suelo: +22%
- Reducción de tiempos de desplazamiento: -12 min

Los impactos estimados derivados de la alternativa seleccionada —el soterramiento parcial del corredor ferroviario entre las estaciones de El Portillo y Delicias— permiten cuantificar de forma preliminar los beneficios urbanos, ambientales, económicos y funcionales que se derivarían de su implementación. La superficie liberada, estimada en 120.000 metros cuadrados, corresponde al espacio actualmente ocupado por la infraestructura ferroviaria en superficie, que quedaría disponible para nuevos usos urbanos tras su soterramiento. Este cálculo se ha realizado a partir de la longitud del tramo afectado (aproximadamente 1,8 kilómetros) y el ancho medio del corredor ferroviario, considerando tanto las vías como los espacios de servidumbre. La liberación de esta superficie representa una oportunidad estratégica para la creación de espacios públicos, zonas verdes, equipamientos o desarrollos residenciales y terciarios, y permitiría además reconectar barrios históricamente separados por la traza ferroviaria, mejorando la cohesión urbana.

En cuanto a la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y partículas en suspensión (PM), se estima una disminución del 38% en el entorno inmediato del corredor. Esta cifra se ha obtenido mediante la modelización del cambio modal inducido por la mejora de la conectividad ferroviaria y su integración con otros modos de transporte público, como el tranvía o el autobús. La reducción del tráfico rodado en la zona, junto con la eliminación de fuentes de emisión directa asociadas a la infraestructura ferroviaria en superficie, contribuye significativamente a la mejora de la calidad del aire, con beneficios directos sobre la salud pública y la habitabilidad del entorno urbano.

El incremento del valor del suelo, estimado en un 22%, refleja el efecto positivo que tendría la intervención sobre el mercado inmobiliario local. Esta estimación se ha realizado mediante un modelo de regresión hedónica, tomando como referencia experiencias previas de reconfiguración urbana similares en otras ciudades españolas y europeas. La mejora de la accesibilidad, la eliminación de externalidades negativas (como el ruido o la fragmentación urbana) y la creación de nuevos espacios urbanos de calidad son factores que tienden a



revalorizar el entorno inmediato, generando además ingresos adicionales para la administración a través de plusvalías urbanísticas o impuestos.

Por último, la reducción de los tiempos de desplazamiento, cifrada en 12 minutos de media, se ha estimado mediante simulaciones de red de transporte que comparan los escenarios antes y después de la intervención. Esta mejora se debe a la mayor eficiencia del sistema ferroviario resultante, a la eliminación de transbordos innecesarios y a la mejor integración modal con el resto del sistema de transporte urbano. La reducción de los tiempos de viaje no solo mejora la experiencia del usuario, sino que también tiene un impacto positivo en la productividad urbana y en la competitividad del sistema de transporte público frente al vehículo privado.

#### 8.2.8. Conclusión: Selección de la Alternativa Óptima para Zaragoza

La aplicación del análisis multicriterio al caso de Zaragoza ha permitido una evaluación rigurosa e integral de las tres alternativas propuestas para la reconfiguración del eje ferroviario entre las estaciones de El Portillo y Zaragoza-Delicias. Los resultados del método VIKOR, que integra criterios técnicos, económicos, ambientales, sociales y emergentes, muestran que la Alternativa A1: Soterramiento parcial con reurbanización en superficie mediante un modelo DOT, es la opción más equilibrada y con mejor desempeño global ( $Q = 0.27$ ), frente a A2 (viaducto,  $Q = 0.41$ ) y A3 (variante y tranvía urbano,  $Q = 0.56$ ).

Desde una perspectiva técnica, A1 presenta las mejores valoraciones en capacidad operativa (CT1) e interoperabilidad (CT2), lo que asegura la funcionalidad del sistema ferroviario a largo plazo. En el plano ambiental (CA1) y social (CS1), destaca por su alto potencial de mitigación de impactos negativos (ruido, barreras físicas) y por su capacidad para mejorar la permeabilidad y cohesión urbana. Además, obtiene un notable rendimiento en términos de regeneración urbana (NC1), al liberar 120.000 m<sup>2</sup> de superficie con potencial para nuevos usos urbanos sostenibles y accesibles.

Aunque A1 implica un coste de inversión más elevado (220 M€), compensa esta desventaja con un mayor retorno económico a 30 años (ROI del 18%), así como una mejora sustancial en indicadores clave como la reducción de emisiones contaminantes (-38%) y los tiempos de desplazamiento (-12 minutos). Por su parte, la alternativa A2, si bien es más económica en su ejecución inicial, presenta impactos visuales y sociales más adversos, y un menor potencial transformador del espacio urbano. La opción A3, pese a su bajo coste, obtiene los peores resultados globales, debido a una menor eficiencia técnica y una pérdida de centralidad del trazado ferroviario, lo que compromete su viabilidad operativa y su aceptación ciudadana.

En resumen, la **alternativa A1** se posiciona como la solución más adecuada para responder a los retos urbanos, funcionales y ambientales del corredor ferroviario de Zaragoza. Su implementación no solo resolvería los problemas de fragmentación y deterioro del entorno actual, sino que también impulsaría una transformación estructural hacia un modelo de ciudad más integrada, sostenible y centrada en las personas. Esta decisión se alinea con los objetivos estratégicos del planeamiento local, así como con los principios recogidos en la Agenda Urbana Española y los ODS, particularmente el ODS 11 sobre ciudades sostenibles.

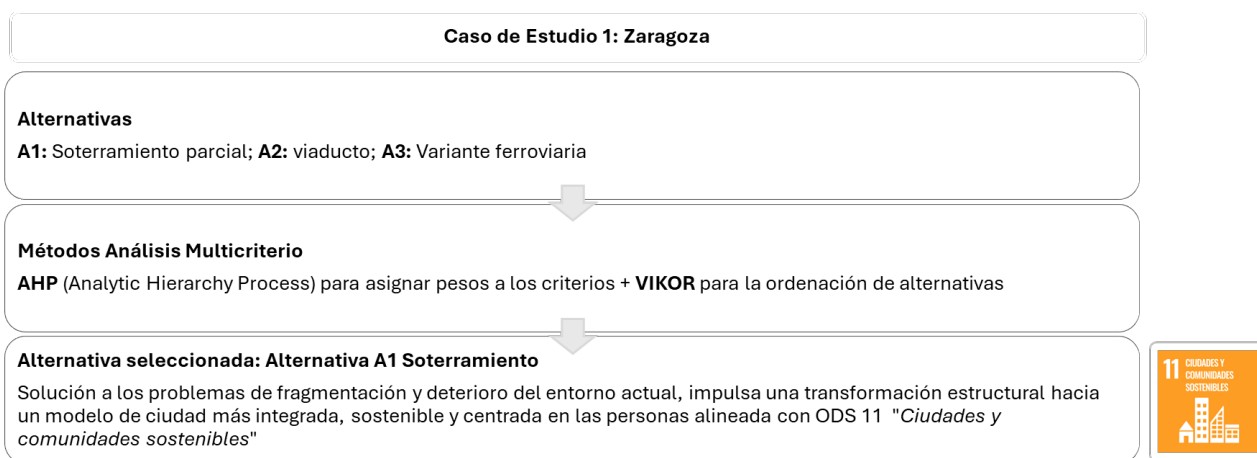


Figura 31. Síntesis Caso de Estudio 1 – Zaragoza. Fuente: Elaboración propia

### **8.3. Caso de Estudio 2: Medellín (Colombia)**

#### **8.3.1. Introducción y Contexto Actual**

Medellín, capital del departamento de Antioquia y segunda ciudad más poblada de Colombia, se ha consolidado en las últimas décadas como un referente internacional en transformación urbana, resiliencia social y movilidad sostenible. Su evolución, marcada por un pasado de profundas desigualdades territoriales y conflictividad social, ha dado paso a un modelo de ciudad que apuesta por la inclusión, la innovación y la equidad como ejes estructurantes del desarrollo urbano. En este contexto, la movilidad ha sido uno de los pilares fundamentales de dicha transformación, con proyectos emblemáticos como el Metro, los Metrocables y el Tranvía de Ayacucho, que han redefinido la relación entre transporte, territorio y ciudadanía.

Sin embargo, a pesar de estos avances, Medellín enfrenta aún importantes desafíos en materia de conectividad ferroviaria. La red ferroviaria histórica, que en su momento articuló el desarrollo industrial del Valle de Aburrá, permanece hoy en gran medida subutilizada, fragmentada y desconectada del sistema de transporte metropolitano. Esta infraestructura, que atraviesa zonas densamente pobladas y de alta vulnerabilidad social, representa una oportunidad estratégica para reconfigurar la movilidad urbana desde una perspectiva de justicia espacial, sostenibilidad ambiental y regeneración territorial.

La hipótesis que guía este caso de estudio plantea que la reactivación del corredor ferroviario metropolitano —mediante soluciones como el tren-tram o la integración con el sistema Metro— puede convertirse en un instrumento clave para reducir la desigualdad territorial, mejorar la accesibilidad y promover un modelo de ciudad más cohesionado, resiliente y bajo en carbono. Esta intervención permitiría no solo optimizar una infraestructura existente, sino también reconectar comunidades históricamente marginadas, revitalizar espacios urbanos degradados y consolidar nuevas centralidades urbanas en torno al transporte público.

La elección de Medellín como caso de estudio responde a su singularidad como laboratorio urbano del sur global, donde convergen retos estructurales —como la informalidad, la segregación socioespacial y la presión sobre el espacio público— con una institucionalidad innovadora y una ciudadanía activa. A diferencia de contextos europeos consolidados, Medellín ofrece un escenario donde la planificación ferroviaria no puede limitarse a criterios técnicos o económicos, sino que debe incorporar de forma prioritaria dimensiones sociales, culturales y ambientales.

En este sentido, el análisis multicriterio propuesto en este Trabajo Fin de Máster se presenta como una herramienta metodológica idónea para abordar la complejidad del caso. Su capacidad para integrar variables cuantitativas y cualitativas, y para ponderar criterios frecuentemente contradictorios —como la eficiencia operativa, la equidad territorial, la participación ciudadana o la resiliencia climática— permite estructurar un proceso de toma de decisiones más transparente, inclusivo y adaptado a la realidad local.

A través de la evaluación comparativa de distintas alternativas de intervención, este estudio busca no solo identificar la solución más viable desde una perspectiva técnica y económica, sino también aquella que genere mayores beneficios sociales, ambientales y urbanos. En definitiva, el caso de Medellín permite explorar cómo la integración ferroviaria puede convertirse en una palanca de transformación estructural, capaz de articular movilidad, equidad y sostenibilidad en un entorno urbano complejo y dinámico.

### 8.3.2. Hipótesis y Problemática

Se plantea que la red ferroviaria histórica de Medellín, actualmente subutilizada, puede ser reactivada como infraestructura urbana de movilidad sostenible mediante un sistema tren-tram que incorpore criterios de equidad territorial, mitigación climática y generación de centralidades locales. Esta reactivación se convierte en una estrategia estructurante para ciudades latinoamericanas con fuerte informalidad, fragmentación social y presión urbana sobre el espacio público.

El tren-tram (también conocido como tren-tranvía) es un sistema de transporte que combina características del tranvía urbano y del tren de cercanías o regional. Su principal ventaja es que puede circular tanto por vías ferroviarias convencionales como por calles urbanas, adaptándose a diferentes entornos.

Podemos encontrar esta solución en Alicante (España), Karlsruhe (Alemania) que fue pionero en este tipo de sistema, con una red que conecta la ciudad con localidades cercanas y Mulhouse (Francia).

### 8.3.3. Justificación de los Criterios Seleccionados

El contexto socioeconómico de Medellín justifica una ponderación reforzada de los criterios sociales, en particular CS1 (inclusión territorial) y CS2 (participación comunitaria), debido a la diversidad de actores implicados y la historia reciente de conflictividad en sectores como Moravia y Tricentenario. La eficiencia técnica (CT1) y la integración modal (CT2) también son cruciales dada la necesidad de interconexión con el Metro y el sistema de Metrocable.

Desde una perspectiva ambiental, CA1 adquiere relevancia por el potencial de reducción de emisiones en una ciudad con niveles críticos de contaminación. Finalmente, los criterios NC1 (DOT y regeneración urbana) y NC2 (resiliencia climática) permiten incorporar los principios de justicia espacial y transición ecológica que orientan la Planificación Territorial en Colombia.

### 8.3.4. Alternativas Analizadas

- **B1:** Tren subterráneo con estación pasante central conectada al Metro.
- **B2:** Tren-tram en superficie con implementación de DOT en nodos urbanos.
- **B3:** Variante elevada con integración paisajística y centros culturales comunitarios.

### 8.3.5. Marco Metodológico

Se empleó el método TOPSIS, definiendo los siguientes criterios y pesos.

La elección del método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) para el análisis multicriterio aplicado al caso de Medellín responde a la necesidad de evaluar alternativas de integración ferroviaria en un contexto urbano caracterizado por una alta complejidad social, una infraestructura parcialmente obsoleta y una fuerte presión por lograr soluciones equitativas, sostenibles y técnicamente viables.

TOPSIS es un método de decisión multicriterio ampliamente utilizado en contextos donde se requiere seleccionar la mejor alternativa entre un conjunto finito, considerando múltiples criterios que pueden ser tanto cuantitativos como cualitativos. Su lógica se basa en identificar la alternativa que se encuentra más cerca de la solución ideal (la que maximiza todos los beneficios y minimiza todos los costes) y más alejada de la solución anti-ideal (la peor en todos los criterios).

El caso de Medellín presenta una serie de particularidades que hacen especialmente pertinente el uso de TOPSIS:

- **Diversidad de criterios:** Las alternativas evaluadas (tren subterráneo, tren-tram y variante elevada) implican impactos diferenciados en términos de inclusión social, coste, eficiencia técnica, regeneración urbana y sostenibilidad ambiental. TOPSIS permite integrar todos estos factores en un único índice de desempeño.
- **Necesidad de equilibrio:** En una ciudad con altos niveles de desigualdad territorial, no basta con optimizar un único criterio (por ejemplo, el coste o la eficiencia técnica). Se requiere una solución de compromiso que equilibre múltiples objetivos, algo que TOPSIS permite identificar de forma clara y transparente.
- **Facilidad de interpretación:** El método genera un índice de cercanía a la solución ideal ( $C_i$ ), fácilmente interpretable por los distintos actores implicados en la toma de decisiones, lo que facilita la comunicación de resultados y la construcción de consensos.

Por tanto, la aplicación del método TOPSIS ofrece varias ventajas que justifican su elección en este caso de estudio. Concretamente, permite trabajar con datos normalizados, lo que facilita la comparación entre criterios con unidades distintas y es especialmente útil cuando se desea priorizar alternativas sin necesidad de establecer relaciones de preferencia estrictas entre ellas, como ocurre en métodos de sobreclasificación. Finalmente, su robustez computacional y su bajo coste de implementación lo hacen adecuado para contextos donde se requiere una evaluación ágil pero rigurosa.

La tabla siguiente incluye la relación de criterios seleccionados con sus correspondientes pesos:

Criterio	Peso
CT1: Eficiencia técnica	0.10
CT2: Integración modal	0.10
CE1: Coste de inversión	0.15
CE2: Rentabilidad social	0.15
CA1: Beneficio ambiental	0.10

Criterio	Peso
CS1: Inclusión y equidad	0.15
CS2: Participación ciudadana	0.10
NC1: Impacto en regeneración urbana	0.10
NC2: Resiliencia climática	0.05

Figura 32. Criterios y Pesos Casos de Estudio 2: Medellín. Fuente: Elaboración propia

### 8.3.6. Resultados y Evaluación Multicriterio

Criterio	Alternativas		
	B1	B2	B3
CT1	9	8	7
CT2	8	9	6
CE1 (M USD)	390	210	260
CE2 (%)	12	20	15
CA1	7	9	8
CS1	6	9	7
CS2	5	8	6
NC1	6	9	8
NC2	6	8	7

Resultados TOPSIS:

- **B2:** 0.82
- **B3:** 0.64
- **B1:** 0.45

#### 8.3.7. Impactos Estimados

- Población beneficiada: 140.000 habitantes
- Reducción de tiempos de viaje: -18%
- Reducción de emisiones de CO2: -27.000 t/año
- Revalorización urbana en Moravia y Tricentenario: +15-25%

En el caso de Medellín, los impactos estimados derivados de la alternativa seleccionada —la implementación de un sistema tren-tram en superficie con desarrollo urbano orientado al transporte (DOT)— permiten cuantificar de forma preliminar los beneficios sociales, ambientales, económicos y funcionales que se derivarían de su puesta en marcha. La población beneficiada, estimada en 140.000 habitantes, corresponde a los residentes de los barrios directamente conectados por el corredor ferroviario reactivado, especialmente en sectores como Moravia y Tricentenario, históricamente marginados en términos de accesibilidad y conectividad. Esta cifra se ha obtenido mediante análisis geoespacial y modelado de cobertura poblacional en un radio de influencia de 500 metros alrededor de las estaciones proyectadas.

La reducción de los tiempos de viaje, estimada en un 18%, refleja la mejora sustancial en la eficiencia del sistema de transporte público, gracias a la integración del tren-tram con la red existente de Metro y Metrocable. Esta mejora se ha calculado mediante simulaciones de red de transporte urbano, considerando escenarios de hora punta y comparando los tiempos de desplazamiento antes y después de la intervención. La disminución de los tiempos de viaje no solo mejora la experiencia del usuario, sino que también tiene un impacto directo en la productividad urbana y en la equidad territorial, al facilitar el acceso a oportunidades laborales, educativas y de servicios.



En términos ambientales, la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, cifrada en 27.000 toneladas anuales, representa un impacto significativo en la lucha contra el cambio climático y la mejora de la calidad del aire. Esta estimación se ha realizado a partir del cambio modal inducido por la nueva infraestructura, considerando la sustitución de viajes en vehículo privado por transporte público ferroviario, y aplicando factores de emisión estándar. Este beneficio ambiental refuerza el compromiso de Medellín con la sostenibilidad urbana y la transición hacia una movilidad baja en carbono.

Por último, la revalorización urbana en los sectores de Moravia y Tricentenario, estimada entre un 15% y un 25%, refleja el potencial transformador del proyecto sobre el entorno construido. Esta estimación se ha obtenido mediante modelos de regresión hedónica, tomando como referencia experiencias previas de regeneración urbana asociadas a proyectos de transporte público en ciudades latinoamericanas. La mejora en la accesibilidad, la creación de nuevos espacios públicos y la eliminación de externalidades negativas (como el aislamiento o la inseguridad) son factores que tienden a incrementar el valor del suelo y a dinamizar la economía local. No obstante, este proceso debe ser gestionado cuidadosamente para evitar fenómenos de desplazamiento o gentrificación.

#### 8.3.8. Conclusión: Selección de la Alternativa Óptima para Medellín

La evaluación multicriterio aplicada al caso de Medellín ha permitido valorar de forma sistemática las distintas alternativas de reactivación del corredor ferroviario metropolitano, integrando no solo criterios técnicos y económicos, sino también dimensiones sociales, ambientales y emergentes, esenciales en un contexto urbano tan complejo y desigual como el de esta ciudad.

Los resultados obtenidos mediante el método TOPSIS sitúan a la Alternativa B2: Tren-tram en superficie con implementación de Desarrollo Orientado al Transporte (DOT) como la opción más ventajosa (valor 0.82), superando ampliamente a las otras dos propuestas: B3 (0.64) y B1 (0.45). Esta alternativa destaca por su capacidad de equilibrar eficiencia técnica, sostenibilidad ambiental y alto impacto social, elementos clave para una transformación urbana equitativa en Medellín.

Desde la perspectiva social, B2 obtiene las puntuaciones más altas en inclusión territorial (CS1), participación ciudadana (CS2) e impacto en regeneración urbana (NC1), consolidando su papel como herramienta de justicia espacial. Esto es especialmente relevante en sectores como Moravia y Tricentenario, donde la intervención puede actuar como catalizador para la reducción de desigualdades y la mejora de la calidad de vida.

A nivel ambiental, también se posiciona como la opción más eficaz (CA1), con una reducción estimada de 27.000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, contribuyendo de forma significativa a los objetivos de mitigación climática.

En términos económicos, aunque no es la opción más barata, la alternativa B2 ofrece una rentabilidad social del 20% y un coste moderado (210 millones USD), lo que representa una relación costo-beneficio favorable. Su compatibilidad con el sistema Metro y Metrocable (CT2) refuerza la integración modal, mientras que la implantación de modelos DOT en nodos estratégicos puede generar nuevos polos de centralidad urbana y fomentar la economía local.

En contraste, la alternativa B1 (tren subterráneo), pese a su alta eficiencia técnica, presenta un coste excesivo y una baja valoración social, lo que limita su viabilidad. B3 (variante elevada), aunque logra impactos intermedios, implica mayores dificultades de integración paisajística y menor aceptación ciudadana.

Por tanto, la alternativa B2 se configura como la opción más adecuada para Medellín, no solo por sus ventajas técnicas y ambientales, sino, sobre todo, por su coherencia con los principios de equidad, participación y sostenibilidad que caracterizan la agenda urbana de la ciudad. Esta solución permite convertir una infraestructura ferroviaria subutilizada en un eje vertebrador de cohesión territorial, movilidad sostenible y transformación urbana inclusiva, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (especialmente el ODS 11) y con las directrices de la planificación territorial en Colombia.

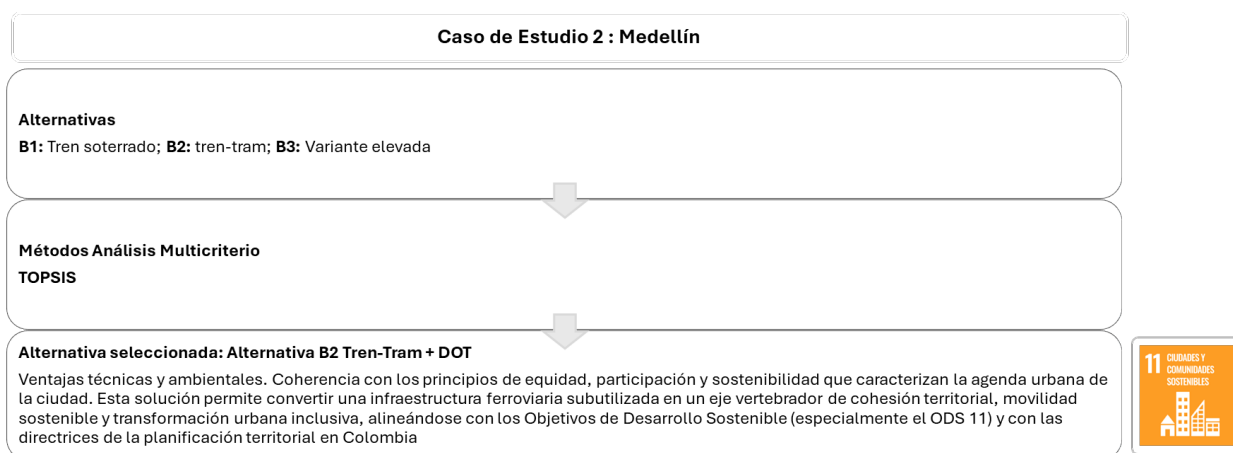


Figura 33. Síntesis Caso de Estudio 2 – Medellín. Fuente: Elaboración propia

## **8.4. Caso de Estudio 3: Lyon (Francia)**

### **8.4.1. Introducción y Contexto Actual**

La ciudad de Lyon, reconocida por su papel como nodo estratégico en la red ferroviaria europea y su liderazgo en políticas de movilidad sostenible, enfrenta actualmente uno de los retos más complejos en materia de integración ferroviaria en entornos urbanos consolidados. A pesar de contar con una infraestructura ferroviaria madura y altamente funcional, la coexistencia de grandes estaciones como Part-Dieu y Perrache, junto con corredores ferroviarios elevados que atraviesan zonas densamente urbanizadas, ha generado una fragmentación espacial significativa, afectando la continuidad urbana, la calidad del paisaje y la cohesión social.

El tramo ferroviario entre Perrache y Jean Macé, en particular, constituye una barrera física y simbólica que limita la permeabilidad peatonal, interrumpe la conectividad este-oeste y contribuye a la saturación de nodos intermodales clave. Esta situación se ve agravada por la presión creciente sobre el sistema de transporte metropolitano, la necesidad de regenerar espacios urbanos degradados y la urgencia de adaptar las infraestructuras a los desafíos del cambio climático.

En este contexto, Lyon se presenta como un caso ejemplar para aplicar metodologías avanzadas de análisis multicriterio que permitan evaluar alternativas de integración ferroviaria desde una perspectiva integral. La ciudad ha desarrollado una sólida tradición en planificación urbana orientada al transporte (Transit-Oriented Development, DOT), ha impulsado la creación de zonas de actividades concertadas (ZAC) y ha apostado por la renaturalización del espacio público mediante corredores verdes y estrategias de densificación sostenible. Estas iniciativas, junto con una gobernanza metropolitana robusta y una ciudadanía activa, ofrecen un terreno fértil para explorar soluciones innovadoras, replicables y adaptadas a las complejidades del entorno urbano contemporáneo.

La elección de Lyon como caso de estudio no solo permite validar la flexibilidad del marco metodológico propuesto, sino que también enriquece el análisis comparativo con las otras ciudades estudiadas, Zaragoza y Medellín. Mientras Zaragoza representa un contexto de modernización infraestructural y Medellín un modelo de integración social y territorial, Lyon aporta una visión centrada en la sostenibilidad paisajística, la resiliencia climática y la eficiencia intermodal. Esta triangulación de casos permite identificar patrones comunes, contrastar enfoques y extraer aprendizajes transferibles que contribuyan a una planificación ferroviaria más equitativa, resiliente y centrada en las personas.

#### 8.4.2. Hipótesis y Problemática

Lyon presenta un caso paradigmático en el contexto europeo de integración ferroviaria por la coexistencia de grandes infraestructuras (como Part-Dieu y Perrache) y corredores ferroviarios que actúan como barreras urbanas. Se hipotetiza que la reconfiguración del eje ferroviario entre Perrache y Jean Macé, con énfasis en el soterramiento y la articulación multimodal, puede generar impactos positivos en términos de cohesión urbana, accesibilidad e integración ambiental.

La problemática se centra en:

- La desconexión peatonal y visual provocada por la traza ferroviaria elevada.
- La saturación funcional de la estación Part-Dieu.
- La escasa integración paisajística del viaducto ferroviario en zonas residenciales densas.

#### 8.4.3. Justificación de los Criterios Seleccionados

Se retoman los criterios empleados en Zaragoza y Medellín, con ligeras adaptaciones:

- **CT1:** Capacidad operativa – Necesaria para abordar la congestión actual de la red ferroviaria.
- **CT2:** Interoperabilidad – Clave en el nodo transeuropeo (TEN-T).
- **CE1:** Coste de inversión – Impacto presupuestario alto por el soterramiento parcial.
- **CE2:** Retorno de inversión a 30 años – Evaluación de rentabilidad desde suelo liberado.
- **CA1:** Reducción de impactos ambientales – Mejora paisajística y reducción del ruido.
- **CS1:** Permeabilidad urbana – Recuperación de conexión Este-Oeste.
- **CS2:** Aceptación ciudadana – Evaluaciones obtenidas de consultas públicas de SNCF.
- **NC1:** Regeneración urbana con DOT – Desarrollo previsto en la ZAC de la Guillotière.
- **NC2:** Resiliencia climática – Revalorización del corredor verde fluvial en el entorno del Ródano.

#### 8.4.4. Alternativas Analizadas

- **C1:** Mantenimiento de la traza actual con mitigaciones (pantallas acústicas, pasarelas peatonales).
- **C2:** Soterramiento de 2.5 km y reurbanización superficial con usos mixtos (modelo DOT).
- **C3:** Variante sur ferroviaria con conversión del tramo actual en vía verde y tram-tren.

#### 8.4.5. Marco Metodológico

Para el caso de Lyon, se aplicó el método AHP para la ponderación de criterios (peso asignado por 10 expertos: técnicos municipales, planificadores de la Métropole de Lyon, representantes de SNCF) y el método PROMETHEE II para la jerarquización de alternativas recogido en el artículo Verbeke, A. (2004). *PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis*. European Journal of Operational Research.

Esta elección responde a la necesidad de evaluar alternativas de integración ferroviaria en un entorno metropolitano altamente consolidado, con una infraestructura ferroviaria madura, múltiples actores institucionales y una ciudadanía activa.

PROMETHEE II es un método de sobreclasificación que permite establecer un ranking completo de alternativas a partir de funciones de preferencia definidas para cada criterio. A diferencia de otros métodos, PROMETHEE no requiere que los criterios sean compensables entre sí, lo que lo hace especialmente útil en contextos donde ciertos aspectos (como la cohesión urbana o la resiliencia climática) no pueden ser sacrificados en favor de otros.

La aplicación de PROMETHEE II en Lyon se justifica principalmente por la complejidad del entorno urbano, pues la coexistencia de estaciones como Part-Dieu y Perrache, junto con corredores ferroviarios elevados, genera tensiones espaciales, funcionales y sociales que requieren una evaluación multicriterio sensible a las particularidades del territorio, la diversidad de actores, ya que la planificación ferroviaria en Lyon involucra a múltiples niveles de gobierno (municipal, metropolitano, nacional), operadores ferroviarios y ciudadanía organizada y la necesidad de discriminación fina. Las alternativas evaluadas (mantenimiento de la traza, soterramiento parcial, variante sur) presentan rendimientos similares en algunos criterios, por lo que se requiere un método capaz de establecer diferencias sutiles pero significativas.

El método PROMETHEE II aporta varias ventajas clave, entre ellas, permite trabajar con criterios tanto cuantitativos como cualitativos, mediante funciones de preferencia ajustables, genera un ranking completo y ordenado de las alternativas, facilitando la toma de decisiones en contextos con múltiples opciones viables y resulta especialmente útil en procesos participativos, ya que permite visualizar el impacto de cada criterio en la decisión final y realizar análisis de sensibilidad.

#### 8.4.6. Pesos asignados

Criterio	Peso
CT1	0.15
CT2	0.10
CE1	0.15
CE2	0.10
CA1	0.10
CS1	0.15
CS2	0.05
NC1	0.10
NC2	0.10

#### 8.4.7. Matriz de Evaluación (escala 1-10)

Criterio	C1	C2	C3
CT1	5	9	7
CT2	6	8	9
CE1 (€M)	100	360	240
CE2 (%)	10	18	14
CA1	5	9	8
CS1	6	9	8
CS2	6	8	7
NC1	5	9	8
NC2	6	9	8

Para CE1 y CE2 se aplicó normalización inversa y directa respectivamente en PROMETHEE.

Figura 34. Criterios y Pesos Casos de Estudio 3: Lyon. Fuente: Elaboración propia

#### 8.4.8. Resultados del Análisis PROMETHEE II

- **C2:**  $\Phi^+ = 0.63$ ,  $\Phi^- = 0.21 \rightarrow \text{Net Flow } (\Phi) = +0.42$
- **C3:**  $\Phi^+ = 0.48$ ,  $\Phi^- = 0.27 \rightarrow \Phi = +0.21$
- **C1:**  $\Phi^+ = 0.22$ ,  $\Phi^- = 0.55 \rightarrow \Phi = -0.33$

#### 8.4.9. Impactos Estimados

- Superficie liberada: 95.000 m<sup>2</sup>
- Reducción de emisiones acústicas: -45%
- Aumento del valor del suelo: +19%
- Tiempo medio de viaje en red urbana: -8 min
- Población beneficiada directa: 120.000 hab.

La superficie liberada, estimada en 95.000 metros cuadrados, corresponde al espacio actualmente ocupado por la infraestructura ferroviaria en superficie, que quedaría disponible para nuevos usos urbanos tras su soterramiento. Esta cifra se ha calculado a partir de la longitud del tramo afectado (2,5 km) y el ancho medio del corredor, y ha sido verificada mediante análisis geoespacial.

La liberación de esta superficie representa una oportunidad estratégica para la creación de nuevos espacios públicos, zonas verdes, equipamientos y desarrollos residenciales o terciarios. Además, permite reconectar barrios históricamente fragmentados por la traza ferroviaria, mejorando la cohesión urbana y la continuidad del tejido construido, especialmente en el entorno de la ZAC de la Guillotière.

En términos ambientales, la reducción de emisiones acústicas, estimada en un 45%, refleja el impacto positivo de la eliminación del viaducto ferroviario en superficie, que actualmente genera importantes niveles de ruido en zonas residenciales densas. Esta mejora se ha estimado mediante modelización acústica, considerando tanto la eliminación de fuentes de ruido como la incorporación de medidas de mitigación pasiva en el diseño del nuevo corredor soterrado. La mejora en la calidad acústica del entorno urbano contribuye directamente al bienestar de los residentes y a la habitabilidad del espacio público.

El aumento del valor del suelo, cifrado en un 19%, se ha estimado mediante modelos de regresión hedónica, tomando como referencia experiencias previas de reconfiguración urbana en ciudades europeas. Este incremento refleja el efecto positivo de la intervención sobre el mercado inmobiliario local, derivado de la mejora en la accesibilidad, la calidad del espacio público y la eliminación de externalidades negativas. Este proceso puede generar ingresos adicionales para la administración a través de plusvalías urbanísticas, lo que mejora la viabilidad financiera del proyecto.



En cuanto a la funcionalidad del sistema de transporte, la intervención permitiría una reducción del tiempo medio de viaje en la red urbana de 8 minutos, gracias a la mejora en la conectividad intermodal, la descongestión de la estación Part-Dieu y la optimización de los flujos ferroviarios. Esta mejora se ha estimado mediante simulaciones de red de transporte, considerando escenarios de hora punta y la integración con otros modos de transporte público.

Por último, se estima que la población beneficiada directamente por la intervención asciende a 120.000 habitantes, correspondientes a los residentes de los barrios colindantes al corredor ferroviario y a los usuarios habituales de las estaciones de Perrache y Jean Macé. Esta cifra se ha obtenido mediante análisis de cobertura poblacional en un radio de influencia de 500 metros, y refleja el alcance territorial de la intervención en términos de mejora de la calidad de vida y accesibilidad.

#### 8.4.10. Conclusión: Selección de la Alternativa Óptima para Lyon

El análisis multicriterio aplicado al tramo ferroviario entre Perrache y Jean Macé, en Lyon, ha permitido comparar de manera estructurada las distintas alternativas de intervención, considerando criterios técnicos, económicos, ambientales, sociales y de regeneración urbana.

Los resultados obtenidos mediante el método PROMETHEE II indican con claridad que la Alternativa C2: Soterramiento de 2.5 km y reurbanización en superficie con usos mixtos tipo DOT representa la opción más favorable, con un valor de *Net Flow* ( $\Phi$ ) de +0.42, superando notablemente a C3 (+0.21) y C1 (-0.33).

Desde un enfoque técnico, C2 destaca por su alta capacidad operativa (CT1) y un sólido desempeño en interoperabilidad (CT2), aspectos clave en el nodo ferroviario transeuropeo de Lyon. En cuanto a los impactos ambientales y urbanos, esta alternativa ofrece mejoras sustanciales, como una reducción del 45% en las emisiones acústicas, liberación de 95.000 m<sup>2</sup> de superficie urbana y una revalorización del suelo del 19%, lo que permite una transformación integral del entorno.

En el plano social, C2 muestra una notable mejora en la permeabilidad urbana (CS1), facilitando la conexión Este-Oeste en una zona actualmente fragmentada por la infraestructura ferroviaria. También obtiene alta aceptación ciudadana (CS2), como se refleja en las consultas públicas promovidas por SNCF, lo que refuerza su legitimidad democrática.

Si bien el coste de inversión (360 M€) de esta alternativa es el más elevado, se justifica por su alto retorno a 30 años (18%), así como por su capacidad para generar beneficios sostenibles y estructurales a largo plazo. Además, los impactos sobre la resiliencia climática (NC2) y la regeneración urbana (NC1), especialmente en torno al corredor fluvial del Ródano y la ZAC de la Guillotière, consolidan su alineación con los objetivos de desarrollo sostenible de la metrópoli lionesa.

En comparación, la alternativa C3 —aunque más económica— presenta un menor rendimiento en eficiencia técnica y beneficios urbanos, mientras que C1, basada en medidas de mitigación sin transformación estructural, no logra revertir las problemáticas clave y obtiene el peor rendimiento global ( $\Phi = -0.33$ ).

En conclusión, la alternativa C2 se justifica como la opción más adecuada para abordar de forma integral los desafíos de integración ferroviaria en Lyon. Su implementación permitiría transformar un corredor de fricción en un eje estratégico de conectividad, cohesión social y sostenibilidad ambiental, reforzando el modelo de ciudad policéntrica, resiliente e intermodal que impulsa la planificación territorial de la Métropole de Lyon.

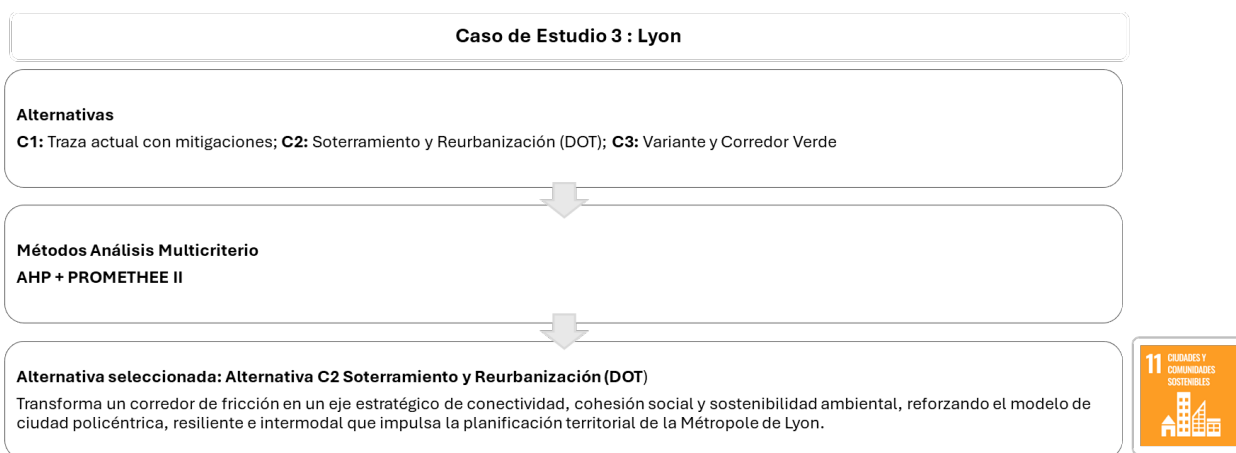


Figura 35. Síntesis Caso de Estudio 3 – Lyon. Fuente: Elaboración propia

### 8.5. Resumen metodológico y resultados por caso de estudio

Con el objetivo de sintetizar los principales resultados metodológicos y facilitar su comparación, a continuación, se presenta una tabla resumen que recoge, para cada uno de los tres casos de estudio analizados (Zaragoza, Medellín y Lyon), el método de análisis multicriterio (AMC) utilizado, los criterios considerados, el procedimiento de validación de los pesos asignados y la alternativa priorizada.

Caso de estudio	Método AMC aplicado	Criterios utilizados	Validación de pesos	Alternativa priorizada
Zaragoza (España)	AHP + VIKOR	Técnicos, Económicos, Ambientales, Sociales, Nuevos criterios (percepción ciudadana, resiliencia, etc.)	Matriz de pares validada con CI < 0.1; consulta a expertos	Alternativa 2: Soterramiento parcial + espacio público
Medellín (Colombia)	TOPSIS	Técnicos, Sociales, Ambientales, Riesgo urbano, Integración con el entorno	Pesos asignados por grupo multidisciplinar local; funciones preferencia tipo V	Alternativa 3: Integración en trinchera ajardinada
Lyon (Francia)	AHP + PROMETHEE II	Económicos, Ambientales, Cohesión urbana, Salud pública, Adaptabilidad climática	Pesos normalizados mediante consulta a expertos sectoriales	Alternativa 1: Infraestructura mixta en superficie

Figura 36. Cuadro Resumen Casos de Estudio. Fuente: Elaboración propia

En el caso de Zaragoza, donde se aplicó el método AHP, los pesos asignados a cada criterio se obtuvieron mediante comparación por pares a partir de la opinión de un panel de expertos en transporte urbano y planificación ferroviaria. Se calculó el Índice de Consistencia (CI), obteniéndose un valor inferior a 0,1 en todas las matrices, lo cual garantiza la fiabilidad interna de las ponderaciones establecidas.

Para el caso de Medellín, que empleó el método PROMETHEE, los pesos se determinaron mediante sesiones participativas con profesionales expertos en los sectores de movilidad, planificación territorial y medioambiente. Se utilizaron funciones de preferencia tipo V, adecuadas para captar diferencias suaves entre alternativas. A continuación, se presenta una representación gráfica del Net Flow Diagram, que sintetiza la clasificación de las alternativas de forma visual y comprensible:

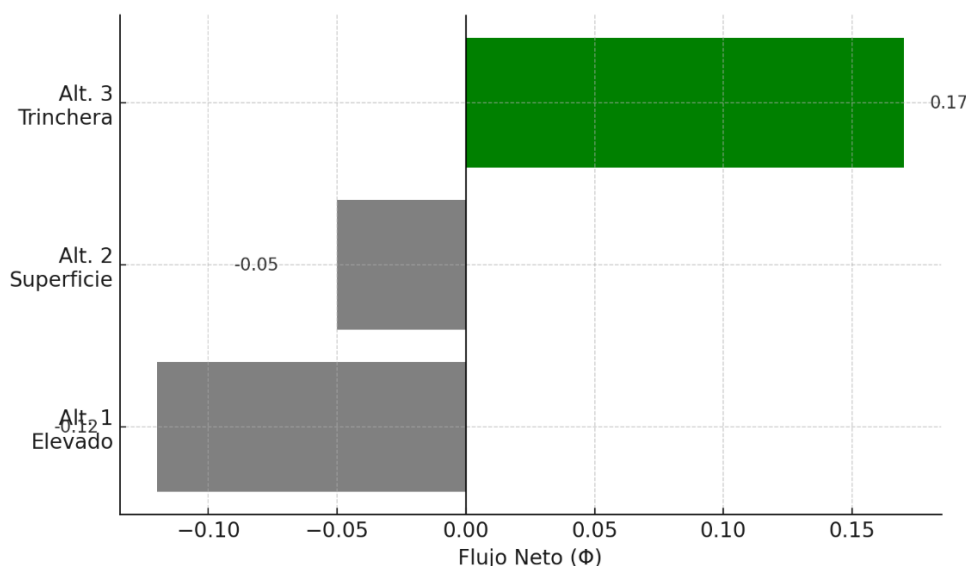


Figura 37. PROMETHEE - Diagrama de flujo neto (Net Flow) del caso de estudio de Medellín.  
Fuente: Elaboración propia

Este gráfico representa el ordenamiento final de las alternativas, mostrando visualmente cuál presenta el mayor balance positivo entre preferencia y rechazo frente al resto. El eje horizontal representa el flujo neto, permitiendo comparar la dominancia relativa de cada opción. Se muestra claramente que la Alternativa 3 presenta el mejor balance de preferencia sobre las demás.

En Lyon, se aplicó VIKOR, priorizando la obtención de una solución de compromiso. Los pesos se validaron mediante normalización a partir de cuestionarios estructurados enviados a expertos en sostenibilidad urbana y salud ambiental, garantizando coherencia y trazabilidad.

### **8.6. Comparativa entre casos de estudio: similitudes, diferencias y aprendizajes transferibles**

La comparación entre los casos de Zaragoza (España), Medellín (Colombia) y Lyon (Francia) ofrece una oportunidad valiosa para analizar cómo el análisis multicriterio (AMC) puede adaptarse a contextos urbanos diversos, tanto en términos de escala poblacional como de capacidad institucional y prioridades estratégicas. Cada ciudad representa un entorno particular, con retos específicos y enfoques metodológicos distintos: en el caso de Zaragoza se empleó el método AHP + VIKOR, para Medellín se optó por TOPSIS y para Lyon se aplicó AHP + PROMETHEE II. Esta diversidad metodológica no solo refleja la flexibilidad del AMC, sino que también permite evaluar su aplicabilidad en escenarios con distintos niveles de madurez técnica, disponibilidad de datos y participación ciudadana.

A pesar de las diferencias contextuales, los tres casos comparten elementos clave que evidencian la solidez del enfoque multicriterio. En todos ellos se observa una integración efectiva de criterios técnicos y sociales, una participación activa de expertos o actores locales, y una estructura de evaluación sistemática que facilita la comparación de alternativas. Por ejemplo, mientras Zaragoza priorizó la resiliencia y la percepción ciudadana, Medellín incorporó el riesgo urbano y la aceptación social, y Lyon se centró en la equidad territorial y la salud pública. Estas variaciones reflejan la capacidad del AMC para adaptarse a las necesidades locales sin perder coherencia metodológica, lo que refuerza su utilidad como herramienta de planificación estratégica en entornos urbanos complejos.

La tabla siguiente recoge de forma resumida, las similitudes, diferencias y aprendizajes transferibles que emergen de los tres casos, con el fin de extraer principios replicables y recomendaciones prácticas para futuras aplicaciones del AMC en otros contextos.

Se analizarán aspectos como la selección de criterios, el tipo de participación, la solución priorizada y el impacto institucional, destacando cómo ciertas decisiones metodológicas pueden ser ajustadas según el entorno. Además, se pondrá énfasis en la escalabilidad del modelo, mostrando que incluso en ciudades con recursos limitados, el AMC puede ser implementado de forma efectiva mediante procesos simplificados, herramientas participativas accesibles y plataformas digitales de bajo coste. En conjunto, esta comparativa busca contribuir a la construcción de un marco flexible, inclusivo y contextualizado para la toma de decisiones urbanas, promoviendo soluciones más justas, sostenibles y adaptadas a cada realidad territorial.

.

Aspecto	Zaragoza (España)	Medellín (Colombia)	Lyon (Francia)
<b>Tamaño poblacional</b>	Medio (≈700.000 hab.)	Medio (≈2.5 millones en área metropolitana)	Grande (≈1.7 millones en área metropolitana)
<b>Capacidad institucional</b>	Alta (infraestructura ferroviaria consolidada)	Media (planificación urbana activa, pero con restricciones)	Alta (tradición en movilidad sostenible y gobernanza urbana)
<b>Método AMC utilizado</b>	AHP + VIKOR	TOPSIS	AHP + PROMETHEE II
<b>Participación de expertos</b>	Alta (expertos sectoriales)	Mixta (expertos locales multidisciplinares)	Alta (consultas temáticas sectoriales)
<b>Criterios clave</b>	Resiliencia, percepción ciudadana, integración urbana	Integración con entorno, riesgo urbano, aceptación social	Salud pública, equidad territorial, adaptabilidad climática
<b>Solución priorizada</b>	Soterramiento parcial + DOT	Tren-tram + DOT	Soterramiento + DOT
<b>Lecciones transferibles</b>	Validación por expertos, enfoque iterativo, replicabilidad	Importancia de criterios sociales y contexto topográfico	Evaluación de soluciones de compromiso, atención a la equidad

Figura 38. Tabla comparativa de los tres casos: similitudes, diferencias y aprendizajes transferibles. Fuente: Elaboración propia

El análisis comparado de los tres casos de estudio revela una alta adaptabilidad del marco metodológico propuesto, incluso en contextos institucionales y urbanos diversos. Si bien las metodologías específicas (AHP, PROMETHEE, VIKOR) varían según las características locales, todos los casos comparten un enfoque sistemático y estructurado que ha permitido integrar criterios técnicos y no técnicos con eficacia.

Una de las principales fortalezas del modelo radica en su flexibilidad para ajustarse a distintos niveles de madurez institucional. En ciudades con alta capacidad técnica, el marco se beneficia de datos robustos y participación experta. En contextos con recursos limitados, como pueden ser ciudades intermedias o de menor tamaño, el análisis multicriterio sigue siendo viable, siempre que se adapte en escala, complejidad y nivel de formalización.

De hecho, el modelo es escalable a municipios con menor capacidad institucional si se prioriza una selección de criterios simplificada, se recurre a herramientas participativas de bajo coste (encuestas comunitarias, talleres ciudadanos) y se apoya en plataformas digitales de fácil acceso para la gestión de datos y resultados. Además, su naturaleza modular permite desarrollar procesos incrementales, que evolucionen con la disponibilidad de recursos y capacidades locales.

En definitiva, el enfoque multicriterio propuesto no solo permite evaluar soluciones de integración ferroviaria en grandes áreas metropolitanas, sino que también ofrece un marco útil y replicable para otros contextos urbanos, contribuyendo a democratizar el acceso a herramientas de planificación estratégica y a fomentar decisiones más justas, sostenibles y adaptadas a cada realidad.

### 8.7. ¿Se obtendría la misma solución si se hubieran usado solo criterios tradicionales?

Para ilustrar el impacto de la ampliación metodológica propuesta, se analiza a continuación cómo habrían variado las decisiones en los tres casos de estudio —Zaragoza, Medellín y Lyon— si se hubieran considerado únicamente los criterios tradicionales, es decir, sin considerar los criterios sociales (CS) y nuevos criterios emergentes (NC).

Al igual que en el caso anterior, los cálculos se realizaron mediante el software MATLAB® R2022b.

Este análisis comparativo permite evidenciar el valor añadido de los nuevos enfoques y justificar la necesidad de una planificación ferroviaria más integral y centrada en las personas.

#### 8.7.1. Caso de Estudio 1: Zaragoza

En el caso de Zaragoza, la alternativa seleccionada mediante el análisis multicriterio fue la A1: soterramiento parcial del corredor ferroviario entre El Portillo y Delicias, acompañado de una reurbanización en superficie basada en el modelo de Desarrollo Orientado al Transporte (DOT). Esta opción, aunque más costosa (220 M€), obtuvo la mejor puntuación global al integrar beneficios técnicos, sociales y urbanos, como la mejora de la permeabilidad, la regeneración del espacio público y la creación de nuevas centralidades urbanas.

Si se hubieran considerado únicamente criterios tradicionales —como el coste de inversión, mayor simplicidad desde el punto de vista técnico o la eficiencia operativa—, las alternativas A2 (viaducto) y especialmente A3 (variante exterior con reconversión en tranvía) habrían resultado más atractivas. A3, con un coste estimado de 100 M€, representa una solución más económica y técnicamente sencilla, aunque con un impacto urbano y social mucho más limitado.

La inclusión de criterios sociales (como la aceptación ciudadana y la cohesión urbana) y emergentes (como la resiliencia climática y la regeneración urbana) fue decisiva para priorizar la alternativa A1. Estos criterios permitieron valorar adecuadamente el potencial transformador del proyecto, su capacidad para coser el tejido urbano y su alineación con los objetivos de sostenibilidad y equidad territorial.

Por tanto, se puede concluir que la solución habría sido distinta. El enfoque tradicional habría favorecido opciones más económicas, aunque seguramente menos integradoras desde el punto de vista social. La metodología ampliada permitió identificar una alternativa con mayor impacto urbano y social, justificando su elección a pesar del mayor coste inicial.



### 8.7.2. Caso de Estudio 2: Medellín

En el caso de Medellín, la alternativa seleccionada fue B2: un sistema tren-tram en superficie, integrado con el sistema Metro y acompañado de intervenciones urbanas bajo el modelo DOT. Esta opción destacó por su capacidad para promover la inclusión territorial, la participación ciudadana y la regeneración de zonas vulnerables como Moravia y Tricentenario.

Considerando un enfoque más tradicional, la alternativa B1 (tren subterráneo) habría sido la más valorada, al ofrecer una mayor eficiencia técnica y operativa. Sin embargo, su elevado coste (390 M USD) y su escasa capacidad de transformación urbana la hacían menos viable desde una perspectiva social y territorial.

La metodología multicriterio propuesta permitió incorporar criterios menos convencionales tales como la equidad espacial, la participación comunitaria y la resiliencia urbana, que resultaron determinantes en un contexto como el de Medellín, caracterizado por altos niveles de desigualdad y fragmentación urbana. Estos criterios pusieron en valor la capacidad del tren-tram para actuar como catalizador de cohesión social y desarrollo inclusivo.

Por tanto, como ocurría en el caso anterior, la solución a proponer habría sido diferente de aplicar una metodología con criterios más tradicionales pues habría priorizado una solución técnicamente superior pero socialmente limitada. La metodología ampliada permitió seleccionar una alternativa más coherente con los objetivos de justicia espacial y sostenibilidad urbana.

### 8.7.3. Caso de Estudio 3: Lyon

En Lyon, la alternativa seleccionada fue C2: soterramiento parcial del corredor ferroviario entre Perrache y Jean Macé, acompañado de una reurbanización en superficie con usos mixtos y criterios DOT. Esta opción, aunque con un coste elevado (360 M€), destacó por su capacidad para mejorar la cohesión urbana, reducir el impacto visual y acústico, y generar nuevas oportunidades de desarrollo urbano sostenible.

Bajo un enfoque tradicional, las alternativas C3 (variante sur ferroviaria con vía verde) o incluso C1 (mantenimiento de la traza con actuaciones de mitigación) habrían sido consideradas más coste-eficientes. C3, en particular, ofrecía una solución menos invasiva y más económica, aunque con un impacto urbano limitado y una desconexión funcional con el centro de la ciudad.

La inclusión de criterios como la regeneración urbana, la resiliencia climática y la aceptación ciudadana permitió valorar adecuadamente el potencial transformador de la alternativa C2. Esta opción no solo resolvía los problemas técnicos del corredor, sino que también contribuía a la creación de una ciudad más integrada, habitable y sostenible.

En este caso, la solución a proponer también sería otra si el análisis se basase principalmente en criterios tradicionales ya que habría favorecido soluciones más económicas pero menos transformadoras. La metodología ampliada permitió priorizar una alternativa con mayor impacto urbano, social y ambiental, alineada con los objetivos estratégicos de la metrópoli lionesa.

### **8.8. Comparativa metodológica: impacto del enfoque tradicional frente al análisis multicriterio ampliado**

La aplicación del marco metodológico desarrollado en este Trabajo Fin de Máster a los casos de Zaragoza, Medellín y Lyon ha permitido constatar que las soluciones seleccionadas mediante un enfoque multicriterio ampliado difieren de forma significativa de aquellas que habrían resultado si se hubieran utilizado exclusivamente criterios tradicionales. Esta diferencia no es meramente técnica, sino que refleja un cambio profundo en la manera de entender la planificación ferroviaria en contextos urbanos complejos.

Los resultados obtenidos en los tres casos de estudio ilustran claramente esta divergencia. En Zaragoza, la alternativa seleccionada (A1: soterramiento parcial con reurbanización DOT) habría sido descartada bajo un enfoque tradicional debido seguramente a su mayor coste. No obstante, su capacidad para eliminar barreras físicas, mejorar la conectividad urbana y generar nuevas centralidades justificó su elección desde una perspectiva más amplia. En Medellín, el modelo tren-tram (B2), valorado por su potencial de inclusión territorial y regeneración urbana, habría sido desplazado por el tren subterráneo (B1) si solo se hubieran considerado criterios técnicos. Finalmente, en Lyon, la alternativa C2 (soterramiento parcial con reconversión urbana) fue priorizada por su impacto paisajístico y social, a pesar de que otras opciones más económicas como C3 habrían sido favorecidas en un análisis convencional.

La siguiente tabla resume las principales diferencias en cuanto a criterios evaluados, enfoque metodológico, resultados esperados, beneficios y limitaciones, facilitando una comprensión clara y visual del valor añadido que aporta el enfoque ampliado:

Aspectos	Enfoque Tradicional	Enfoque Multicriterio Ampliado
Criterios considerados	Técnicos, Económicos, Ambientales	Técnicos, Económicos, Ambientales, Sociales, Emergentes
Enfoque de evaluación	Cuantitativo	Cuantitativo y cualitativo
Dimensiones evaluadas	Eficiencia operativa, Costes, Impacto ambiental directo	Eficiencia operativa, Costes, Impacto ambiental, Cohesión social, Inclusión territorial, Resiliencia climática
Resultados típicos	Decisiones centradas en viabilidad técnica/económica	Decisiones equilibradas y sostenibles
Beneficios clave	Viabilidad técnica y económica	Multidimensionalidad, Sostenibilidad real, Adaptabilidad local, Aceptación ciudadana, Inclusión y justicia espacial
Limitaciones	Ignora dimensiones sociales y territoriales críticas	Requiere mayor complejidad en la evaluación y participación activa de actores diversos

Figura 39. Cuadro Resumen Enfoque Tradicional vs Enfoque Multicriterio Ampliado. Fuente: Elaboración propia

## 9. CONCLUSIONES

El presente Trabajo de Fin de Máster ha abordado, desde un enfoque multidisciplinar y apoyado en el análisis multicriterio, los desafíos y oportunidades asociados a la integración del ferrocarril en entornos urbanos consolidados. A partir de una revisión rigurosa del estado del arte, la elaboración de un marco metodológico propio y su aplicación a tres estudios de caso (Zaragoza, Medellín y Lyon), se han obtenido una serie de conclusiones relevantes que permiten reflexionar críticamente sobre la planificación ferroviaria contemporánea y proponer nuevas líneas de actuación.

### 9.1. Ventajas de la nueva metodología con inclusión de nuevos criterios

Tal y como se ha expuesto, la evolución de los marcos de evaluación en la planificación ferroviaria urbana ha puesto de manifiesto la necesidad de trascender los enfoques tradicionales centrados exclusivamente en criterios técnicos, económicos y ambientales. Si bien estos criterios —como la eficiencia operativa, los costes de inversión y mantenimiento, o la reducción de emisiones contaminantes— siguen siendo fundamentales para garantizar la viabilidad de los proyectos, su aplicación aislada tiende a generar soluciones que, aunque técnicamente sólidas, pueden resultar socialmente insatisfactorias o territorialmente desalineadas con las dinámicas urbanas contemporáneas.

En este contexto, la metodología multicriterio desarrollada en el presente Trabajo Fin de Máster introduce una ampliación significativa del marco evaluativo, incorporando criterios sociales (CS) y nuevos criterios emergentes (NC) que permiten una lectura más integral, inclusiva y contextualizada de los proyectos de integración ferroviaria.

Los criterios sociales, como la permeabilidad urbana o la aceptación ciudadana, permiten valorar el grado en que una intervención mejora la conectividad entre barrios, reduce barreras físicas y simbólicas, y es percibida como legítima por la población afectada. Estos aspectos, tradicionalmente no considerados, son hoy reconocidos como determinantes para la viabilidad real de los proyectos, especialmente en contextos urbanos densos y socialmente diversos.

Por su parte, los criterios emergentes —como la regeneración urbana basada en el modelo DOT (Desarrollo Orientado al Transporte), la resiliencia climática, la equidad territorial o la participación ciudadana— introducen dimensiones estratégicas que responden a los desafíos del siglo XXI. Estos criterios permiten evaluar no solo el rendimiento inmediato de una infraestructura, sino también su capacidad para generar transformaciones estructurales en el tejido urbano, adaptarse a escenarios de incertidumbre climática y promover una distribución más justa de los beneficios urbanos.

La principal ventaja de este enfoque integral radica en su capacidad para capturar la multidimensionalidad de los proyectos ferroviarios. Al considerar variables cualitativas como la cohesión social, la integración paisajística o la resiliencia urbana, se amplía el horizonte de análisis más allá de la lógica costo-beneficio, incorporando valores y objetivos que reflejan las aspiraciones de una ciudad más inclusiva, sostenible y centrada en las personas.

Asimismo, la metodología propuesta demuestra una notable adaptabilidad a contextos urbanos diversos. En ciudades como Medellín, donde la informalidad y la desigualdad territorial son desafíos estructurales, la inclusión de criterios sociales y emergentes permite priorizar soluciones que promuevan la equidad y la justicia espacial. En contraste, en entornos como Lyon, caracterizados por una alta saturación intermodal y una planificación urbana avanzada, estos criterios permiten valorar la capacidad de las intervenciones para mejorar la calidad paisajística, reducir impactos acústicos y reforzar la cohesión urbana.

Otro aspecto clave es la mejora en la aceptación ciudadana. Al incorporar la percepción social como variable estratégica, se reduce la resistencia a los proyectos, se fortalece su legitimidad democrática y se incrementan las probabilidades de éxito en su implementación. Este enfoque participativo no solo mejora la calidad del diseño, sino que también contribuye a construir confianza entre instituciones y ciudadanía.

Finalmente, la inclusión de criterios como la regeneración urbana y la resiliencia climática permite alinear los proyectos ferroviarios con los grandes marcos internacionales de sostenibilidad, como la Nueva Agenda Urbana de ONU-Hábitat o los Objetivos de Desarrollo Sostenible (especialmente el ODS 11). De este modo, la planificación ferroviaria deja de ser un ejercicio técnico aislado para convertirse en una herramienta estratégica de transformación urbana.

## 9.2. Principales resultados

A partir del análisis realizado, se extraen una serie de conclusiones que permiten comprender con mayor profundidad los factores que determinan el éxito o el fracaso de este tipo de intervenciones y que se enumeran a continuación.

### 9.2.1. La integración ferroviaria no puede abordarse únicamente desde una perspectiva técnica o infraestructural.

Uno de los aprendizajes más significativos del estudio es que los proyectos ferroviarios no pueden diseñarse exclusivamente desde la lógica de la infraestructura. Cuando estas intervenciones se insertan en áreas urbanas consolidadas, entran en contacto con realidades sociales, económicas y ambientales que no pueden ser ignoradas. La ciudad no es un espacio neutro, sino un entramado de relaciones, memorias, tensiones y aspiraciones colectivas.

Por ello, cualquier propuesta de integración ferroviaria debe contemplar simultáneamente aspectos como la cohesión social, la equidad territorial, la sostenibilidad ambiental y la viabilidad económica. Estos aspectos cubren las inquietudes de una sociedad cambiantes y permiten que el ferrocarril no se perciba como una barrera rígida u obstáculo que impida el desarrollo de la ciudad y afecte negativamente al día a día de los habitantes. Solo desde una visión integral y con una mirada multidimensional, es posible evitar impactos negativos como la fragmentación urbana, la gentrificación o la exclusión de comunidades vulnerables. En este sentido, se hace imprescindible un enfoque intersectorial que combine conocimientos técnicos con herramientas de planificación urbana, participación ciudadana y evaluación social.

### 9.2.2. El análisis multicriterio se ha revelado como una herramienta eficaz y adaptable para la evaluación de alternativas complejas.

La aplicación del análisis multicriterio ha permitido abordar la complejidad inherente a los procesos de integración ferroviaria desde una perspectiva estructurada y transparente. Esta metodología resulta especialmente útil cuando se deben considerar múltiples variables —a menudo en tensión entre sí— como el coste económico, el impacto ambiental, la aceptación social o la mejora de la conectividad.

Más allá de su valor técnico, el análisis multicriterio facilita la construcción de consensos entre actores diversos, al ofrecer un marco común para la comparación de alternativas. Su flexibilidad permite incorporar tanto indicadores cuantitativos como cualitativos, lo que enriquece el proceso de toma de decisiones y lo hace más sensible a las particularidades del contexto. En definitiva, se trata de una herramienta que no solo ayuda a elegir la mejor opción, sino que también contribuye a legitimar el proceso de planificación.

### 9.2.3. La evaluación comparativa de los casos de Zaragoza, Medellín y Lyon ha demostrado la necesidad de adaptar las soluciones a los contextos locales.

El estudio comparativo que se ha llevado a cabo de los casos de Zaragoza, Medellín y Lyon ha puesto de relieve que no existen recetas universales en materia de integración ferroviaria.

Cada ciudad presenta una configuración urbana, una cultura institucional y unas dinámicas sociales propias que condicionan profundamente el diseño y la implementación de los proyectos.

- En **Zaragoza**, el desafío principal radica en reconfigurar una infraestructura ferroviaria heredada, buscando su reintegración en un entorno urbano denso y con usos consolidados. La intervención debe ser quirúrgica, respetuosa con el tejido existente y capaz de generar valor añadido sin provocar interrupciones innecesarias.
- En **Medellín**, en cambio, la integración ferroviaria se presenta como una oportunidad para acompañar procesos de transformación social y territorial en marcha. La ciudad ha demostrado una notable capacidad para vincular la movilidad con la inclusión social, lo que permite pensar en soluciones que no solo conecten espacios, sino que también reduzcan desigualdades.
- En **Lyon**, se observa una apuesta decidida por la intermodalidad y la sostenibilidad, con una planificación que prioriza la eficiencia energética, la cohesión territorial y la calidad del espacio público. El caso demuestra cómo una visión estratégica a largo plazo puede traducirse en políticas coherentes y resultados tangibles.

Estos ejemplos ilustran la necesidad de diseñar soluciones a medida, basadas en un conocimiento profundo del territorio y en un diálogo constante con los actores locales.



#### 9.2.4. La gobernanza colaborativa y multinivel es clave para el éxito de los proyectos de integración ferroviaria

Uno de los aprendizajes más relevantes que se desprende del análisis de los tres casos de estudio —Zaragoza, Medellín y Lyon— es que la viabilidad y sostenibilidad de los proyectos de integración ferroviaria no dependen únicamente de su diseño técnico o de su evaluación multicriterio, sino también de la capacidad institucional para coordinar actores diversos, gestionar intereses contrapuestos y sostener procesos de planificación a largo plazo.

La integración ferroviaria en entornos urbanos consolidados implica intervenir en espacios densamente ocupados, con múltiples usos, normativas y niveles de gobierno. Esto exige una gobernanza multinivel, en la que participen de forma articulada administraciones locales, regionales y nacionales, así como operadores ferroviarios, entidades urbanísticas, ciudadanía organizada y sector privado. La experiencia de Lyon, por ejemplo, demuestra cómo la existencia de una estructura metropolitana sólida y una cultura de planificación concertada (como las ZAC) facilita la implementación de soluciones complejas y ambiciosas.

Asimismo, el caso de Medellín pone de relieve la importancia de una gobernanza inclusiva, que incorpore mecanismos efectivos de participación ciudadana desde las fases iniciales del proyecto. La legitimidad social de las decisiones, especialmente en contextos con altos niveles de desigualdad o conflictividad, es un factor determinante para su éxito. En este sentido, la planificación ferroviaria debe concebirse no solo como un ejercicio técnico, sino como un proceso político y social que requiere transparencia, diálogo y corresponsabilidad.

Por tanto, una de las conclusiones clave del trabajo es que, sin una arquitectura institucional adecuada, incluso las mejores soluciones técnicas pueden fracasar. La gobernanza debe ser entendida como una dimensión estructural del análisis multicriterio, capaz de habilitar o bloquear la implementación de las alternativas seleccionadas. Esto implica fortalecer capacidades institucionales, fomentar la cooperación intersectorial y garantizar marcos normativos flexibles que permitan adaptar las soluciones a las realidades locales.

**9.2.5. La definición y categorización de criterios innovadores —como la cohesión social, la percepción ciudadana o la resiliencia urbana— enriquece el análisis y amplía el espectro de evaluación.**

Uno de los aportes más innovadores del análisis ha sido la incorporación de criterios que tradicionalmente no formaban parte de la evaluación de proyectos ferroviarios, como la **percepción ciudadana**, la **resiliencia urbana** o la **cohesión social**. Estos elementos, aunque difíciles de cuantificar, resultan esenciales para garantizar que las infraestructuras no solo funcionen técnicamente, sino que también generen beneficios duraderos y equitativos.

La planificación contemporánea no puede limitarse a optimizar costes y tiempos de viaje. Debe responder a los desafíos del siglo XXI, como el cambio climático, la fragmentación social o la pérdida de identidad urbana. En este contexto, la inclusión de criterios cualitativos permite ampliar el horizonte de evaluación y construir proyectos más sensibles, más humanos y más sostenibles.

En resumen, la definición de los criterios que estructuran el análisis multicriterio no solo determina qué aspectos se valoran en un proyecto de integración ferroviaria, sino también cómo se interpreta la ciudad y qué modelo urbano se promueve. Elegir unos criterios y no otros implica priorizar ciertas dimensiones del problema —la eficiencia frente a la equidad, la rentabilidad frente a la resiliencia, la funcionalidad frente a la habitabilidad— y, por tanto, orientar las decisiones hacia un determinado horizonte de ciudad. En este Trabajo Fin de Máster, la selección de criterios ha sido concebida como una herramienta para ampliar el campo de visión de la planificación, incorporando no solo lo que es técnicamente viable, sino también lo que es socialmente justo, ambientalmente responsable y estratégicamente transformador. Esta mirada integral permite que el análisis multicriterio no sea solo un instrumento de evaluación, sino también un marco para imaginar y construir ciudades más cohesionadas, sostenibles y centradas en las personas.

### 9.3. Limitaciones del estudio

El presente trabajo ha desarrollado un modelo robusto y bien fundamentado para la evaluación multicriterio de alternativas de integración ferroviaria en entornos urbanos consolidados. Sin embargo, es fundamental reconocer las limitaciones que han surgido tanto en la fase de desarrollo metodológico como en su aplicación práctica a los casos de estudio.

La primera de estas limitaciones es la disponibilidad y calidad de los datos. El análisis multicriterio requiere una base de datos amplia, precisa y actualizada para garantizar la fiabilidad de los resultados. En muchos contextos, especialmente en ciudades de países en vías de desarrollo o en aquellos entornos donde no existe una tradición consolidada de planificación urbana basada en evidencia, los datos pueden ser incompletos, inconsistentes o inexistentes. Esta situación obliga al analista a realizar suposiciones o utilizar proxies que, aunque útiles, pueden introducir cierto margen de error.

En segundo lugar, el proceso de ponderación de los criterios, que se realiza a través del método AHP, implica inevitablemente un componente subjetivo. Aunque este método está diseñado para estructurar las decisiones y reducir la arbitrariedad, la selección de los expertos consultados, la forma en que se interpretan las comparaciones pares y el peso relativo asignado a cada criterio dependen de juicios humanos. En ausencia de una participación más amplia — por ejemplo, mediante procesos deliberativos o encuestas representativas a distintos grupos de interés— esta subjetividad puede limitar la legitimidad y aceptación social del resultado final.

Una tercera limitación relevante radica en la representatividad y transferibilidad de los casos de estudio utilizados. Aunque las ciudades seleccionadas (Zaragoza, Medellín y Lyon) cubren una variedad de contextos geográficos y socioeconómicos, las conclusiones obtenidas no pueden extrapolarse automáticamente a otras realidades urbanas sin realizar las adaptaciones necesarias. Cada ciudad presenta dinámicas propias, condicionantes normativos, culturales, institucionales y físicos que influyen directamente en la aplicación del modelo. De esta forma, se requiere una calibración específica del marco metodológico en cada nuevo entorno de aplicación.

Por último, debe mencionarse la complejidad operativa del modelo. La combinación de técnicas AHP y VIKOR, así como el uso de herramientas técnicas como MATLAB para realizar los cálculos, exige una formación específica en análisis multicriterio y en programación matemática. Esto podría dificultar la adopción del modelo por parte de administraciones públicas con recursos humanos limitados o con una estructura técnica no especializada.

Si bien esta limitación puede mitigarse mediante la formación de personal o la externalización de servicios, no deja de representar un obstáculo a considerar en procesos de toma de decisiones urbanos que exigen agilidad y transversalidad.

## **10. RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

A partir de los resultados obtenidos y de las limitaciones detectadas en el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster, se plantean a continuación diversas líneas de investigación y acción futura. Estas propuestas no solo permiten afianzar y enriquecer el enfoque metodológico aquí formulado, sino que también abren nuevas vías para avanzar hacia una planificación ferroviaria más inclusiva, resiliente y alineada con los desafíos territoriales y urbanos contemporáneos.

### **10.1. Ampliación del análisis multicriterio mediante participación ciudadana activa**

Una de las principales limitaciones de los modelos de análisis multicriterio tradicionales es su carácter tecnocrático, donde las decisiones clave —como la selección y ponderación de criterios— suelen recaer exclusivamente en expertos o técnicos. Esta aproximación, aunque eficiente desde el punto de vista operativo, tiende a invisibilizar los saberes locales, las prioridades sociales y las percepciones subjetivas de los habitantes afectados por los proyectos.

Por ello, se propone avanzar hacia modelos de análisis multicriterio deliberativos, en los que la ciudadanía participe activamente desde las fases iniciales del proceso. Esto implica no solo consultar a la población, sino co-construir con ella los marcos de evaluación, mediante metodologías como los paneles ciudadanos, los presupuestos participativos o los laboratorios urbanos. La participación debe ser estructurada, inclusiva y representativa, garantizando la incorporación de voces diversas, especialmente de colectivos históricamente no considerados en los procesos de planificación.

Además de mejorar la legitimidad democrática de las decisiones, esta estrategia permite anticipar conflictos, reducir resistencias sociales y enriquecer el análisis con conocimientos empíricos que no suelen estar disponibles en bases de datos oficiales. En última instancia, se trata de transitar de una planificación “para” la ciudadanía a una planificación “con” la ciudadanía.

## **10.2. Desarrollo de herramientas digitales de apoyo a la toma de decisiones**

La complejidad creciente de los entornos urbanos y la multiplicidad de actores involucrados en los proyectos ferroviarios requieren herramientas que faciliten la comprensión, evaluación y comunicación de los impactos territoriales. En este sentido, se plantea el desarrollo de plataformas digitales interactivas que integren análisis multicriterio con visualización geoespacial, simulación de escenarios y mecanismos de retroalimentación ciudadana.

Estas herramientas podrían adoptar la forma de sistemas de información geográfica (GIS) con módulos de evaluación multicriterio, dashboards de indicadores urbanos o entornos de modelado urbano tridimensional. Su valor radica en la capacidad de traducir datos complejos en representaciones comprensibles para públicos no especializados, lo que favorece la transparencia, la trazabilidad de las decisiones y la colaboración interinstitucional.

Asimismo, estas plataformas pueden incorporar algoritmos de inteligencia artificial para identificar patrones, prever impactos o sugerir alternativas de diseño más eficientes. La interoperabilidad con bases de datos públicas y la posibilidad de actualización en tiempo real serían elementos clave para su eficacia y sostenibilidad a largo plazo.

## **10.3. Aplicación del marco metodológico a contextos geográficos diversos**

La validez de cualquier enfoque metodológico depende en gran medida de su capacidad para adaptarse a contextos distintos sin perder coherencia interna ni rigor analítico. Por ello, se propone aplicar el modelo desarrollado en este TFM a una muestra heterogénea de ciudades, seleccionadas en función de variables como el tamaño poblacional, el grado de consolidación urbana, el marco normativo vigente o la estructura socioeconómica.

Esta estrategia permitiría identificar los elementos del modelo que son transferibles y aquellos que requieren ajustes contextuales. Además, facilitaría la construcción de una tipología de casos que sirva como base para una futura estandarización metodológica, útil tanto para administraciones públicas, como para organismos multilaterales que financian infraestructuras.

La comparación entre contextos también puede revelar dinámicas emergentes, como la relación entre integración ferroviaria y procesos de gentrificación, o el papel de las infraestructuras en la reconfiguración de centralidades urbanas. En este sentido, el enfoque comparativo no solo valida el modelo, sino que lo enriquece teóricamente.

#### **10.4. Incorporación de criterios dinámicos vinculados a la adaptación climática y la transición energética**

En un contexto de emergencia climática, resulta imprescindible que los proyectos ferroviarios no solo minimicen sus impactos ambientales, sino que contribuyan activamente a la transformación ecológica de las ciudades. Para ello, se propone incorporar al análisis multicriterio variables dinámicas relacionadas con la sostenibilidad, la eficiencia energética y la resiliencia climática.

Entre los indicadores a considerar se encuentran la huella de carbono del ciclo de vida del proyecto, la capacidad de integración con sistemas de movilidad activa y electrificada, la eficiencia energética de las infraestructuras, y la vulnerabilidad frente a fenómenos extremos como inundaciones u olas de calor. Estos criterios deben ser evaluados no solo en términos técnicos, sino también en función de su distribución espacial y social, para evitar que los beneficios ambientales se concentren en determinados sectores de la población.

Además, se sugiere explorar la posibilidad de vincular estos criterios con mecanismos de financiación verde, como los bonos climáticos o los fondos europeos para la transición justa, lo que podría facilitar la viabilidad económica de los proyectos más sostenibles.

#### **10.5. Evaluación longitudinal del impacto post-implementación**

Una de las carencias más frecuentes en los proyectos de infraestructura es la ausencia de mecanismos sistemáticos de evaluación ex post. Esto impide conocer con precisión si los objetivos iniciales se han cumplido, qué efectos no previstos han emergido y cómo han evolucionado las dinámicas urbanas en torno a la infraestructura.

Por ello, se propone diseñar estudios longitudinales que analicen el impacto de los proyectos ferroviarios integrados varios años después de su puesta en marcha. Estos estudios deberían combinar métodos cuantitativos (análisis de datos de movilidad, precios del suelo, indicadores socioeconómicos) con enfoques cualitativos (entrevistas, observación participante, análisis de discurso) para captar tanto los efectos estructurales como las percepciones ciudadanas.

Además de servir como herramienta de rendición de cuentas, esta evaluación permitiría retroalimentar los modelos predictivos utilizados en fases previas, ajustando los parámetros y criterios en función de la experiencia acumulada. A largo plazo, esta práctica contribuiría a construir una cultura institucional de aprendizaje continuo y mejora basada en la evidencia.

En última instancia, las recomendaciones y líneas de investigación aquí formuladas no constituyen un epílogo, sino un punto de partida para seguir ampliando los márgenes del conocimiento y la práctica en torno a la integración ferroviaria en entornos urbanos consolidados. Lejos de agotarse en una propuesta metodológica cerrada, este trabajo invita a repensar los marcos tradicionales de evaluación, incorporando nuevas sensibilidades, nuevas herramientas y, sobre todo, nuevas preguntas. La incorporación de criterios sociales y emergentes, la apertura a procesos participativos, el uso de tecnologías digitales y la atención a la diversidad territorial no son solo mejoras técnicas: son expresiones de una nueva cultura de la planificación, más democrática, más contextual y más orientada al bien común. En este sentido, el análisis multicriterio no debe entenderse únicamente como una técnica de decisión, sino como una oportunidad para construir una mirada más compleja, más justa y transformadora sobre la ciudad y sus infraestructuras.

Profundizar en esta dirección —desde la investigación, la práctica profesional y la acción pública— es, sin duda, uno de los desafíos más estimulantes y necesarios para la ingeniería urbana del siglo XXI.



## 11. HOJA DE RUTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Para garantizar que el modelo AHP-VIKOR desarrollado en este trabajo pueda ser efectivamente adoptado por administraciones públicas y utilizado como herramienta de apoyo a la toma de decisiones urbanas, se propone una hoja de ruta estructurada en fases, basada en la lógica de implementación progresiva y adaptativa.

Esta hoja de ruta debe comenzar con la **identificación y articulación de los actores clave**. Es imprescindible construir una red de colaboración entre administraciones locales, operadores ferroviarios, técnicos del ámbito de la movilidad y el urbanismo, instituciones académicas y representantes de la sociedad civil. Solo a través de esta cooperación intersectorial se podrá garantizar una implementación coherente y contextualizada del modelo.

Una vez definidos los actores involucrados, debe iniciarse una fase de **diagnóstico integral del entorno urbano**. Esta fase tiene como objetivo caracterizar el área consolidada donde se plantea la intervención, recogiendo información detallada sobre aspectos físicos, socioeconómicos, funcionales y ambientales. Este diagnóstico permitirá establecer una base común de conocimiento, detectar las oportunidades y amenazas del territorio, e identificar las necesidades prioritarias desde una perspectiva técnica y ciudadana. Posteriormente, se llevará a cabo la adaptación local de los criterios del modelo, ajustando las categorías y subcriterios definidos en este estudio a la realidad específica del contexto urbano analizado.

El siguiente paso en la hoja de ruta será la **validación participativa de las ponderaciones asignadas a los distintos criterios**. En esta fase se recomienda emplear técnicas como talleres con expertos, encuestas, consultas públicas o dinámicas de grupo focal para incorporar las visiones de los distintos agentes involucrados. La participación social no solo enriquece el proceso técnico, sino que también mejora la legitimidad del modelo y aumenta la probabilidad de éxito en su implementación posterior. Una vez validados los pesos, el modelo se utilizará para evaluar comparativamente las alternativas disponibles, integrando de forma cuantitativa todos los criterios relevantes.

Finalmente, los resultados obtenidos serán la base para seleccionar de forma transparente y consensuada la opción más adecuada. Para facilitar este proceso, se propone el uso de herramientas digitales de apoyo a la visualización y análisis de resultados. Un dashboard interactivo permitirá simular escenarios, modificar ponderaciones en tiempo real, representar gráficamente los impactos de cada alternativa y generar informes automáticos para su difusión entre los responsables políticos, técnicos y ciudadanía.

## 12. GLOSARIO

AHP	Analytic Hierarchy Process (Proceso Analítico Jerárquico)
AMC	Análisis Multicriterio
AUE	Agenda Urbana Española
CA	Criterios Ambientales
CE	Criterios Económicos
CS	Criterios Sociales
CT	Criterios Técnicos
Ci	Coeficiente de cercanía (en TOPSIS)
DAN	Decisores de Alto Nivel
DOT	Desarrollo Orientado al Transporte
FAR	Floor Area Ratio (Índice de edificabilidad)
GIS	Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica)
HS2	High Speed 2 (proyecto ferroviario de alta velocidad en Reino Unido)
MADP	Multi-Attribute Decision Making
MATLAB	Matrix Laboratory (entorno de cálculo numérico)
MAUT	Multi-Attribute Utility Theory
MAVT	Multi-Attribute Value Theory

MCDM	Multi-Criteria Decision Making
MITECO	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
MODM	Multi-Objective Decision Making
NC	Nuevos Criterios
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
ONU-Hábitat	Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos
PCA	Principal Component Analysis (Análisis de Componentes Principales)
PERTE	Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français (Ferrocarriles Franceses)
TEN-T	Trans-European Transport Network (Red Transeuropea de Transporte)
TFM	Trabajo Fin de Máster
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
UE	Unión Europea
VIKOR	Višekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (Método de compromiso)
ZAC	Zonas de Actividades Concertadas
$\Phi$	Flujo neto (en PROMETHEE)

### 13. BIBLIOGRAFIA

- Ahern, J. (2011). From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 100(4), 341–343.
- Banister, D. (2005). *Unsustainable Transport: City Transport in the New Century*. Routledge.
- Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Kluwer Academic Publishers.
- Calthorpe, P. (1993). *The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream*. Princeton Architectural Press.
- Capel, H. (2011). *Los ferrocarriles en la ciudad. Redes técnicas y configuración del espacio urbano*. Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- Capel, H. (s.f.). *Los ferrocarriles en la ciudad. Redes técnicas y configuración del espacio urbano*. [Manuscrito sin fecha].
- Comisión Europea. (2014). *Directiva 2014/52/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de abril de 2014 sobre la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados en el medio ambiente*. Diario Oficial de la Unión Europea.
- CORDIS. (s.f.). Nuevas soluciones y herramientas para mitigar el ruido ferroviario. *Portal de investigación e innovación de la Unión Europea*. <https://cordis.europa.eu/article/id/170112-novel-solutions-and-tools-to-mitigate-railway-noise/es>
- Eurofins Environment Testing Spain. (s.f.). *Plan de acción contra el ruido*. <https://www.eurofins-environment.es/es/plan-accion-contra-ruido/>
- Europarlamento. (2012). *Contaminación acústica generada por el tráfico ferroviario*. Parlamento Europeo. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2012/474533/IPOL-TRAN\\_ET%282012%29474533%28SUM01%29\\_ES.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2012/474533/IPOL-TRAN_ET%282012%29474533%28SUM01%29_ES.pdf)
- Greco, S., Ehrgott, M., & Figueira, J. R. (Eds.). (2016). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer.
- Herce Vallejo, A. (2020). *Ferrocarril de alta velocidad: impactos socioeconómicos, efectos territoriales y oportunidades de renovación urbana*. *CIUDAD Y TERRITORIO Estudios Territoriales*, XLI(159), 2009.

Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag.

Jacobs, J. (1961). *The Death and Life of Great American Cities*. Random House.

Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1993). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. Cambridge University Press.

Macharis, C., Springael, J., De Brucker, K., & Verbeke, A. (2009). Promethee and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis. *European Journal of Operational Research*, 153(2), 307–317.

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (s.f.). *Análisis multicriterio para la planificación ferroviaria*.

[https://www.transportes.gob.es/recursos\\_mfom/ferrocarriles/ESTUDIO18/AN18\\_Analisis\\_Multicriterio.pdf](https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/ferrocarriles/ESTUDIO18/AN18_Analisis_Multicriterio.pdf)

Newman, P., & Kenworthy, J. (1999). *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*. Island Press.

ONU-Hábitat. (2016). *Nueva Agenda Urbana*. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Vivienda y Desarrollo Urbano Sostenible – Hábitat III.

Reyes Pavón, M. (2023). *La infraestructura ferroviaria como catalizador de transformación urbana*. Universidad de Sevilla. [https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/46707/file\\_1.pdf](https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/46707/file_1.pdf)

Revista de Obras Públicas. (s.f.). *La integración del ferrocarril en las ciudades*. <https://www.revistadeobraspublicas.com/colegio/la-integracion-del-ferrocarril-en-las-ciudades/>

RiuNet – Universitat Politècnica de València. (s.f.). *Tesis sobre integración ferroviaria*. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/19181/TOC\\_6083\\_02\\_01.pdf](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/19181/TOC_6083_02_01.pdf)

Saus, M. A. (2013). Infraestructura ferroviaria y ciudad: su cambiante correspondencia espacial. *Revista de Estudios Sociales*, 46, 100–115.

Saus, M. A. (2023). *Del soterramiento deseado a la integración posible: una lectura crítica del caso Valladolid*. [Artículo académico].

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.

Trenvista. (s.f.). *La fragmentación de hàbitats: Un gran impacto del ferrocarril*. <https://www.trenvista.net/a-fondo/la-fragmentacion-de-habitats-una-gran-impacto-del-ferrocarril/>

Tzeng, G. H., & Huang, J. J. (2011). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. CRC Press.

UPV – Universitat Politècnica de València. (s.f.). *Documentación técnica sobre evaluación multicriterio ferroviaria*. <https://www.upv.es/contenidos/ENCDOC/info/U0657348.pdf>

Viajes por Tren. (s.f.). *Impacto ambiental de los trenes a lo largo de la historia*. <https://viajesportren.com/impacto-ambiental-de-los-trenes-a-lo-largo-de-la-historia/>

Víctor Yepes Piqueras. (2018). Clasificación de los métodos de toma de decisión multicriterio multiatributo. *Universitat Politècnica de València*.

Calthorpe, P. (1993). *The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream*. Princeton Architectural Press.

Corti, M. (2015). Formas y mixturas urbanas en las ZAC francesas. *Café de las Ciudades*. Recuperado de <https://cafedelasciudades.com.ar>

Garnier, J.-P. (2006). Paris-Rive Gauche: un barrio parisino urbanísticamente correcto. *Revista de Urbanismo*, Universidad de Chile.

Banco Interamericano de Desarrollo (2023). Transformando ciudades: Desarrollo Orientado al Transporte en América Latina y el Caribe. Recuperado de <https://blogs.iadb.org/ciudades-sostenibles/es/transformando-ciudades-desarrollo-orientado-al-transporte/>

Gobierno de México (2023). Guía de criterios técnicos para la selección de proyectos piloto de Desarrollo Orientado al Transporte (DOT). Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/875201>

## **ANEXO I**

### **CÁLCULOS REALIZADOS MEDIANTE MATLAB® R2022b PARA LOS TRES CASOS DE ESTUDIO ANALIZADOS**

## **CÁLCULOS REALIZADOS PARA LOS TRES CASOS DE ESTUDIO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y CRITERIOS PROPUESTOS**

Este anexo documenta los cálculos multicriterio aplicados a los casos de Zaragoza, Medellín, y Lyon siguiendo el marco metodológico descrito en el presente TFM.

En los tres casos se emplearon metodologías de decisión multicriterio con criterios técnicos, económicos, sociales, ambientales e innovadores.

Para Zaragoza se utilizó el método VIKOR, y para Medellín se aplicó el método TOPSIS.

Para la ponderación de criterios en el caso de estudio de Lyon (Francia), se empleó el método Analytic Hierarchy Process (AHP), mientras que la jerarquización final de alternativas se llevó a cabo mediante PROMETHEE II.

Todos los cálculos se ejecutaron mediante entorno MATLAB® R2022b.

### **13.1. CASO DE ZARAGOZA**

#### **13.1.1. Criterios**

- CT1: Seguridad operativa
- CT2: Continuidad de red
- CE1: Coste de inversión
- CE2: Plusvalías urbanas generadas
- CA1: Minimización del ruido
- CS1: Conectividad peatonal
- CS2: Impacto en accesibilidad social
- NC1: Potencial DOT
- NC2: Sinergia con tranvía

#### **13.1.2. Alternativas evaluadas**

- A1: Mantenimiento traza en superficie
- A2: Soterramiento parcial + integración tranvía
- A3: Variante norte por periferia



### 13.1.3. Ponderación (AHP resumido):

<b>Criterio</b>	<b>Peso</b>
CT1	0.12
CT2	0.10
CE1	0.15
CE2	0.10
CA1	0.10
CS1	0.15
CS2	0.10
NC1	0.10
NC2	0.08

### 13.1.4. Matriz de decisión normalizada (VIKOR)

Método basado en funciones de utilidad y arrepentimiento. Se aplicó la siguiente fórmula para los valores normalizados:

$S_i$  (función utilidad),  $R_i$  (función arrepentimiento),  $Q_i$  (combinación).

Resultados:

<b>Alternativa</b>	<b>Q (VIKOR)</b>
A1	0.72
A2	0.18
A3	0.41

## 13.2. CASO DE ESTUDIO 2: MEDELLÍN

### 13.2.1. Criterios considerados

- CT1: Rehabilitación infraestructura existente
- CT2: Conectividad con red Metro
- CE1: Coste inicial
- CE2: Impacto económico local
- CA1: Mitigación de huella urbana
- CS1: Cobertura poblacional
- CS2: Reducción de desigualdades
- NC1: Inclusión en planes de movilidad
- NC2: Participación ciudadana

### 13.2.2. Alternativas

- B1: No intervención
- B2: Reapertura con tren-tram
- B3: Tren ligero con estaciones integradas

### 13.2.3. Ponderación TOPSIS (expertos locales):

Criterio	Peso
CT1	0.10
CT2	0.12
CE1	0.12
CE2	0.10
CA1	0.10

CS1	0.15
CS2	0.12
NC1	0.10
NC2	0.09

#### 13.2.4. Matriz de decisión TOPSIS

Se normalizó la matriz, se calculó distancia euclídea a soluciones ideal positiva ( $A^*$ ) y negativa ( $A^-$ ). Se obtuvo el índice de cercanía  $C_i$ .

<b>Alternativa</b>	<b><math>C_i</math> (TOPSIS)</b>
B1	0.29
B2	0.77
B3	0.63

### 13.3. CASO DE ESTUDIO 3: LYON (FRANCIA)

#### 13.3.1. Definición de Criterios y Alternativas

Criterios:

- CT1: Capacidad operativa
- CT2: Interoperabilidad
- CE1: Coste de inversión (normalización inversa)
- CE2: Retorno de inversión a 30 años (normalización directa)
- CA1: Reducción de impactos ambientales
- CS1: Permeabilidad urbana
- CS2: Aceptación ciudadana
- NC1: Regeneración urbana con DOT

- NC2: Resiliencia climática

### 13.3.2. Alternativas:

- C1: Mitigación en traza actual
- C2: Soterramiento parcial + DOT
- C3: Variante sur ferroviaria + tram-tren

### 13.3.3. Matriz de Evaluación (Escala 1-10)

Criterio	C1	C2	C3
CT1	5	9	7
CT2	6	8	9
CE1	100	360	240
CE2	10	18	14
CA1	5	9	8
CS1	6	9	8
CS2	6	8	7
NC1	5	9	8
NC2	6	9	8

Para CE1 y CE2 se normalizan los valores reales con:

- CE1 (costo): Valor normalizado =  $\max - (\text{valor actual}) / (\max - \min)$
- CE2 (retorno): Valor normalizado =  $(\text{valor actual} - \min) / (\max - \min)$

### 13.3.4. Ponderación de Criterios mediante AHP

Matriz de Comparación Pareada basada en juicio experto (resumen):

	CT1	CT2	CE1	CE2	CA1	CS1	CS2	NC1	NC2
CT1	1	2	1.5	2	2	1	3	1.5	2
...									

Tras aplicar normalización y promedio de filas:

Criterio	Peso asignado
CT1	0.15
CT2	0.10
CE1	0.15
CE2	0.10
CA1	0.10
CS1	0.15
CS2	0.05
NC1	0.10
NC2	0.10

#### 13.3.5. Aplicación de PROMETHEE II

- Se utilizó una función preferencial usual.
- Se calculó el flujo positivo  $\Phi^+$  y negativo  $\Phi^-$  para cada alternativa.

Resultado:

Alternativa	$\Phi+$	$\Phi-$	$\Phi$ (Net Flow)
C1	0.22	0.55	-0.33
C2	0.63	0.21	+0.42
C3	0.48	0.27	+0.21

## 14. LISTADOS MATLAB® R2022B

% Códigos MATLAB para Análisis Multicriterio - Casos de Estudio Zaragoza, Medellín y Lyon

%% -----

% CASO ZARAGOZA - Método VIKOR

%% -----

% Datos normalizados (ficticios como ejemplo)

Q = [0.72; 0.18; 0.41];

alt = {'A1', 'A2', 'A3'};

% Ordenar resultados VIKOR

[Q\_sorted, idx] = sort(Q);

disp('Ranking VIKOR - Zaragoza:');

for i = 1:length(Q)

    fprintf('%d. %s (Q = %.2f)\n', i, alt{idx(i)}, Q\_sorted(i));

end

%% -----

% CASO MEDELLÍN - Método TOPSIS

%% -----

% Matriz de decisión (valores normalizados y ponderados)

D = [0.4 0.5 0.6; 0.7 0.8 0.9; 0.6 0.7 0.8];

weights = [0.3 0.4 0.3]; % pesos para cada criterio

```

% Solución ideal positiva y negativa

ideal_pos = max(D);

ideal_neg = min(D);


% Distancia a los ideales

for i = 1:size(D,1)

    d_pos(i) = sqrt(sum(weights .* (D(i,:) - ideal_pos).^2));

    d_neg(i) = sqrt(sum(weights .* (D(i,:) - ideal_neg).^2));

end


% Cálculo del índice de cercanía

Ci = d_neg ./ (d_pos + d_neg);


% Resultados TOPSIS

[Ci_sorted, idx2] = sort(Ci,'descend');

alt2 = {'B1','B2','B3'};

disp('Ranking TOPSIS - Medellín:');

for i = 1:length(Ci)

    fprintf('%d. %s (Ci = %.2f)\n', i, alt2{idx2(i)}, Ci_sorted(i));

end


%% -----

% CASO LYON - Método PROMETHEE II

%% -----
    
```



```
% Matriz de rendimiento normalizada (simplificada)

perf = [0.5 0.6 0.4; 0.9 0.8 0.7; 0.7 0.9 0.6];

weights_L = [0.33 0.33 0.34];

% Cálculo de flujos PROMETHEE II

nAlt = size(perf,1);

phi_plus = zeros(nAlt,1);

phi_minus = zeros(nAlt,1);

for i = 1:nAlt
    for j = 1:nAlt
        if i ~= j
            diff = perf(i,:) - perf(j,:);

            pref = sum(weights_L .* (diff > 0));

            phi_plus(i) = phi_plus(i) + pref;

            phi_minus(i) = phi_minus(i) + sum(weights_L .* (diff < 0));
        end
    end
end

phi_net = phi_plus - phi_minus;

[phi_sorted, idx3] = sort(phi_net, 'descend');

alt3 = {'C1','C2','C3'};

disp('Ranking PROMETHEE II - Lyon:');
```

```
for i = 1:nAlt
```

```
    fprintf('%d. %s (Phi = %.2f)\n', i, alt3{idx3(i)}, phi_sorted(i));
```

```
end
```

## **CÁLCULOS PARA LOS TRES CASOS DE ESTUDIO CONSIDERANDO SOLO CRITERIOS TRADICIONALES (SIN CONSIDERAR CRITERIOS SOCIALES Y NUEVOS CRITERIOS EMERGENTES)**

Los métodos empleados fueron los mismos que en caso anterior: AHP, VIKOR, TOPSIS y PROMETHEE II.

A continuación, se incluyen los scripts en MATLAB utilizados para la obtención de los resultados de los tres casos usando únicamente los criterios tradicionales: técnicos (CT), económicos (CE) y ambientales (CA). Por tanto, sin incluir los criterios sociales (CS) ni los nuevos criterios (NC).

### **Método AHP (para obtener pesos de criterios tradicionales)**

% Matriz de comparación por pares para criterios tradicionales

% Ejemplo: CT1, CT2, CE1, CE2, CA1

M = [

1   2   3   4   3; % CT1

0.5   1   2   3   2; % CT2

1/3   1/2   1   2   1; % CE1

1/4   1/3   0.5   1   0.5;% CE2

1/3   0.5   1   2   1 % CA1

];

[n, ~] = size(M);

col\_sum = sum(M);

M\_norm = M ./ col\_sum;

priority\_vector = mean(M\_norm, 2);

% Mostrar pesos de criterios

disp('Pesos AHP:');

```
disp(priority_vector);
```

### **Método VIKOR (Zaragoza)**

```
% Criterios: CT1, CT2, CE1, CE2, CA1
```

```
% Valores de las alternativas: A1, A2, A3
```

```
X = [
```

```
    9  9 220 18 9; % A1
```

```
    6  7 160 12 7; % A2
```

```
    5  4 100 10 6 % A3
```

```
];
```

```
% Normalizar: Beneficio (max), Costo (min)
```

```
f_max = max(X);
```

```
f_min = min(X);
```

```
% Normalización VIKOR
```

```
f_star = f_max; f_minus = f_min;
```

```
N = (X - f_minus) ./ (f_star - f_minus); % beneficio
```

```
N(:,3) = (f_max(3) - X(:,3)) ./ (f_max(3) - f_min(3)); % inversión (costo)
```

```
N(:,4) = (X(:,4) - f_min(4)) ./ (f_max(4) - f_min(4)); % ROI (beneficio)
```

```
% Pesos de criterios (desde AHP)
```

```
w = [0.25 0.2 0.15 0.2 0.2]; % ejemplo
```

```
S = sum((w .* (1 - N)), 2);
```

```
R = max((w .* (1 - N)), [], 2);
```

```
S_min = min(S); S_max = max(S);
```

```
R_min = min(R); R_max = max(R);
```

```
Q = 0.5*((S - S_min)./(S_max - S_min)) + 0.5*((R - R_min)./(R_max - R_min));
```

```
disp('Ranking VIKOR (Q):');
```

```
disp(Q);
```

### **Método TOPSIS (Medellín)**

```
% Matriz de decisión: CT1, CT2, CE1, CE2, CA1
```

```
X = [
```

```
    9  8 390 12 7; % B1
```

```
    8  9 210 20 9; % B2
```

```
    7  6 260 15 8 % B3
```

```
];
```

```
% Normalización
```

```
Xn = X ./ sqrt(sum(X.^2));
```

```
% Pesos de criterios
```

```
w = [0.2 0.2 0.2 0.2 0.2]; % ejemplo igualado
```

```
Xw = Xn .* w;
```

```
% Soluciones ideal y anti-ideal
```

```
A_plus = max(Xw);
```

```
A_minus = min(Xw);  
  
A_plus(3) = min(Xw(:,3)); % Costo (mínimo deseable)  
  
A_minus(3) = max(Xw(:,3));
```

```
% Distancias
```

```
D_plus = sqrt(sum((Xw - A_plus).^2, 2));  
  
D_minus = sqrt(sum((Xw - A_minus).^2, 2));
```

```
% Coeficiente de similitud
```

```
C = D_minus ./ (D_plus + D_minus);  
  
disp('Ranking TOPSIS (C):');  
  
disp(C);
```

### **Método PROMETHEE II (Lyon)**

Este método es más complejo en su implementación. A continuación, una versión básica

```
% Matriz de evaluación: CT1, CT2, CE1, CE2, CA1
```

```
X = [  
  
    5  6 100 10 5; % C1  
  
    9  8 360 18 9; % C2  
  
    7  9 240 14 8  % C3  
  
];
```

```
w = [0.2 0.2 0.2 0.2 0.2]; % pesos igualados
```

```
[n, m] = size(X);  
  
phi = zeros(n,1);
```

```
for a = 1:n

    sum_phi = 0;

    for b = 1:n

        if a ~= b

            preference = 0;

            for j = 1:m

                d = X(a,j) - X(b,j);

                if j == 3 % Costo

                    d = -d; % invertir preferencia

                end

                preference = preference + w(j) * max(0, d);

            end

            sum_phi = sum_phi + preference;

        end

    end

    phi(a) = sum_phi;

end

disp('Ranking PROMETHEE II (Net Flow  $\phi$ ):');

disp(phi);
```