



TRABAJO FIN DE GRADO (Ingeniería Civil)

**“Viabilidad Integral de las Rutas de Transporte
Urbano en Zaragoza”**

Alumno: José María MORENO LOSCERTALES

Tutor: Tomás RUIZ SÁNCHEZ

Curso 2017-2018 (septiembre, 2018)

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



Viabilidad Integral de las Rutas de Transporte Urbano en Zaragoza

José María MORENO LOSCERTALES
Universidad Politécnica de Valencia

RESUMEN:

Desde comienzos del siglo XXI se está prestando una atención especial a la incorporación en los procesos decisionales de los aspectos intangibles, subjetivos y emocionales asociados al elemento fundamental de la Sociedad del Conocimiento, el factor humano. En este contexto, conforme a la visión integral que se está siguiendo en el ámbito de la ingeniería civil, el presente Trabajo Fin de Grado pretende incorporar estos aspectos intangibles y subjetivos, asociados fundamentalmente a los aspectos sociales y ambientales, junto a los tangibles, objetivos y racionales (económicos y tecnológicos) asociados al método científico tradicional, en el diseño de rutas de transporte público urbanas. Para ello, se va a seguir una metodología multicriterio que, basada en el Proceso Analítico Jerárquico, permita: (i) evaluar la viabilidad integral de las rutas actualmente existentes en la ciudad de referencia, Zaragoza en este caso; (ii) identificar las rutas menos eficaces y (iii) seleccionar entre las potenciales mejoras aquella que contemplando simultáneamente criterios tecnológicos, económicos, sociales y ambientales sea mejor.

Palabras clave: Transporte, Diseño Rutas Urbanas, Viabilidad Integral, Decisión Multicriterio, Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

Integral Viability of Urban Transport Routes in Zaragoza

ABSTRACT:

Since the beginning of the 21st century special attention has been paid to the incorporation into the decisional processes of the intangible, subjective and emotional aspects associated with the fundamental element of the Knowledge Society, the human factor. In this context, in accordance with the comprehensive vision that is being followed in the field of civil engineering, the present Final Degree Project aims to incorporate these intangible and subjective aspects, mainly associated with social and environmental aspects, together with tangible, objective and rational (economic and technological) associated with the traditional scientific method, in the design of urban public transport routes. For this purpose, a multicriteria methodology will be followed that, based on the Hierarchical Analytical Process, allows: (i) to evaluate the integral viability of the routes currently existing in the reference city, Zaragoza in this case; (ii) identify the least effective routes and (iii) select among the potential improvements that which contemplates simultaneously technological, economic, social and environmental criteria is better.

Keywords: Transportation, Urban Routes Design, Integral Viability, Multicriteria Decision Making, Analytic Hierarchy Process (AHP).

Viabilitat Integral de les Rutes de Transport Urbà a Zaragoza

RESUM:

Des de començaments del segle XXI s'està prestant una atenció especial a la incorporació en els processos de decisió dels aspectes intangibles, subjectius i emocionals associats a l'element fonamental de la Societat del Coneixement, el factor humà. En aquest context, d'acord amb la visió integral que s'està seguint en l'àmbit de l'enginyeria civil, el present Treball Fi de Grau pretén incorporar aquests aspectes intangibles i subjectius, associats fonamentalment als aspectes socials i ambientals, al costat dels tangibles, objectius i racionals (econòmics i tecnològics) associats al mètode científic tradicional, en el disseny de rutes de transport públic urbanes. Per a això, se seguirà una metodologia multicriteri que, basada en el Procés Analític Jeràrquic, permeti: (i) avaluar la viabilitat integral de les rutes actualment existents a la ciutat de referència, Zaragoza en aquest cas; (ii) identificar les rutes menys eficaços i (iii) seleccionar entre les potencials millores aquella que contemplant simultàniament criteris tecnològics, econòmics, socials i ambientals sigui millor.

Paraules clau: Transport, Disseny Rutes Urbanes, Viabilitat Integral, Decisió Multicriteri, Procés Analític Jeràrquic (AHP).

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	2
2.1 Transporte Urbano. Diseño de Rutas	2
2.2 Sociedad del Conocimiento	3
2.3 Decisión Multicriterio. El Proceso Analítico Jerárquico (AHP)	6
3. TRABAJOS PREVIOS	8
4. VIABILIDAD INTEGRAL DE LAS RUTAS DE TRANSPORTE URBANO.....	11
4.1 Viabilidad Integral.....	11
4.2 Identificación de las rutas menos eficaces.....	15
4.3 Selección de las nuevas rutas	15
5. CASO PRÁCTICO	16
5.1 Planteamiento.....	16
5.2 Resolución	16
5.3 Análisis de los resultados.....	19
5.4 Selección multicriterio de la opción de mejora para la peor línea.....	21
6. CONCLUSIONES Y FUTURAS EXTENSIONES.....	22
REFERENCIAS	24
ANEJOS	
Anejo 1: Líneas de autobuses.....	27
Anejo 2: Matrices de comparaciones pareadas.....	28
Anejo 3: Juicios para los tres actores	29
Anejo 4: Prioridades locales y globales.....	30
Anejo 5: Priorización opciones de mejora	31
Anejo 6: Primera iteración de la simulación.....	32
Anejo 7: Trayectos de las líneas.....	33
Anejo 7: Evaluación Gases Efecto Invernadero.....	44

1. INTRODUCCIÓN

Conforme a la normativa vigente que regula los estudios universitarios (RD 1393/2007), este documento pretende dar respuesta al requisito final exigido para alcanzar el Grado en Ingeniería Civil por la Universidad Politécnica de Valencia: la elaboración de un Trabajo Fin de Grado (TFG).

El trabajo *“Viabilidad Integral de las Rutas de Transporte Urbano en Zaragoza: Incorporación de aspectos intangible en el diseño de rutas urbanas”* aborda un tema de notable actualidad e interés en el ámbito de la Ingeniería Civil, como reflejan los numerosos trabajos (véanse como ejemplo, Sierra y otros, 2018a,b; Navarro y otros, 2018, y sus referencias) que han aparecido recientemente en la literatura científica sobre los tópicos considerados en el mismo, esto es, sobre la incorporación mediante técnicas multicriterio de aspectos tangibles e intangibles en los modelos formales; en este caso en los utilizados en el diseño de rutas urbanas.

Siguiendo la orientación profesional exigida a estos TFG, cuyo objetivo es poner de manifiesto conocimientos, habilidades y competencias adquiridas por el estudiante a lo largo de sus estudios y, expresamente, las competencias asociadas a la materia TFG como se indica en la memoria de verificación, el documento incorpora competencias y habilidades de numerosas de las materias impartidas por el Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes. Entre estas competencias se encuentra: realizar de estudios de planificación territorial y de los aspectos medioambientales relacionados con las infraestructuras, en su ámbito; construir y mantener vías de comunicación; aprender de manera autónoma nuevos conocimientos y técnicas adecuados para la Ingeniería Civil; y analizar críticamente los procesos propios de la Ingeniería Civil.

No obstante, el enfoque integral dado al estudio de la viabilidad de las rutas, en el que se incorporan aspectos sociales y ambientales (en gran parte intangibles) junto a los económicos y tecnológicos (tradicionalmente tangibles), o lo que es lo mismo, la utilización de técnicas multicriterio para una resolución más realista y efectiva del problema se está llevando a cabo en todos los ámbitos de la ciencia por su carácter transversal y su adecuación a los nuevos tiempos (Sociedad del Conocimiento).

En el caso concreto de la materia Transporte y Territorio (12828), cabe destacar que los contenidos incluidos en este TFC corresponden a las Unidades Didácticas 5 (El sistema de conexión. Oferta de Transporte) y 6 (La identificación de aspectos territoriales característicos. Síntesis y evaluación) de la misma. El último de los epígrafes del curso (UD 6.3) corresponde a Evaluación Multicriterio (http://www.upv.es/titulaciones/GIC/menu_1013743c.html).

El objetivo principal del trabajo es el estudio de la viabilidad integral de las diferentes rutas de transporte urbano (autobuses) en Zaragoza, con la intención de identificar las peores e intentar su mejora mediante el rediseño de las mismas. Para la consideración conjunta de los aspectos tecnológicos, económicos, sociales, y ambientales (TESA) se ha utilizado una de las técnicas multicriterio más extendidas y de mayor facilidad de uso por disponer de software apropiado: el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) (Saaty, 1980).

El modelo jerárquico utilizado para el análisis incluye cuatro niveles (misión, criterios, atributos y alternativas). En total 4 criterios, 12 atributos y 34 alternativas. Para la evaluación de las alternativas, debido a su elevado número, se ha recurrido a la utilización de medidas absolutas. Este es el procedimiento sugerido en la literatura de AHP cuando se analiza un número de alternativas superior al número mágico de Miller (7 ± 2).

Así mismo se ha estudiado la estabilidad de la ordenación resultante mediante la relajación de la hipótesis de certidumbre en los juicios. Utilizando los umbrales establecidos por los expertos se han identificado las peores líneas de autobús y, a título de ejemplo, se han planteado diferentes vías de mejora de la peor de las rutas y se ha seleccionado la mejor opción de mejora conforme a los cuatro criterios considerados.

En cuanto al dominio de aplicación del trabajo (transporte urbano en Zaragoza), mencionar que Zaragoza es la ciudad en la que vivo habitualmente y en la que, por cuestiones personales, he residido los dos últimos años de la carrera, por lo que me ha resultado más fácil poder acceder a la información utilizada en el estudio y a los expertos que han colaborado en la realización del trabajo de campo.

El resto del documento ha quedado estructurado como sigue. La Sección 2 recoge los antecedentes necesarios para seguir los posteriores desarrollos. La Sección 3 revisa diferentes trabajos previos en este campo con la intención de identificar los atributos más relevantes. La Sección 4 presenta el modelo jerárquico propuesto para el estudio de viabilidad integral. La Sección 5 incluye el Caso de Estudio considerado y, finalmente, la Sección 6 resalta las conclusiones más destacadas del trabajo, sus limitaciones, y posibles futuras extensiones del mismo.

2. ANTECEDENTES

2.1 Transporte Urbano. Diseño de Rutas

El transporte público o transporte en común (https://es.wikipedia.org/wiki/Transporte_p%C3%BAblico) es el término aplicado al transporte colectivo de pasajeros. A diferencia del transporte privado, los viajeros de transporte público tienen que adaptarse a los horarios y a las rutas que ofrezca el operador y dependen en mayor o menor medida de la intervención regulatoria del Gobierno. Usualmente los viajeros comparten el medio de transporte, y las distintas unidades están disponibles para el público en general. Incluye diversos medios como autobuses, taxis, trolebuses, tranvías, trenes, ferrocarriles suburbanos, y ferris. En el transporte interregional también coexiste el transporte aéreo y el tren de alta velocidad..

En cuanto al transporte público urbano (autobuses y taxis), éste puede ser proporcionado por una o varias empresas privadas o por consorcios de transporte público. Los servicios se mantienen mediante cobro directo a los pasajeros. Normalmente son servicios regulados y subvencionados por autoridades locales o nacionales. Por razones históricas y económicas, existen diferencias entre el transporte público de unos países y otros. Mientras que las ciudades de zonas como Europa tienen numerosos y frecuentes servicios que sirven a ciudades antiguas y densas, otras zonas como América tienen redes de transporte mucho menos complejas (https://es.wikipedia.org/wiki/Transporte_p%C3%BAblico).

El transporte público urbano permite el desplazamiento de personas de un punto a otro en el área de una ciudad y es, por tanto, parte esencial de las ciudades. Disminuye la *contaminación*, ya que se usan menos automóviles para el transporte de personas, además de *permitir el desplazamiento* de personas que, no tienen auto y necesitan recorrer largas distancias. Tampoco debemos olvidar que hay personas que, teniendo auto, a veces no lo usan por los atascos o las dificultades de estacionar y prefieren (al menos en algunas ocasiones) el transporte público, que es visto como una externalidad positiva y por lo tanto podría ser subsidiado su uso con fondos públicos por disminuir la *congestión de tráfico* y la *contaminación*, esto es, menor cantidad de contaminantes por pasajero transportado (https://es.wikipedia.org/wiki/Transporte_p%C3%BAblico).

Respecto al elemento fundamental del transporte público urbano, el autobús, resaltar que estos vehículos son prácticos y eficientes en rutas de corta y media distancia, siendo frecuentemente el medio de transporte más usado a nivel de transportes públicos, por constituir una opción económica. A la hora de diseñar las rutas, las compañías de transporte buscan establecer una ruta basada en un cambio de pasajeros en el área a ser tomada. Una vez establecida la ruta, se construyen las paradas de autobuses a lo largo de esa ruta.

Sin embargo, dada su baja capacidad de pasajeros, no son eficientes en rutas de mayor uso. Así mismo, los autobuses, en rutas altamente utilizadas, producen mucha *contaminación*, debido al mayor número de autobuses que son necesarios para el transporte eficaz de pasajeros en esa ruta. En este caso, es mejor el metro, aunque esta alternativa sobrepasa el objeto de este trabajo.

Las características que determinan los sistemas de transporte público son: (i) la *oferta* fijada por los vehículos, los conductores, los servicios y las infraestructuras del transporte y (ii) la *demand*a proporcionada por los clientes (pasajeros). En muchos sistemas de transporte privado, la persona en un vehículo son parte de la demanda y las vías son la oferta.

El transporte público de pasajeros se evalúa de distinto modo por parte de los usuarios, los empresarios o trabajadores; el recorrido de una línea de transporte de cargas puede ser indiferente para los habitantes de las ciudades que están en el inicio y el final del viaje y clave para los habitantes de zonas rurales o pequeñas localidades que se ven afectados por su paso. Esto quiere decir que la comprensión del tránsito será más rica y pertinente cuando apele a una variedad de perspectivas (https://es.wikipedia.org/wiki/Transporte_p%C3%BAblico).

2.2 Sociedad del Conocimiento

El desarrollo que desde los años 70 del siglo XX está teniendo la Tecnología de la Información y de las Comunicaciones (TIC), y la relevancia cada vez más grande dada al factor humano (consideración de lo subjetivo, intangible y emocional), han provocado el tránsito de la denominada como Sociedad de la Información a la conocida como Sociedad del Conocimiento.

La Sociedad del Conocimiento (SdC) es un espacio para el talento, la imaginación y la creatividad del ser humano (Moreno-Jiménez, 2004, 2006). Sus tres características más destacadas son (Moreno-Jiménez, 2003, 2016; Aguarón y otros, 2012):

(i) la *interacción*, incluyendo tanto la interconexión entre los actores como la interdependencia entre los factores.

(ii) la *colaboración* como elemento distinto de esta sociedad en red orientada a la creación conjunta de una sociedad mejor.

(iii) la importancia del *factor humano* y, con ello, la incorporación en los procesos decisionales de lo intangible, subjetivo y emocional asociado a los individuos, junto a lo tangible, objetivo y racional asociado al método científico tradicional.

La SdC busca construir, conjuntamente entre todos los actores relevantes, una sociedad mejor, esto es, más cohesionada, tolerante, justa, igualitaria, solidaria..., en un mundo de creciente complejidad. Para ello, se dedica a formar a los individuos (aprendizaje, inteligencia, habilidades sociales...) y a fomentar la relación con los otros (comunicación, colaboración, convivencia...) para mejorar la sociedad (calidad de vida y cohesión) y construir conjuntamente el futuro (evolución) en un mundo de creciente complejidad (Moreno-Jiménez, 2003).

Como corresponde a organizaciones cognitivas y auto-reguladas, como son los sistemas sociales, todo ello se debe realizar (Moreno-Jiménez, 2016) de una manera coordinada y sistemática, que permita aprovechar el potencial que ofrecen las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones (TIC) en los tres ámbitos de actuación en los sistemas: operativo, táctico y estratégico. En esta nueva sociedad la *tecnología* no se entiende como un mecanismo o artefacto. Son sistemas socio-técnicos que implican nuevas formas de organización social. La comunicación no se refiere, como ocurría en la Sociedad de la Información, a la mera transmisión de la información (entendida como el conjunto de datos –hechos, imágenes, sonidos...- con una finalidad o misión), sino a la transmisión del conocimiento, entendido éste como la interpretación de la información en un contexto concreto. Toda interpretación es subjetiva y depende del marco en el que se insertan las interrelaciones entre los actores (Moreno-Jiménez, 2003).

La *comunicación* se entiende como una coordinación de comportamientos entre organismos vivos a través de acoplamiento estructural mutuo (Moreno-Jiménez, 2006). Esta manera de entender la comunicación facilita la creación de una inteligencia colectiva o, si se prefiere, la creación de una sabiduría social que debe ser aprovechada por los diferentes sistemas (públicos y privados) para su mejora continuada (Moreno-Jiménez, 2016).

En el contexto de la SdC hay una serie de términos que, en muchas ocasiones, suelen utilizarse indistintamente y que convendría precisar su significado para llegar a entender cuál ha sido la evolución seguida por los sistemas informáticos de ayuda a la decisión (Moreno-Jiménez, 2016). Estos términos son los de *dato*, *información* y *conocimiento*.

Los *Datos* son hechos, imágenes o sonidos, en general observaciones de fenómenos que vienen representadas mediante números, símbolos, ficheros gráficos, ficheros de audio, soporte de olores o de sabores, ... no estructurados, que vienen dados en bruto y sin dirigir, esto es, sin orientación a una aplicación o tarea particular. Los datos no están contextualizados y una vez registrados son fáciles de almacenar y transmitir. Por ejemplo, la cifra 13 es un dato.

La *Información* son los datos dotados de una estructura y un contenido que los hace apropiados a una tarea específica (finalidad). Esa orientación, dada por su estructura o forma, suele alcanzarse mediante alguna organización o semántica, quizá la utilización de unidades. Son los datos a los que se les ha dotado de relevancia y significado para algún propósito. La información se transmite de un emisor a un receptor, pudiendo modificar la conducta y el comportamiento de éste. Los datos se transforman en información cuando se les agrega algún significado contextual de carácter objetivo. Por ejemplo, 13°C es una información sobre temperatura medida en grados centígrados.

El *Conocimiento* son las creencias, ideas, reglas y procedimientos generalmente ciertas en un dominio particular. En este sentido generalista, suele entenderse como creencias verdaderamente justificadas que un individuo tiene y sostiene acerca de las relaciones causa-efecto entre fenómenos y variables. En un sentido más personalista, el conocimiento suele entenderse como la interpretación de la información en un dominio específico. Como toda interpretación, refleja una contextualización subjetiva basada en la experiencia, valores y creencias del individuo. El valor agregado (interpretación, reflexión, perspicacia, síntesis, emoción, valores etc.) por las personas a la información es lo que da lugar al conocimiento. Estas recomendaciones o instrucciones, orientadas al uso de la información, guían las actuaciones y decisiones. El conocimiento va unido a la acción. Por ejemplo, 13°C, representan una temperatura desastrosa para la temporada turística de las Islas Canarias en el mes de septiembre (Moreno-Jiménez y Mata, 1993).

Por último, hay otro término relacionado con los anteriores que es el de *Aprendizaje*. Es la capacidad de cambio sostenido en el estado de conocimiento de un individuo, grupo u organización. El cambio se refiere tanto a las cualidades del conocimiento que se posee (saber) como al grado de maestría con el que se sabe (saber hacer) y se puede actuar con lo que se sabe (querer).

El aprendizaje es más que el proceso mediante el cual se adquiere el conocimiento, esto es, los flujos que llevan a un cambio de los stocks o inventarios de saberes, valores y creencias. El aprendizaje engloba los componentes cognitivos y de comportamiento vinculados al conocimiento. Refleja la transformación tanto del modo de pensar (aspectos cognitivos) como del modo de hacer (aspectos comportamentales o conductistas), y cuyo resultado es la aparición de un conocimiento nuevo o mejorado (Moreno-Jiménez, 2016).

El tránsito del dato al conocimiento ha venido reflejado en la evolución de los *sistemas informáticos de ayuda a la decisión* (Moreno-Jiménez, 1993). De los iniciales Gestores de Bases de Datos o Procesamiento de Datos, aparecidos en los 60 del siglo XX, se pasó a los Sistemas para la Gestión de la Información (MIS) de los 70 y, de éstos mediante la incorporación de la componente decisional, a los *Sistemas Soporte de Decisión* (DSS) de los 80. Desde entonces, la evolución de las herramientas informáticas ha intentado incorporar el conocimiento de los actores relevantes. Inicialmente era solo el conocimiento de los expertos en un dominio particular (sistemas expertos) y, finalmente, el de todos los actores (sistemas inteligentes).

2.3 Decisión Multicriterio. El Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Los *cambios filosóficos* consistente en el tránsito del *reduccionismo mecanicista*, esto es, de separar el todo en partes más pequeñas y suponer que la resolución del problema global era la suma de la resolución de las partes, al *holismo evolucionista* en el que se entiende que el todo es mucho más que la suma de las partes que la componen por las sinergias ocasionadas entre ellas; los *cambios metodológicos* en los que se ha pasado de la *búsqueda de una verdad* objetiva, universal y única (inexistente a todas luces) a la *búsqueda de un conocimiento*, entendido su sentido personalista como la interpretación subjetiva de la información en un dominio específico y; los *cambios tecnológicos* relativos al tránsito de la *transmisión* uni y bidireccional de la *información* a la *gestión en red del conocimiento*, que han tenido lugar en el contexto de la SdC, han llevado al desarrollo de nuevas herramientas decisionales más abiertas, flexibles y realistas que las empleadas en la toma de decisiones tradicional (Moreno-Jiménez, 2003, 2006, 2016).

El uso de estas herramientas en la toma de decisiones multicriterio ha permitido que los modelos formales (Moreno-Jiménez y otros, 1999; Moreno-Jiménez, 2016) puedan capturar: (i) la interdependencia entre los factores y la interrelación entre los actores implicados en la resolución del problema, así como las sinergias derivadas de la visión holística de la realidad; (ii) la integración de lo tangible y lo intangible y (iii) el potencial de las TIC a la hora de analizar grandes bases de datos y de conectar a las personas (redes sociales).

En lo que sigue (Moreno-Jiménez, 2002), se entiende por *Decisión Multicriterio* el conjunto de aproximaciones, modelos, métodos y técnicas seguidos en la resolución de problemas complejos caracterizados por la existencia de múltiples escenarios, actores y criterios, tanto tangibles como intangibles, con la intención de: (i) dotar de *rigor científico* el proceso de resolución, esto es, además del rigor de la ciencia clásica se pretende dar un tratamiento objetivo a lo subjetivo para poder integrar razón y emoción; (ii) ayudar al decisor a *seleccionar* las mejores y más realistas soluciones, esto es, las soluciones que simultáneamente sean eficientes (hacer correctamente las cosas), eficaces (alcanzar las metas) y efectivas (hacer lo correcto para resolver el problema); y (iii) a formar continuamente (incrementar el valor añadido de conocimiento) a los actores implicados en la resolución del problema en un aspecto esencial del ser humano: la toma (científica) de decisiones; para lograrlo, habrá que identificar y comunicar los argumentos que soportan las diferentes posiciones y decisiones.

Las técnicas de decisión multicriterio (TDMC) pueden clasificarse según numerosos criterios. Conforme al flujo de información existente entre decisor y analista, pueden ser: (1) técnicas sin información a priori sobre las preferencias del decisor, o técnicas generadoras; (2) técnicas con información a priori y (3) técnicas interactivas. Conforme al conjunto de alternativas, las TDMC pueden clasificarse como continuas (TDMCC), o técnicas/programación multiobjetivo, y discretas (TDMCD), o técnicas/programación multiatributo. En este contexto, AHP puede considerarse como una técnica multicriterio discreta con información a priori sobre las preferencias del decisor (juicios emitidos en las comparaciones pareadas), en las que las prioridades de las alternativas se obtienen mediante agregación jerárquica de los criterios/atributos considerados.

Una de las técnicas multicriterio que mejor responde a los nuevos tiempos y necesidades es el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), desarrollado por Thomas L. Saaty a mediados de los 70 (Saaty, 1980). AHP (Moreno-Jiménez y Vargas, 2018) ha resultado una de las aproximaciones científicas más utilizadas en la resolución de problemas complejos debido a: (1) su carácter intuitivo y realista en la resolución de problemas decisionales; (2) habilidad para integrar mediante jerarquías y redes lo pequeño con lo grande; (3) la capacidad para combinar lo racional y lo emocional; (4) la flexibilidad para considerar dependencias (uso del Proceso Analítico Sistemático o en Red - ANP); (5) la facilidad para incorporar en los modelos formales las diferentes visiones de la realidad mediante procedimientos determinísticos o estocásticos; (6) posibilidades que ofrece en la toma de decisiones en grupo y (7) su capacidad en los procesos de negociación y búsqueda de soluciones.

La metodología del Procesos Analítico Jerárquico (AHP) se basa en *cuatro axiomas* (Saaty, 1986): (i) Reciprocidad; (ii) Homogeneidad; (iii) Independencia *inner* y *outer*; y (iv) Expectativas, y consiste en *tres etapas* (Saaty, 1980; Moreno-Jiménez, 2002): (a) Modelización, (b) Valoración, y (c) Priorización y Síntesis.

- (a) La *modelización* del problema se lleva a cabo mediante la construcción de un modelo jerárquico con diferentes niveles en el que se recogen los aspectos relevantes del problema (escenarios, actores, criterios, alternativas). En el nivel superior se coloca la misión del problema. En los siguientes niveles se suelen colocan los criterios, subcriterios de primer nivel, de segundo... hasta los *atributos* (características de la realidad susceptibles de ser medidas para las alternativas), denominando así al último nivel de subcriterios del que se cuelgan las alternativas. La jerarquía debe ser completa, representativa, no redundante y minimal. Una extensión del modelo jerárquico consistente en la incorporación de dependencias (Saaty, 1996) es el Proceso Analítico en red (ANP).
- (b) La *valoración* del modelo consiste en la incorporación de las preferencias del decisor mediante las comparaciones pareadas de los elementos (hijos) que cuelgan de cada nodo de la jerarquía con respecto al nodo común del que cuelgan (padre). Cada juicio se centra en la comparación de dos elementos con respecto a una única característica. Los juicios o comparaciones pareadas reflejan la importancia relativa de una alternativa sobre otra respecto al criterio considerado y se recogen en las denominadas matrices recíprocas de comparaciones. Los juicios emitidos siguen la *escala fundamental* de Saaty (Saaty, 1980). Ésta es una escala absoluta (cociente de escalas de razón) de valores positivos $\{1/9, 1/7, \dots, 1/3, 1/1, 3/1, \dots, 7/1, 9/1\}$ donde: 1 = igual; 3 = ligero; 5 = fuerte; 7 = muy fuerte y 9 = extremo. Los valores intermedios $\{2, 4, 6, 8\}$ y sus recíprocos pueden utilizarse para precisar algo más las valoraciones. La certidumbre de la escala fundamental de Saaty ha sido relajada en posteriores trabajos para incorporar la incertidumbre mediante intervalos de juicio (Moreno-Jiménez y Vargas, 1993), distribuciones recíprocas (Escobar y Moreno-Jiménez, 2000) y números *fuzzy* (Van Laarhoven y Pedrycz, 1983).
- (c) La tercera etapa, *priorización* y *síntesis*, permite obtener las prioridades locales, globales y totales (Saaty, 1980). En general, se entiende por *prioridad* una unidad abstracta válida para cualquier escala en la que se integran las preferencias que el individuo tiene al comparar aspectos tangibles e intangibles, y que sirve para ordenar las alternativas y seleccionar la mejor o las mejores. Las *prioridades locales* (prioridades de los hijos respecto al padre) se obtienen, a partir de las matrices de comparaciones pareadas, mediante

cualquiera de los procedimientos de priorización existentes. El *Autovector Principal por la Derecha* (EGV) y la *Media Geométrica por Filas* (RGM) son los dos más empleados. Las *prioridades globales* (prioridades de los elementos de la jerarquía respecto a la misión) se obtienen mediante el *principio de composición jerárquica*. Las *prioridades totales*, o prioridades de las alternativas respecto a la misión, se obtienen mediante una agregación multiaditiva de las prioridades globales de las alternativas.

Una de las grandes ventajas del AHP es que permite relajar las hipótesis tan restrictivas que imponía el enfoque tradicional en decisión (escuela utilitarista), en concreto no exige la transitividad en las preferencias (Moreno-Jiménez y Vargas, 2018). Es conocido que el comportamiento humano no es siempre emocional. Fruto de los trabajos de los conductistas y psicólogos del conocimiento el pensamiento ha evolucionado intentando probar que la transitividad no es necesaria siempre para un decisor racional (Kahneman y Tversky, 1979; Tversky y Thaler, 1990). El Premio Nobel de Economía Richard Thaler (Thaler, 2017), de mostró que el humano está afectado por cuestiones emocionales e irracionales. Una teoría de la toma de decisiones debe permitir la intransitividad si esperamos capturar lo que Thaler denominó *predicabilidad irracional* (Moreno-Jiménez y Vargas, 2018).

Además, AHP permite evaluar la inconsistencia del decisor a la hora de introducir los juicios en las matrices recíprocas de comparaciones pareadas. Saaty definió la consistencia en AHP como la transitividad cardinal de los juicios incluidos en la matriz de comparaciones pareadas, esto es, se dice que la matriz recíproca de comparaciones pareadas $A_{n \times n} = (a_{ij})$ es consistente si $\forall i, j, k=1, \dots, n$ se cumple que $a_{ij} a_{jk} = a_{ik}$. Dos de los métodos más usados para evaluar la inconsistencia en AHP son la Razón de Consistencia de Saaty (Saaty, 1980) y el Índice de Consistencia Geométrico (GCI) (Aguarón y Moreno-Jiménez 2003), usados respectivamente con el EGVM y el RGM. Para el CR, Saaty (1994) sugirió un umbral de inconsistencia del 10% para $n > 4$, 8% para $n = 4$ y 5% para $n = 3$. Los umbrales para el GCI (Aguarón y Moreno-Jiménez, 2003) son: $GCI = 0,37$ para $n > 4$, $GCI = 0,35$ para $n = 4$ y $GCI = 0,32$ para $n = 3$.

3. ESTUDIOS PREVIOS

El problema de la evaluación de proyectos de transporte público guiado se ha abordado en la literatura utilizando diversas metodologías y considerando una amplia serie de atributos. Como paso previo a la hora de seleccionar los atributos relevantes en este TFG se efectuará una revisión de la bibliografía existente sobre el tema.

El estudio *TransPrice, Modal Integrated Urban Transport for Optimum Modal Split* (VV.AA., 1999) utiliza metodologías multicriterio para analizar una serie de medidas destinadas a mejorar la efectividad de los sistemas de transporte público en varios países. Para ello utiliza los siguientes criterios e indicadores:

- Indicadores económicos: costes y beneficios, tiempo total del viaje, seguridad.
- Rentabilidad financiera.
- Eficiencia energética: consumo de combustible.
- Impacto medioambiental: emisiones de gases contaminantes, ruido.
- Accesibilidad y uso del suelo: facilidad de acceso a lugares de trabajo, usos dados al suelo.
- Equidad y aceptabilidad.

Cascajo (2004) aborda el problema considerando que cualquier política de transportes, para ser eficaz, debe satisfacer los tres requisitos de la sostenibilidad: sostenibilidad económica, sostenibilidad medioambiental y sostenibilidad social. En su trabajo desarrolla una metodología de evaluación de proyectos de transporte público urbano que considere no sólo el criterio económico, sino también los efectos sociales y ambientales. Esta autora distingue entre atributos *cualitativos* (equidad social, regeneración urbana) y *cuantitativos* (reducción del tiempo de viaje, aumento de la eficiencia económica del operador, empleos generados por el proyecto, crecimiento económico regional, incremento en el uso del transporte público, disminución de la contaminación atmosférica, disminución del efecto invernadero, reducción del ruido, mejora de la seguridad vial).

Para obtener las ponderaciones de los criterios y atributos utiliza un cuestionario realizado a determinados agentes clave (Autoridades, Operadores de Transporte, Usuarios, Asociaciones de vecinos, Empresarios, etc...). Los agentes clave, o expertos, responden a una serie de cuestiones relativas a los atributos cualitativos en una escala de cuatro valores (mucho, bastante, poco, inapreciable) y las respuestas se convierten en un valor numérico. En cuanto a los pesos de los criterios, los expertos valoran la importancia de cada criterio en una escala de 1 a 10 y posteriormente se normalizan las puntuaciones medias de cada criterio.

Bouzada y otros (2008) analiza los resultados del *Programa Piloto de Medición de Consumos* realizado por el grupo ALSA, estableciendo los siguientes atributos como determinantes de la eficiencia de los consumos de energía y emisiones asociados al transporte por autobús: a) Consumo de combustible (características de rutas y trazados, factores climatológicos); b) Tecnología de motores y vehículos (chasis, carrocería); c) Mantenimiento de los vehículos.

Meixueiro y otros (2009) realizan una evaluación asignando directamente dos indicadores de rentabilidad (Valor Presente Neto y Tasa de Rentabilidad Inmediata) a los siguientes atributos:

- Costes: costes de inversión, costes por molestias durante la ejecución del proyecto o durante el mantenimiento de la vialidad, costes de operación, costes de mantenimiento, costes de reinversión
- Beneficios: el menor tiempo de traslado empleado por los pasajeros; la disminución de las emisiones contaminantes al medio ambiente, reducción de costes de operación y mantenimiento por utilizar tecnologías más eficientes y con capacidades mayores, beneficio por el menor tiempo de traslado, costos de operación y mantenimiento, que obtiene los vehículos que transitan por una vía que se descongestionó debido al proyecto, beneficio por liberación de recursos, valor de rescate (valor de mercado que tendrían los componentes del proyecto, al final del horizonte de evaluación).

El documento *Diagnóstico de la red actual de transporte urbano de Zaragoza y propuestas de mejora* (VV.AA 2011) analiza los aspectos más importantes que influyen en la calidad del servicio de autobuses urbanos de Zaragoza, obteniendo los siguientes: número de viajeros por línea anualmente, frecuencia del servicio, cantidad de horas que circulan durante el día los autobuses de las distintas líneas urbanas, viajeros por kilómetro de cada línea, viajeros que transporta un autobús de cada línea de promedio un día laborable, accesibilidad en transporte público a los principales centros generadores de movilidad de la ciudad de Zaragoza. Los autores determinan un ranking global en el que todos los atributos tienen el mismo peso.

Echeverri y otros (2012) se centran únicamente en el impacto ambiental de las rutas de transporte urbano, tomando el caso de la ciudad de Medellín. Utilizan la metodología AHP para la selección de las rutas a estudio, y a ellas les aplican los siguientes indicadores agrupados en cuatro criterios:

- Movilidad: longitud del tramo que pasa por el centro, número de pasajeros transportados.
- Ambiental: uso del suelo, longitud de tramo en estratos más bajos.
- Ambiental: tipo de vehículo, capacidad no utilizada del vehículo.
- Económico: tiempo de viaje, cercanía a la estación más cercana del sistema de transporte.

Mazarío (2016) analiza un problema ecológico para la ciudad de Valencia considerando en su análisis las técnicas multicriterio y la valoración de intangibles. El problema es analizado utilizando la metodología AHP, y un panel de diez expertos analizan y priorizan los diversos criterios y atributos. La jerarquía del problema se establece de la siguiente manera:

- Factores económicos (costes): iniciales, mantenimiento, medioambiental.
- Factores de calidad del viaje: tiempo, confort, coste.
- Factores de sostenibilidad: contaminación, ruido, huella de carbono, salud.

Por lo que respecta a los criterios ambientales, existen estudios monográficos en los que se analizan los efectos de las emisiones de gases debidas al consumo de combustible.

En CICC (2011) se analizan las consecuencias de las emisiones de CO₂ para el aumento del efecto invernadero y se describe la forma de medir dichas emisiones. Por su parte, en el Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE) se selecciona la localidad de Almansa como población objeto de estudio y se estiman las estimaciones de contaminantes a partir de datos de intensidades de tráfico, velocidad media y porcentaje de vehículos por tipo de contaminante (<http://www.idae.es/informacion-y-publicaciones/bases-de-datosherramientas/calculadora-de-emisiones-de-gases-de-efecto>). Como resultado se analizan separadamente las emisiones de diversos gases contaminantes (CO, CO₂, NO_x, SO₂, FC, VOC, PM).

Cooper y otros (2012) analizan únicamente las emisiones de distintos tipos de vehículos de transporte público, basándose en los combustibles y las tecnologías de motor que utilizan. El estudio analiza separadamente las emisiones de CO, HCT, NO_x, PM y CO₂.

De estos estudios se deduce que existen dos tipos de emisiones perjudiciales para el medio ambiente: las emisiones de gases contaminantes del aire (monóxido de carbono, dióxido de azufre, etc.) y las de CO₂, por su contribución al efecto invernadero. Resaltar que durante el 2017, las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) en España (338,3 toneladas CO₂-eq) se han incrementado un 4,4%. El 26% de los GEI proviene del transporte y del total de GEI, el 81% corresponden al CO₂ (https://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/notaresultadosavance-2017_tcm30-457778.pdf).

A pesar de la complejidad de algunos de los modelos utilizados, su efectividad depende también de la calidad de los datos obtenidos. Algunos de los atributos utilizados son difíciles de obtener de manera precisa. Por lo tanto, para el presente estudio se han seleccionado de entre los atributos expuestos aquellos de los que razonablemente se han podido obtener valores fiables, dentro del alcance de un trabajo de las características del nuestro.

4. VIABILIDAD INTEGRAL DE LAS RUTAS DE TRANSPORTE URBANO

En esta sección se establece el modelo jerárquico que será utilizado en la Sección 5 (Caso Práctico en Zaragoza) para: (i) evaluar la viabilidad integral de las 34 líneas de transporte urbano de Zaragoza consideradas (Anejo 1); (ii) identificar aquellas que se encuentren por debajo de los umbrales mínimos establecidos por los expertos que colaboran en el trabajo y (iii), para una de estas líneas “poco viables desde un punto de vista integral”, seleccionar la mejor de las posibles modificaciones contempladas para la incrementar la viabilidad integral de la línea. Así mismo, en esta sección se presentan los indicadores que han sido utilizados para valorar cada uno de los 12 atributos considerados para evaluar la viabilidad integral.

4.1 Viabilidad Integral

El análisis de la viabilidad integral de un sistema requiere una visión holística de la realidad que, incluyendo aspectos tangibles e intangibles, permita identificar y estructurar convenientemente los aspectos relevantes para la resolución del problema planteado en cada situación concreta. En nuestro caso, la identificación de los aspectos relevantes ha comenzado con el estudio de los trabajos previos aparecidos en la literatura científica (Sección 3). Seleccionados una serie de atributos iniciales, se ha recurrido a un grupo de expertos, que van a asesorar en la valoración de la importancia relativas de los criterios y atributos considerados para el análisis de la viabilidad integral, para que seleccionen los que consideren más apropiados en nuestro caso. Este grupo de expertos está constituido por seis personas de tres ámbitos distintos: Administración Local, Empresa y Universidad. De las seis personas, las dos primeras (DM1), ingenieros de caminos, son miembros de la Administración Local encargados de la movilidad urbana; la tercera (DM2) es el propietario de una empresa de transporte urbano de una capital de provincia española de mediano tamaño; y las tres últimas son académicos especialistas en Ciencias de la Decisión (2 personas), un Catedrático de Universidad (DM3) y un Contratado Doctor (DM4), y en Transporte y Logística (1 persona), Catedrático de Universidad. Los tres últimos actuarán por consenso y sus preferencias se denotarán por DM^[3].

El tema elegido para este TFG aborda algunas de las competencias del Ingeniero Civil, como son el diseño de los sistemas de transporte para mantener las grandes ciudades en movimiento, así como la planificación de las ciudades y sus servicios proporcionando soluciones sostenibles con el medio ambiente y la sociedad. La complejidad del problema contemplado exige la consideración simultánea de criterios de carácter tecnológico (TEC), económico (ECO), social (SOC) y ambiental (AMB), que serán los cuatro criterios considerados inicialmente en el estudio.

Asumiendo independencia entre los criterios considerados, o valoraciones de las partes independientes de los mismos en las comparaciones pareadas (como sugiere Saaty), se construye una jerarquía con tres niveles. El primer nivel corresponde a la misión (evaluación de la viabilidad integral), el segundo nivel incluye los cuatro criterios antes mencionados (TEC, ECO, SOC y AMB) y el tercer nivel los atributos asociados a los cuatro criterios. Inicialmente se analizaron un total de 26 atributos extraídos de la literatura; finalmente, conforme a la opinión de los expertos y la información disponible, la jerarquía ha recogido 12 atributos, tres para cada uno de los criterios contemplados (véase la Figura 1).

Estos atributos podrían volver a separarse en subcriterios de un nivel inferior. No obstante, para no complicar la presentación de la metodología con un número elevado de niveles, se ha decidido por cuestiones de operatividad limitarse a los tres niveles ya mencionados (misión, criterios y atributos). Más aún, cada uno de estos doce atributos se podría valorar en función de uno o varios indicadores. En lo que sigue, por simplicidad, se ha considerado un único indicador para cada atributo y cinco categorías para cada uno que van de la mejor a la peor.

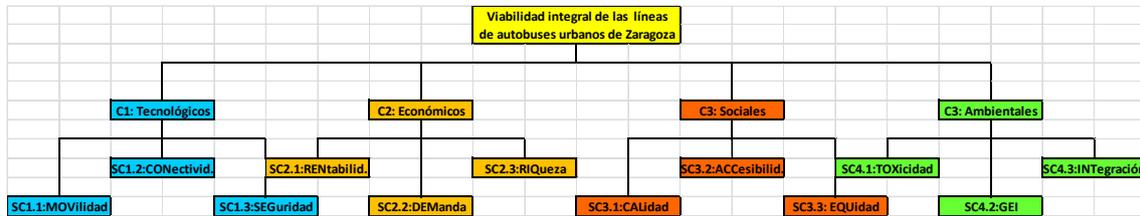


Figura 1: Jerarquía para evaluación de la viabilidad integral

Los atributos considerados para el criterio C1: Tecnológicos son:

SC1.1: MOVilidad (vehículos, motores, TIC, operatividad, GPS, capacidad, flexibilidad, valor residual...). Este atributo será evaluado por el indicador de mínimo dado por la frecuencia con la que pasan los autobuses y las cinco categorías consideradas son: Muy Bueno (MB) [5-10]; Bueno (B) [10-15]; Regular (R) [15-20]; Malo (M) [20-25]; Muy Malo (MM) [25-30].

SC1.2: CONectividad (infraestructura, equipamiento, enlazabilidad...). Este atributo será evaluado por el indicador de máximo dado por el número de postes que puede accederse en la línea o con un solo cambio y las cinco categorías consideradas son: Muy Bueno (MB) [350-430]; Bueno (B) [270-350]; Regular (R) [190-270]; Malo (M) [110-190]; Muy Malo (MM) [30-110].

SC1.3: SEGuridad (activa, pasiva, preventiva, siniestros, mantenimiento...). Este atributo será evaluado por el indicador de mínimo dado por el número medio de accidentes por cada 100.000 kilómetros y las cinco categorías consideradas son: Muy Bueno (MB) [0-3]; Bueno (B) [3-6]; Regular (R) [6-9]; Malo (M) [9-12]; Muy Malo (MM) [12-16].

Los atributos considerados para el criterio C2: Económicos son:

SC2.1: RENTabilidad de la línea (resultado económico...). Este atributo será evaluado por el indicador de mínimo dado por las pérdidas medias por viajero y las cinco categorías consideradas son: Muy Bueno (MB) [0,15-0,95]; Bueno (B) [0,95-1,75]; Regular (R) [1,75-2,55]; Malo (M) [2,55-3,35]; Muy Malo (MM) [3,35-4,15].

SC2.2: DEManda (viajeros por línea...). Este atributo será evaluado por el indicador de máximo dado por el número de viajeros anuales (en miles) y las cinco categorías consideradas son: Muy Bueno (MB) [6.100-7.600]; Bueno (B) [4.600-6.100]; Regular (R) [3.100-4.600]; Malo (M) [1.600-3.100]; Muy Malo (MM) [100-1.600].

SC2.3: RIQueza directa generada (desarrollo económico, comercios en la zona, conductores, modos de pago...). Este atributo será evaluado por el indicador de máximo dado por el número de conductores y las cinco categorías consideradas son: Muy Bueno (MB) [20-25]; Bueno (B) [15-20]; Regular (R) [10-15]; Malo (M) [5-10]; Muy Malo (MM) [1-5].

Los atributos considerados para el criterio C3: Sociales son:

SC3.1: CALidad de la línea (satisfacción, confort, precio...). Este atributo será evaluado por el nivel de satisfacción ciudadana proporcionado por la encuesta realizada por el Ayuntamiento en febrero de 2018 y las cinco categorías consideradas son: Muy Bueno (MB) [6,7-8,0); Bueno (B) [5,4-6,7); Regular (R) [4,1-5,4); Malo (M) [2,8-4,1); Muy Malo (MM) [1,5-2,8).

SC3.2: ACCesibilidad (puntos de interés, paradas taxi, intermodalidad...). Este atributo será evaluado por el indicador de máximo dado por el número de puntos de interés que se puede acceder en la ruta y las cinco categorías consideradas son: Muy Bueno (MB) [7-8); Bueno (B) [6-7); Regular (R) [4-6); Malo (M) [2-4); Muy Malo (MM) [0-2).

SC3.3: EQUidad Social (velocidad comercial, superficie cubierta, desfavorecidos, densidad de postes y renta de la zona...). La equidad social, es uno de los principales problemas que pueden aparecer a la hora de poner en marcha una nueva infraestructura de transporte, en gran medida, por la desigualdad de infraestructuras y servicios. El principal objetivo de desarrollo social, es el de hacer frente a los más desfavorecidos, como discapacitados, personas de avanzada edad etc... El objetivo de lograr un bienestar social en las ciudades de manera que se mejore la calidad de vida urbana de la población es primordial para que una ciudad sea competitiva de acuerdo con los estándares europeos, además de para garantizar la cohesión territorial. Este atributo será evaluado por el indicador de máximo obtenido a partir de una valoración de las líneas efectuada por la administración local en función de las cinco cuestiones que se mencionan a continuación y a partir de las cuales se determinan las cinco categorías consideradas son: Muy Bueno (MB) {5}; Bueno (B) {4}; Regular (R) {3}; Malo (M) {2}; Muy Malo (MM) {1}.

Cuestionario:

Q1: ¿Hasta qué punto el diseño actual de las líneas de transporte urbano satisface las expectativas de la sociedad?

Q2: ¿Hasta qué punto es competitivo (frecuencias, precios y todo lo que motive a la gente a usar el transporte público) el actual sistema de transporte urbano?

Q3: Valore la eficiencia operativa del sistema actual

Q4: ¿Cómo está la accesibilidad de los servicios públicos como escuelas, centros de salud etc...?

Q5: ¿Cómo está la accesibilidad de los servicios comerciales como bancos, centros comerciales etc...?

Los atributos considerados para el criterio C4: Ambientales son:

SC4.1: TOXicidad (contaminación atmosférica, monóxido de carbono...). Este atributo será evaluado por el indicador de mínimo dado por el equivalente en unidades de CO de la contaminación atmosférica (Cascajo, 2004) y las cinco categorías consideradas son: Muy Bueno (MB) [100-1000); Bueno (B) [1000-1900); Regular (R) [1900-2800); Malo (M) [2800-3700); Muy Malo (MM) [3700-4600).

SC4.2: Gases Efecto Invernadero (CO2...). Este atributo será evaluado por el indicador de mínimo dado por el equivalente en unidades de CO2 de la contaminación atmosférica asociada a los Gases Efecto Invernadero (Anejo 8). Para calcular las emisiones de CO2 a la atmósfera, se ha tenido en cuenta, el número total de kilómetros recorridos por cada línea de autobús a lo largo de un día, contando todos los trayectos, y diferenciando entre días laborales, sábados y festivos. Posteriormente se toma un valor de consumo de combustible (l/100Km) medio entre todos los distintos modelos de la compañía y se finaliza multiplicando los litros totales por su grado de contaminación (Kg (CO2)/l) según la guía práctica para la emisión de gases de efecto invernadero GEI de la Generalitat de Cataluña. Las cinco categorías consideradas son: Muy Bueno (MB) [6100-7600]; Bueno (B) [4600-6100]; Regular (R) [3100-4600]; Malo (M) [1600-3100]; Muy Malo (MM) [100-1600].

SC4.3: Integración Transporte y Territorio (carril bus, reversibilidad, regeneración de la zona, ruido...). Este atributo será evaluado por el indicador de máximo dado por el número de metros de carril bus existente en la línea y las cinco categorías consideradas son: Muy Bueno (MB) [3600-4500]; Bueno (B) [2700-3600]; Regular (R) [1800-2700]; Malo (M) [900-1800]; Muy Malo (MM) [0-900].

En este TFG la importancia relativa (prioridades locales) de los elementos o nodos incluidos en la jerarquía se ha calculado utilizando el método de priorización de la media geométrica por filas. Las prioridades globales de los atributos se han obtenido mediante el principio de composición jerárquica. Conocidas las prioridades globales de los atributos y teniendo en cuenta el elevado número de alternativas consideradas se ha recurrido a la utilización de AHP con medidas absolutas. Para cada atributo, la comparación de las alternativas no se realiza directamente entre ellas, sino que cada alternativa se valora con respecto a las categorías consideradas para el atributo. Los indicadores utilizados para la valoración de los atributos (Tabla 1), así como las categorías consideradas para cada uno, al igual que sus prioridades (véase la Tabla 2), han sido fijadas por los expertos académicos.

Tabla 1: Indicadores para cada atributo

C1: TECNOLÓGICOS			C2: ECONÓMICOS			C3: SOCIALES			C4: AMBIENTALES		
1.1 MOV	1.2 CON	1.3 SEG	2.1 REN	2.2 DEM	2.3 RIQ	3.1 CAL	3.2 ACC	3.3 EQU	4.1 ATM	4.2 GEI	4.3 INT
Frecuen.	Postes	Accid./km	Pérd/viajero	Demanda	Conductor.	Satisfac.	Puntos Impor	Encuesta	CO	GEI	Carril bus

Tabla 2: Categorías de atributos y sus prioridades (normalizadas modo ideal)

	AT1	AT2	AT3	AT4	AT5	AT6	AT7	AT8	AT9	AT10	AT11	AT12
MB	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B	0,389	0,457	0,357	0,636	0,574	0,52	0,484	0,372	0,631	0,517	0,612	0,407
R	0,255	0,218	0,196	0,392	0,345	0,263	0,312	0,27	0,384	0,212	0,367	0,19
MB	0,116	0,119	0,113	0,244	0,171	0,135	0,153	0,135	0,234	0,135	0,178	0,122
MM	0,077	0,084	0,073	0,114	0,077	0,086	0,086	0,088	0,147	0,071	0,089	0,079

4.2 Identificación de las rutas menos eficaces

Una vez identificados los criterios y los atributos más relevantes a la hora de evaluar la viabilidad integral de las rutas de transporte urbano, así como los indicadores que van a permitir valorar las líneas de autobuses consideradas, se requiere valorar la importancia relativa de los elementos considerados en la jerarquía. Para ello, siguiendo un procedimiento Top-Down se construyen y valoran (utilizando la escala fundamental de Saaty) las matrices de comparaciones pareadas (Anejo 2).

En este caso se requieren cinco matrices. La primera es una matriz 4x4 que valora los 4 criterios respecto a la meta. Las otras cuatro matrices son 3x3 y corresponden a la valoración de los tres atributos que cuelgan de cada criterio. En total se requieren 18 (6 + 4x3) juicios. Con estas matrices se obtienen las prioridades globales de los 12 atributos considerados. Es preciso recordar que en AHP solo se dan por buenas las prioridades locales cuando el indicador de inconsistencia considerado (GCI en este TFG) no supera el umbral correspondiente que depende del tamaño de la matriz. Caso de superar ese umbral es preciso que el decisor corrija sus juicios para alcanzar un nivel de inconsistencia aceptable.

Para establecer el ranking de las 34 líneas consideradas (Anejo 1) se recurre al procedimiento conocido como Ratings-AHP. Para cada atributo se identifican una serie de categorías cuyos niveles vienen definidos en términos de los valores fijados para los indicadores contemplados. En nuestro caso, por simplicidad, se ha considerado un único indicador para cada atributo; aunque en situaciones reales las categorías suelen establecerse combinando los valores de diferentes indicadores. Para cada atributo, mediante comparaciones pareadas, se obtiene la importancia relativa de cada categoría (Tabla 2). Al final se obtiene la puntuación (*scoring*) de cada alternativa (línea de autobús) sumando la importancia relativa de las categorías asociadas a la alternativa (w_{ij}) para cada atributo ponderada por la prioridad global (w_j^G) de éste.

$$w_i = w(A_i) = \sum_{j=1}^{12} w_{ij} * w_j^G, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, 12$$

La identificación de las rutas menos eficaces se obtiene a partir de los umbrales fijados por los expertos. Aquellas alternativas que no superen el umbral de viabilidad integral fijado se considera que deben ser mejoradas.

4.3 Selección multicriterio de las nuevas rutas

El último paso del procedimiento seguido para el diseño de nuevas rutas que mejoren la anterior situación consiste en seleccionar cada una de las rutas calificadas como no eficaces y proponer diferentes vías de mejora en función de las valoraciones obtenidas en 4.2. La selección de la mejor de las propuestas volverá a realizarse utilizando AHP con la jerarquía considerada en el problema. Obviamente, esta etapa requiere cierta capacidad creativa a la hora de plantear diferentes vías de mejora. Para completar la evaluación de la viabilidad integral se suele realizar, mediante un estudio de simulación, un análisis de sensibilidad sobre los juicios de las matrices de comparaciones utilizadas y sobre las categorías a las que se asigna cada alternativa. De esta forma se tiene una mayor información sobre la estabilidad de los resultados obtenidos.

5. CASO PRÁCTICO

El Caso Práctico considerado en este TFG tiene por objeto de estudio el transporte urbano (viabilidad integral de las líneas de autobuses) en la ciudad de Zaragoza; ciudad que ronda los 700.000 habitantes.

A principios del siglo XXI, la ciudad de Zaragoza contaba con una red consolidada de líneas de autobús urbano que conectaba toda la ciudad. La designación de Zaragoza como sede de la Exposición Internacional de 2008 causó una remodelación urbanística que obligó a modificar el trazado de las líneas de autobuses, adaptando las existentes a los nuevos accesos entre los barrios de la ciudad y a las nuevas infraestructuras (puentes sobre el Ebro, estación del AVE,...) que se fueron creando.

En el año 2011, la construcción de la primera línea del tranvía urbano, que atraviesa la ciudad de norte a sur, obligó a modificar de nuevo algunas de las líneas de autobuses de manera que pudieran coexistir con este nuevo medio de transporte. En todo momento las modificaciones se hicieron de manera que se minimizara la afección a los trazados ya existentes, con el objetivo de reducir su influencia sobre los hábitos de los usuarios habituales del autobús: itinerarios, números de las líneas, ubicación de las paradas...

En el contexto anteriormente descrito, este trabajo aplica al caso de la red de autobuses urbanos de la ciudad de Zaragoza una metodología multicriterio de ayuda a la toma de decisiones para la valoración de alternativas y la selección de las mejores modificaciones para las peores líneas. El TFG analiza la viabilidad integral de las líneas de autobuses después de la modificación sufrida por la puesta en marcha del tranvía urbano; identifica los aspectos menos eficientes de cada ruta, se proponen alternativas a las líneas peor valoradas y se elige la más adecuada con respecto a los criterios previamente fijados. Este método combina la toma de decisiones consensuada mediante la participación de expertos y el análisis multicriterio usando la técnica AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

5.1 Planteamiento

Utilizando la jerarquía definida en la Figura 1, a partir del estudio de los trabajos previos y la colaboración del grupo de expertos (modelización jerárquica), la siguiente etapa de la metodología es la de valoración. En nuestro caso, siguiendo un proceso de arriba hacia abajo (Top-Down), los tres actores/expertos considerados en el estudio ($D^{[1]}$: Administración Pública Local (dos personas actuando por consenso), $D^{[2]}$: Operador del servicio/empresa (una persona) y $D^{[3]}$: Académicos incorporan sus preferencias. Para ello, se han realizado tres reuniones (una con cada grupo) durante los días 29 y 30 de agosto. El grupo de los 3 académicos ha proporcionado los juicios de las matrices de comparaciones pareadas de manera consensuada. Los juicios correspondientes a las 15 matrices de comparaciones pareadas ($5 = 1+4$, para cada decisor) pueden verse en el Anejo 3.

5.2 Resolución

A partir de las matrices de comparaciones pareadas dadas para cada uno de los nodos de la jerarquía, se obtienen las prioridades locales y globales de los elementos considerados. Así mismo, para cada uno de los 12 atributos se obtienen las prioridades locales de las categorías.

Las prioridades locales y globales de los elementos de la jerarquía para cada decisor pueden verse en el Anejo 4. Para cada uno de los tres decisores y para el grupo, las prioridades de los criterios pueden verse en la Tabla 3 y las prioridades globales de los atributos en la Tabla 4:

Tabla 3: Prioridades de los criterios para los tres decisores y el grupo

G	1. TEC	2. ECO	3. SOC	4. AMB
DM ^[1]	0,114	0,617	0,197	0,073
DM ^[2]	0,122	0,393	0,427	0,058
DM ^[3]	0,245	0,153	0,549	0,053
DM ^[G]	0,167	0,369	0,397	0,067

Tabla 4: Prioridades globales de los atributos para cada decisor

ATRIB.	1.1 MOV	1.2 CON	1.3 SEG	2.1 REN	2.2 DEV	2.3 RIQ	3.1 CAL	3.2 ACC	3.3 EQU	4.1 TOX	4.2 GEI	4.3 INT
DM ^{[1]=}	0,012	0,083	0,020	0,279	0,294	0,044	0,067	0,114	0,016	0,039	0,026	0,007
DM ^{[2]=}	0,034	0,011	0,077	0,255	0,048	0,090	0,295	0,093	0,039	0,044	0,005	0,009
DM ^{[3]=}	0,053	0,169	0,022	0,099	0,019	0,035	0,349	0,158	0,043	0,036	0,011	0,006

Las prioridades para el grupo de los criterios (Tabla 3) y de los atributos (Tabla 5), obtenidas mediante el método AIP (Saaty, 1980), se calculan como la media geométrica normalizada (modo distributivo) de las prioridades individuales.

Tabla 5: Prioridades globales de los atributos para el grupo

ATRIB.	1.1 MOV	1.2 CON	1.3 SEG	2.1 REN	2.2 DEV	2.3 RIQ	3.1 CAL	3.2 ACC	3.3 EQU	4.1 TOX	4.2 GEI	4.3 INT
DM ^{[G]=}	0,034	0,066	0,039	0,234	0,078	0,063	0,233	0,145	0,037	0,048	0,014	0,009

Para la Administración Local los dos atributos más importantes son: demanda y rentabilidad económica (57,25%). Para el Operador de Servicio estos dos atributos son: satisfacción y rentabilidad (54,97%) y para los académicos son: satisfacción y conectividad (51,81%). Para el grupo en su conjunto, estos dos atributos son: rentabilidad y satisfacción (46,68%).

Por simplicidad, en este tipo de estudios es frecuente seguir el método AIP (agregación de prioridades individuales) para obtener las prioridades del grupo. Estas prioridades se calculan como la media geométrica normalizada de los vectores de prioridades individuales (Tabla 5). Ahora bien, la utilización de la media geométrica como medida de síntesis para el conjunto de decisores solo es válida si los individuos son compatibles con el valor promedio. La compatibilidad se mide como una distancia log cuadrática promedio (Escobar y otros, 2015) y se da por buena si no supera los umbrales recomendados para el GCI.

$$GCOMPI(D^{[k]}, D^{[G]}) = \frac{1}{(n-1)(n-2)} \sum_{i,j=1}^n \ln^2 \left(\frac{w_i^{[k]} w_j^{[G]}}{w_j^{[k]} w_i^{[G]}} \right), k = 1, \dots, 3$$

Tabla 6: Compatibilidad de los decisores individuales con la posición colectiva

GCOMPI ($W^{[1]}, W^{[G]}$)=	1,279
GCOMPI ($W^{[2]}, W^{[G]}$)=	1,014
GCOMPI ($W^{[3]}, W^{[G]}$)=	1,002

En este caso, la compatibilidad supera ese umbral y se recomendaría una reunión con todos los actores que permitiera aproximar posiciones tras un debate en el que se justifiquen las posiciones. Si al final las posiciones son incompatibles se sugiere tratar de forma independiente cada decisor. En lo que sigue, con el fin de presentar el enfoque metodológico seguido se va a suponer que los decisores en aras a alcanzar una posición común aceptan los valores del grupo como posición de consenso.

Con los valores de las prioridades globales de los atributos (Tabla 5) y los proporcionados por la Tabla 2 para las prioridades locales de las categorías se puede obtener (Tabla 7) la puntuación (*scoring*) de cada una de las 34 líneas de autobuses consideradas (véase Anejos 1 y 7 para una breve introducción de las líneas). La presentación detallada de las líneas, en la que se incluye la información necesaria para los cálculos efectuados (viajeros, pérdidas, kilómetros, paradas, trazado, frecuencias, amplitud de horarios, accidentes...), puede verse en el fichero que se acompaña a este trabajo (02_Datos_TFG_JM Moreno).

Tabla 7. Puntuación de la viabilidad integral de las 34 líneas de autobuses

Valoraciones	C11: TECNOLÓGICOS			C2: ECONÓMICOS			C3: SOCIALES			C4: AMBIENTALES		
	LINEA	1.1 MOV	1.2 CON	1.3 SEG	2.1 REN	2.2 DEM	2.3 RIQ	3.1 CAL	3.2 ACC	3.3 EQU	4.1 ATM	4.2 GEI
21	7,43	374	759.070,90	0,18	4859666	16	7,12	0	2	3.253,62	2.477,67	3.643,40
22	8,71	340	542.414,14	0,276	4049774	17	6,74	2	3	3.564,41	2.714,34	4,34
23	7,86	348	943.265,92	0,335	4856640	17	7,32	2	4	2.855,56	2.174,54	2.815,50
24	6,86	270	824.522,70	0,179	7507265	22	7,15	2	3	4.081,90	3.108,42	1.806,40
25	10,14	114	235.705,45	1,472	1003278	9	6,92	1	5	2.362,14	1.798,80	861,70
28	30,00	219	208.235,96	1,967	678587	5	7,27	1	2	1.831,27	1.394,53	338,00
29	10,43	322	176.275,99	0,766	1835751	10	7,09	2	4	2.317,84	1.765,07	78,00
30	8,29	252	502.986,06	0,211	1924629	5	7,04	3	3	1.106,60	842,69	585,00
31	11,29	250	604.863,48	0,31	2672942	11	7,67	1	2	2.414,44	1.838,63	1.628,00
32	8,43	325	630.783,90	0,418	5717861	20	7,08	1	4	3.155,66	2.403,07	3.745,00
33	6,86	344	88.834,22	0,164	6578814	20	7,15	0	4	2.929,49	2.230,84	4.347,70
34	6,86	331	705.178,32	0,329	4576618	20	6,98	1	1	3.516,94	2.678,19	3.115,20
35	7,57	381	701.070,33	0,396	5460635	20	7,51	6	2	4.495,27	3.423,20	1.265,70
36	12,00	267	581.138,57	0,723	2014930	13	7,10	3	5	2.547,81	1.940,19	1.078,10
38	7,86	271	586.601,51	0,265	4151650	17	7,59	2	3	2.937,33	2.236,82	891,70
39	5,71	424	497.422,08	0,184	5674238	21	7,18	1	4	3.840,40	2.924,51	1.863,00
40	7,43	208	666.632,89	0,224	2306442	12	7,26	4	1	1.490,07	1.134,71	1.496,00
41	16,43	164	744.221,94	1,025	910728	5	7,06	0	4	1.487,73	1.132,92	453,00
42	8,29	338	1.317.531,04	0,341	487487	18	6,94	7	5	4.528,03	3.448,15	571,00
43	30,00	80	0,00	1,462	146042	3	7,30	1	3	286,75	218,36	0,00
44	12,71	183	663.602,39	0,895	1468427	8	6,96	4	5	2.440,07	1.858,14	71,00
50	19,29	250	262.869,08	1,236	685249	5	7,05	2	2	1.837,79	1.399,50	71,00
51	11,14	334	457.341,47	0,408	1644185	8	7,39	2	4	1.872,05	1.425,59	2.373,40
52	12,57	252	414.507,77	0,578	1242072	7	6,44	3	4	1.819,95	1.385,91	1.310,00
53	8,86	200	643.898,16	0,677	1735561	10	7,50	3	5	2.348,59	1.788,48	37,00
54	10,86	34	0,00	1,569	356443	3	7,68	0	3	811,15	617,70	0,00
55	9,29	47	135.785,93	2,626	235819	3	7,95	1	5	978,16	744,88	0,00
56	20,00	56	0,00	4,002	91304	2	7,21	1	1	535,53	407,81	0,00
57	8,71	60	267.883,93	3,142	170428	4	7,64	1	3	886,23	674,87	0,00
58	30,00	61	0,00	2,34	93658	1	7,82	0	4	355,49	270,71	0,00
C1	12,86	55	357.647,40	0,822	251400	2	6,94	0	5	150,36	114,50	536,00
C4	15,00	168	1.124.239,73	0,608	698015	3	6,67	2	2	595,16	453,23	0,00
C11	8,86	289	708.113,97	0,228	3824585	20	7,27	4	2	2.537,31	1.932,19	71,00
C12	8,86	179	459.731,14	0,194	4123638	20	7,41	4	1	2.422,69	1.844,91	71,00

5.3 Análisis de los resultados

En paralelo a la obtención de la puntuación de cada una de las 34 líneas, los expertos deberían haber determinado si alguno de los atributos es crítico para el problema, esto es, si debe alcanzar obligatoriamente un determinado umbral; así mismo, podrían fijar un umbral de viabilidad mínimo para las líneas. En este caso, teniendo en cuenta que se está tomando un único indicador para cada atributo y que su estimación no se ha realizado con el grado de profundidad exigido en estudios reales, no se ha creído conveniente fijar esos umbrales estrictos, aunque suelen ir asociados a restricciones legales.

Conforme al planteamiento realizado para el estudio, una vez ordenadas las líneas de autobuses (Tabla 8), el siguiente paso sería identificar el conjunto de alternativas que no cumplen los requisitos exigidos (suponer la puntuación de viabilidad por encima de un umbral) y seleccionar cuál de las posibles vías para su mejora es la mejor. En nuestro caso, las tres peores líneas (puntuación menor que 0,33) son la 25, 28 y 56, y tienen una característica en común, conectan barrios periféricos de la ciudad (poco poblados o nuevos) con el centro.



Figura 2a. Trazado de Línea 25



Figura 2b. Trazado de la Línea 28



Figura 2c. Trazado de la Línea 56

Tabla 8: Ordenación de las 36 líneas de autobuses consideradas

LINEA	35	33	39	31	42	24	C12	23	54	32	C11	21	38	53	51	55	58	29	40	57	34	30	36	22	C1	43	44	52	C4	50	41	25	28	56
Puntuación	0,631	0,605	0,571	0,570	0,562	0,560	0,553	0,551	0,541	0,540	0,532	0,531	0,528	0,504	0,503	0,492	0,482	0,478	0,472	0,470	0,462	0,458	0,451	0,451	0,426	0,410	0,404	0,387	0,377	0,361	0,330	0,325	0,291	0,241
Orden	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34

Según el estudio, las tres líneas con menor viabilidad son (en ese orden): la Línea 56, con una puntuación de 0,241; la Línea 28 con una puntuación de 0,291 y, finalmente la Línea 25. Como se desprende de la Tabla 9, la peor de las líneas (56), que transcurre por una de las zonas de expansión de la ciudad (Zaragoza sur), está calificada como “Muy Mala (MM)” en conectividad, atributos económicos, accesibilidad a puntos de interés e integración con el terreno.

LINEA	C1: TECNOLÓGICOS			C2: ECONÓMICOS			C3: SOCIALES			C4: AMBIENTALES			Puntuación	Orden
	1.1 MOV	1.2 CON	1.3 SEG	2.1 REN	2.2 DEM	2.3 RIQ	3.1 CAL	3.2 ACC	3.3 EQU	4.1 ATM	4.2 GEI	4.3 INT		
56	M	MM	MB	MM	MM	MM	R	MM	M	MB	MB	MM	0,241	34

Tabla 9: Categorías de las líneas para cada atributo, puntuación y orden

LINEA	C1: TECNOLÓGICOS			C2: ECONÓMICOS			C3: SOCIALES			C4: AMBIENTALES			Puntuación	Orden
	1.1 MOV	1.2 CON	1.3 SEG	2.1 REN	2.2 DEM	2.3 RIQ	3.1 CAL	3.2 ACC	3.3 EQU	4.1 ATM	4.2 GEI	4.3 INT		
21	MB	MB	R	MB	B	B	R	MM	MB	M	M	MB	0,531	12
22	MB	B	B	MB	R	B	MB	M	R	M	M	MM	0,451	24
23	MB	B	M	MB	B	B	B	M	B	M	R	B	0,551	8
24	MB	B	R	MB	MB	MB	R	M	R	MM	MM	R	0,560	6
25	B	MB	MB	B	MM	MB	MB	MM	MB	R	R	MM	0,325	32
28	MM	R	MB	R	MM	M	R	MM	MB	B	B	MM	0,291	33
29	B	B	MB	MB	M	R	R	M	B	R	R	MM	0,478	18
30	MB	R	B	MB	M	M	R	M	R	B	B	MM	0,458	22
31	B	R	R	MB	M	R	MB	MM	MB	R	R	M	0,570	4
32	MB	B	R	MB	B	MB	R	MM	B	M	M	MB	0,540	10
33	MB	B	MB	MB	MB	MB	R	MM	B	M	M	MB	0,605	2
34	MB	B	R	MB	R	MB	M	MM	MM	M	M	B	0,462	21
35	MB	MB	R	MB	B	MB	B	R	M	MM	MM	M	0,631	1
36	B	R	B	MB	M	R	R	M	MB	R	R	M	0,451	23
38	MB	B	B	MB	R	B	B	M	R	M	M	MM	0,528	13
39	MB	MB	B	MB	B	MB	R	MM	B	MM	MM	R	0,571	3
40	MB	R	R	MB	M	R	R	R	MM	B	B	M	0,472	19
41	R	MB	R	B	MM	M	R	MM	B	B	B	MM	0,330	31
42	MB	B	MM	MB	MM	B	M	MB	MB	MM	M	MM	0,562	5
43	MM	MM	MB	B	MM	MM	B	MM	R	MB	MB	MM	0,410	26
44	B	M	R	MB	MM	M	M	R	MB	R	R	MM	0,404	27
50	R	R	MB	B	MM	M	R	M	M	B	B	MM	0,361	30
51	B	B	B	MB	M	M	B	M	B	B	B	R	0,503	15
52	B	R	B	MB	MM	M	MM	M	B	B	B	M	0,387	28
53	MB	R	R	MB	M	R	B	M	MB	R	R	MM	0,504	14
54	B	MM	MB	B	MM	MM	MB	MM	R	MB	MB	MM	0,541	9
55	MB	MM	MB	M	MM	MM	MB	MM	MB	MB	MB	MM	0,492	16
56	M	MM	MB	MM	MM	MM	R	MM	M	MB	MB	MM	0,241	34
57	MB	MM	MB	M	MM	MM	MB	MM	R	MB	MB	MM	0,470	20
58	MM	MM	MB	R	MM	MM	MB	MM	B	MB	MB	MM	0,482	17
C1	B	MM	B	MB	MM	MM	M	MM	MB	MB	MB	MM	0,426	25
C4	R	M	M	MB	MM	MM	MM	M	M	MB	MB	MM	0,377	29
C11	MB	B	R	MB	R	MB	R	R	M	R	R	MM	0,532	11
C12	MB	M	B	MB	R	MB	B	R	MM	R	R	MM	0,553	7

Para evaluar la estabilidad de esta ordenación se ha realizado un análisis de sensibilidad de la misma (100 simulaciones), permitiendo oscilar los juicios del grupo en intervalos obtenidos a partir de los valores iniciales sumando y restando una unidad. En las 100 simulaciones consideradas (Anejo 6) la Línea 56 ha sido la peor seguida de la 28. La tercera peor ha sido la Línea 41 (69%) y la Línea 25 (31%). En resumen, la ordenación alcanzada se entiende suficientemente estable para garantizar que la Línea 56 es la de peor viabilidad integral.

5.4 Selección multicriterio de la opción de mejora para la peor línea (Línea 56)

La tercera cuestión planteada en este estudio era la de seleccionar la mejor de las opciones para la mejora de la peor línea (56). En este caso, la metodología ha puesto de manifiesto algunas de las limitaciones de la línea. Lo que no ha reflejado, debido a la simplificación realizada a la hora de valorar los atributos, era la conexión intermodal que tiene la Línea 56, pues está conectada con la única línea de tranvía existente en Zaragoza. Si este hecho se hubiera tenido en cuenta, la conectividad sería notablemente mejor.

En cuanto a las limitaciones económicas de la Línea 56, estrechamente relacionadas con la demanda, se entiende que al ser un barrio joven su población y con ello la demanda irá aumentando los próximos años. No obstante, una medida que podría aplicarse a corto plazo es la de extender la Línea 56 desde Avda. de la Ilustración a dos puntos de indudable atractivo: el Hospital Viamed Montecanal y el Centro Deportivo Montecanal. También podría considerarse la posibilidad de conectar (en V. Beethoven) la línea 56 con la 54 que transita por Rosales del Canal y con la Línea 41 (en Martín Diez de Aux). Estas conexiones permitirían acceder a las proximidades de los puntos resaltados. Además, la conexión con la línea 41, que conecta con el centro de la ciudad, permitiría la incorporación de números viajeros del centro que acceden a los dos puntos resaltados. La conexión con la 54 refuerza esta última posibilidad (Figura 3).



Figura 3a. Trazado de la Línea 54



Figura 3b. Trazado de la Línea 41

Asumiendo estas tres alternativas como las posibles opciones de mejora, esto es, sean las alternativas: A1: extender la Línea 56 al Hospital y al Centro Deportivo; A2: conectar la Línea 56 con la Línea 54 y A3: extender la Línea 56 al Hospital y al Centro Deportivo y conectarla con las líneas 41 y 54, y manteniendo la valoración de la jerarquía, la mejor opción de mejora utilizando *AHP con medidas relativas* y los juicios considerados en el Anejo 5, es la alternativa A3 (extender y conectar) con una prioridad de 0,482, que resulta notablemente superior a las otras dos alternativas. La ordenación resultante es: A3>A1>A2 (Tabla 10).

Tabla 10: Selección opción de mejora para la línea 56

ATRIB.	1.1 MO	1.2 COM	1.3 SEG	2.1 REN	2.2 DEN	2.3 RIQ	3.1 CAL	3.2 ACC	3.3 EQU	4.1 TOX	4.2 GEI	4.3 INT	Prior.	
Lín. 56	M	MM	MB	MM	MM	MM	R	MM	M	MB	MB	MM	Total	Orden
A1	0,008	0,005	0,021	0,024	0,021	0,016	0,078	0,078	0,006	0,012	0,004	0,004	0,277	2
A2	0,021	0,016	0,012	0,053	0,009	0,016	0,023	0,043	0,011	0,029	0,007	0,002	0,241	3
A3	0,005	0,045	0,006	0,158	0,048	0,032	0,133	0,024	0,020	0,008	0,002	0,002	0,482	1

La opción seleccionada (A3) para extender la Línea 56 a los dos puntos de interés considerados, conectando con las Líneas 41 y 54 (en rojo los tramos nuevos, en azul la conexión con los existentes y el círculo indica el punto de modificación), podría ejecutarse en los dos sentidos y convendría que fuera Urbanismo quien seleccionara el apropiado teniendo en cuenta consideraciones que sobrepasan lo considerado en este TFG.

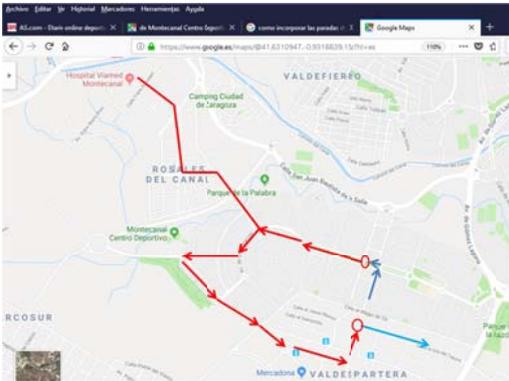


Figura 4a. Trazado mejorado Línea 56(1)

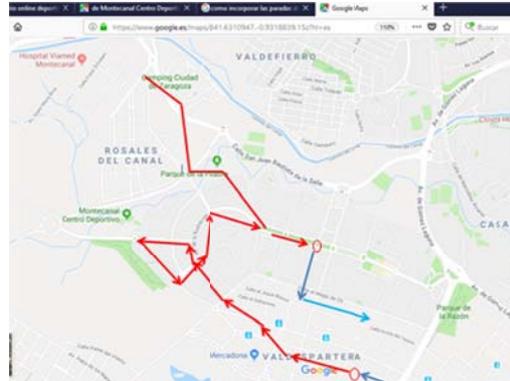


Figura 4b. Trazado mejorado Línea 56(2)

Las otras dos líneas con menor puntuación (28 y 25) corresponden a conexiones de barrios con poca población con el centro de Zaragoza. En los dos casos las limitaciones que presentan van asociadas a la falta de demanda, a su poca conectividad y a la no integración con el terreno.

La Línea 28, con una puntuación de 0,291, conecta Peñaflores con el Coso. Ésta es la línea más larga de la ciudad y, a pesar de las limitaciones identificadas, las conexiones de los barrios deben mantenerse para asegurar el derecho a la movilidad de sus vecinos. No obstante, para intentar aumentar su demanda podría conectarse con la Línea 34 en Conde Aranda, para ello su retorno debería hacerse por el puente de Santiago en vez de por el puente de la Avda. del Pilar.

La tercera de las líneas consideradas (Línea 25) conecta la Cartuja con la Plaza de Aragón, tiene una puntuación de 0,325 y sus limitaciones se refieren a la demanda, su baja accesibilidad a puntos de interés y la escasa integración en el territorio. Como ocurría con la Línea 28, esta línea conecta un barrio poco poblado de ahí que su demanda va a ser difícil incrementarla. Además, al transcurrir gran parte por carretera no se puede incrementar la integración con el territorio (habilitar carril bus). En cuanto a su conectividad, aunque sus paradas no coinciden exactamente con otras líneas de autobuses, desde la llegada a Cesáreo Alierta hasta su terminación en el Paseo Pamplona, hay numerosas líneas en las inmediaciones de las paradas de la Línea 25.

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS

Siguiendo una metodología multicriterio, en concreto el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), y conforme a los contenidos incluidos en la materia Transporte y Territorio (12828) del Grado de Ingeniería Civil, este TFG titulado “Viabilidad Integral de las Rutas de Transporte Urbano en Zaragoza: Incorporación de aspectos intangible en el diseño de rutas urbanas” ha perseguido la incorporación en el análisis y el diseño de rutas urbanas de aspectos intangibles (básicamente sociales y ambientales) junto a los tradicionales aspectos tangibles (básicamente tecnológicos)

y económicos). La utilización de AHP ha permitido una resolución más realista y efectiva del problema, en consonancia con la orientación que se está dando al método científico para adecuarlo a los nuevos tiempos (Sociedad del Conocimiento).

Respecto a los tres objetivos formulados para el TFG: (i) aplicar una metodología multicriterio (AHP) para evaluar la viabilidad integral de las líneas de autobuses urbanos de Zaragoza; (ii) evaluar la viabilidad e identificar las líneas menos viables para su mejora y (iii) seleccionar la mejor de las opciones de mejora posibles, destacar lo siguiente:

- 1) Con el estudio de la literatura y la ayuda de un grupo de expertos académicos se ha formulado un modelo jerárquico con cuatro criterios (tecnológicos, económicos, sociales y ambientales) y 12 atributos. Estos 12 atributos capturan numerosas características de la realidad que deberían ser tenidas en cuenta en la resolución de una situación real. En nuestro caso, por la complejidad del problema y la dificultad para obtener datos fiables, se ha considerado un único indicador para evaluar cada uno de los 12 atributos. La idea era justificar la idoneidad de la aproximación seguida para el estudio y no tanto la resolución del problema real que excede el alcance de este trabajo.
- 2) Los expertos (Administración Local, Operador de Servicio, y Academia), con tres visiones diferentes del problema como se ha demostrado al analizar su compatibilidad, han valorado la jerarquía para alcanzar las prioridades globales de los 12 atributos considerados. Así mismo, los expertos académicos han determinado las categorías fijadas para los atributos y su importancia relativa, normalizada modo ideal.
- 3) Las valoraciones de los correspondientes indicadores se han calculado a partir de los datos extraídos de la información pública existente en la red, y de los documentos proporcionados por la Oficina de Movilidad Urbana de Zaragoza (Fichero 02-Datos).
- 4) El resultado final ha sido la ordenación (ranking) de las 36 alternativas y la identificación de las menos viables conforme al modelo y las valoraciones consideradas. El último objetivo abordado ha sido la selección de la mejor de las posibles mejoras. De las tres alternativas consideradas para la Línea 56, la mejor opción ha resultado la de extender la línea a dos nuevos puntos de interés (hospital y centro deportivo) y conectarla con las líneas 54 y 41.

De cara a una futura aplicación práctica de la metodología sugerida, sería conveniente trabajar conjuntamente con todos los actores relevantes del problema. El transporte urbano en los municipios es un problema complejo al que deben dársele respuestas a medio y largo plazo. Esto requiere que se llegue a acuerdos ampliamente respaldados entre estos actores.

En el estudio, se han incorporado la visión de los técnicos de la Administración Local, la de los Operadores del Servicio y la de la Academia; en este último caso reflejando una visión holística del problema. En un futuro, sería conveniente el incorporar al estudio a los políticos e intentar encuadrar el diseño de las rutas urbanas en el contexto de un plan estratégico de movilidad en la ciudad, teniendo en cuenta todos los modos de transporte y la integración del municipio en el área metropolitana. Una resolución colaborativa y participativa del problema mejoraría la efectividad y legitimidad de la solución.

Al margen de este enfoque colaborativo, otra de las ideas que debería ser incorporada en el futuro es la consideración de dependencias entre los elementos incluidos en la jerarquía. En este contexto habría que recurrir al Proceso Analítico Sistemático o en Red (ANP) (Saaty, 1996).

Para concluir este TFG, que ha pretendido poner de manifiesto algunas de las competencias adquiridas en la materia (propias de Transporte y Territorio y transversales), en particular la aplicación de las técnicas multicriterio para dotar de rigor científico el proceso de resolución de problemas, ayudar al decisor a seleccionar las mejores soluciones y formar continuamente a los actores implicados en una toma científica de las decisiones, quiero agradecer la ayuda prestada por los tres actores/grupos que han colaborado como expertos: la Oficina de Movilidad Urbana de Zaragoza, el Operador de Servicio de una capital de provincia española diferente de Zaragoza, y el grupo investigador de la Universidad de Zaragoza: Grupo Decisión Multicriterio Zaragoza.

REFERENCIAS:

Aguarón, J., Moreno-Jiménez, J.M. (2003). The Geometric Consistency Index. Approximated Thresholds. *European Journal of Operational Research* 147(1), 137-145.

Aguarón, J.; Escobar, M.T.; Moreno-Jiménez, J.M. (2003). Consistency Stability Intervals for a Judgement in AHP-Decision Support Systems. *European Journal of Operational Research* 145(2), 382-393.

Bouzada, P., Martinelli, G., Cillero, A. (2008). *Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por autobús y autocar*. Monografías EnerTrans, grupo ALSA.

Cascajo, R. (2004). Metodología de evaluación de efectos económicos, sociales y ambientales de proyectos de transporte guiado en ciudades. Tesis doctoral. ETSICCP UPM.

CICC (2011). *Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)*. Comisión Interdepartamental del Cambio Climático, Generalitat de Catalunya.

Cooper, E., Arioli, M., Carrigan, A., Jain, U. (2012). *Emisiones de escape de autobuses de transporte público*. Grupo EMBARQ.

Echeverri, C., Valencia-Hernández, G., Acosta, A. (2012). Metodología para evaluar el impacto ambiental sobre la calidad del aire en los proyectos de rediseño de rutas de transporte público colectivo en las ciudades. Estudio de caso: Medellín. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 11(20), pp. 31-42.

Escobar, M.T., Moreno-Jiménez, J.M. (2000). Reciprocal distributions in the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research* 123(1), 154-174.

Escobar, M.T., Aguarón, J., Moreno-Jiménez, J.M. (2015). Some extensions of the Precise Consistency Consensus Matrix. *Decision Support Systems* 74, 67-77.

Kahneman, D., Tversky, A. (1979). Prospect Theory: An Analysis of Decision Under Risk. *Econometrica* 47(2), 263-291.

Mazarío, J.L. (2016).): *Priorización de proyectos mejora para la movilidad urbana sostenible en la ciudad de Valencia*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, septiembre de 2015.

Meixueiro, J., Pérez, M.A., MASCLE, A.L. (2009). *Guía metodológica para la evaluación de proyectos de transporte masivo urbano*. Centro de Estudios para la Preparación y Evaluación Socioeconómica de Proyectos, Mexico.

Moreno-Jiménez, J.M. (1993). *Investigación Operativa*. Ed. Gore.

Moreno-Jiménez, J.M. (2002). El Proceso Analítico Jerárquico. Fundamentos. Metodología y Aplicaciones. En Caballero, R. y Fernández, G.M. *Toma de decisiones con criterios múltiples. RECT@ Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, Serie Monografías nº 1, 21-53.

Moreno-Jiménez, J.M. (2003). Los Métodos Estadísticos en el Nuevo Método Científico. En Casas, J.M. y Pulido, A.: *Información económica y técnicas de análisis en el siglo XXI*. INE, 331-348.

Moreno-Jiménez, J.M. (2004). E-Cognocracia y Representación Democrática del Inmigrante. *XVIII Anales de Economía Aplicada*. León (CD). ISBN: 84-609-4715-7.

Moreno-Jiménez, J.M. (2006). E-Cognocracia: Nueva Sociedad, Nueva Democracia. *Estudios de Economía Aplicada* 24(1-2), 559-581.

Moreno-Jiménez, J.M. (2016). Métodos Estadísticos en la Nueva Administración Pública: Del *Big Data and Analytics* al *Big Knowledge and Cognitive Decisional Tools*. En Herrerías Velasco, J.M. y Callejón Céspedes, J. (2016), *Investigaciones en Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*. Cap. 29, 445-462. Editorial Universidad de Granada.

Moreno-Jiménez, J.M., Aguarón, J., Escobar, M.T., Turón, A. (1999). Multicriteria Procedural Rationality on SISDEMA. *European Journal of Operational Research*, 119(2) 388-403.

Moreno-Jiménez, J.M., Mata, E.J. (1993). Sistemas Decisionales en la Empresa. *Cuadernos Aragoneses de Economía* 3(1), 139-160.

Moreno-Jiménez, J.M., Vargas, L.G. (1993). A probabilistic study of preference structures in the Analytic Hierarchy Process with Interval Judgments. *Mathematical and Computer Modelling* 17 (4-5), 73-81.

Moreno-Jiménez, J.M., Vargas, L.G. (2018). Cognitive Multicriteria Decision Making and the Legacy of the Analytic Hierarchy Process. *Estudios de Economía Aplicada* 36(1), 67-79

Navarro, I.J., Yepes, V., Martí, J.V. (2018). Social life cycle assessment of concrete bridge decks exposed to aggressive environments. *Environmental Impact Assessment Review* 72, 50-63.

Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.

Saaty, T.L. (1986). Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science* 32(7), 841-855.

Saaty, T.L. (1994). *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*. RSW, Pittsburgh (EE.UU.).

Saaty, T.L. (1996). *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*. RSW, Pittsburgh (EE.UU.).

Sierra, LA., Yepes, V., García-Segura, T., Pellicer, E. (2108a). Bayesian network method for decision-making about the social sustainability of infrastructure projects. *Journal of Cleaner Production* 176, 521-534.

Sierra, LA., Yepes, V., Pellicer, E. (2108b). A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures. *Journal of Cleaner Production* 187, 496-513.

Thaler, R.H. (2017). *Misbehaving: The Making of Behavioral Economics*. W.W. Norton – via Google Books.

Tversky, A., Thaler, R.H. (1990). Anomalies: Preference Reversals. *The Journal of Economic Perspectives* 4(2), 201-211.

Van Laarhoven, P.J.M., Pedrycz, W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems* 11, 199-227.

VV.AA. (1999). *TransPrice, Modal Integrated Urban Transport for Optimum Modal Split*. euroTRANS Consulting, Ltd.

VV.AA. (2011). *Diagnosis de la red actual de transporte urbano de Zaragoza y propuestas de mejora*.

ANEJO 1: Líneas de autobuses consideradas

LINEA	ORIGEN	DESTINO	LONGITUD	TOTAL	PARADAS		VIAJEROS	FRECUENCIA	PÉRDIDAS
			KM	KM	IDA	VUELTA		Laborables	
21	Mozart	Oliver	14,94	737744	26	26	4859666	7	872381
22	Las Fuentes	Las Fuentes	19,25	755880	31	33	4049774	8	1119553
23	Parque Venecia	Ciudad Justicia	13,6	890523	31	27	4856640	7	1626334
24	Valdefierro	Las Fuentes	19,45	1006643	38	36	7507265	6	1345380
25	Paseo Pamplona	La Cartuja	16,25	509110	22	18	1003278	9	1476688
28	Coso	Peñaflor Montañana	33,29	432202	18	18	678587	30	1335093
29	Camino de las Torres	San Gregorio	15,69	510563	23	24	1835751	9	1406756
30	Cir Las Fuentes	Cir Las Fuentes	5,95	298219	18		1924629	7	409756
31	Aljafería	Puerto Venecia	17,64	529045	26	24	2672942	11	828826
32	Santa Isabel	La Bombarda	17,84	1093877	38	39	5717861	7	2388479
33	Delicias	Pinares de Venecia	13,73	8555262	27	27	6578814	6	1080625
34	Estación Delicias	Cementerio	15,96	822487	29	30	4576618	6	1507056
35	Vía Hispanidad	Parque Goya	21,4	1041265	37	31	5460635	7	2160103
36	Valdefierro	Picarral	18,28	602266	32	30	2014930	11	1455973
38	Vía Hispanidad	Bajo Aragón	15,21	784178	30	26	4151650	7	1100977
39	Venecia	Vadorrey	14,99	864457	23	30	5674238	5	1044130
40	San José	Plaza Aragón	7,57	375019	14	17	2306442	7	516665
41	Rosales del Canal	Puerta del Carmen	14,84	362795	26	22	910728	15	933648
42	La Paz	Valle de Broto	21,82	660326	37	36	487487	7	1664587
43	María Zambrano	Juslibol	5,81	85954	12	10	146042	30	213453
44	Actur	Miraflores	18,7	512355	29	26	1468427	11	1314027
50	Vadorrey	San Gregorio	21,17	304334	26	32	685249	15	846726
51	Estación Delicias	Príncipe Felipe	11,75	393579	19	20	1644185	11	671279
52	Miralbueno	Puerta del Carmen	13,24	337750	21	21	1242072	12	717389
53	Miralbueno	Emperador Carlos IV	11,88	496973	23	24	1735561	8	1175451
54	Cir Rosales del Canal	Cir Rosales del Canal	5,16	209872	21		356443	10	559308
55	Cir Montecanal	Cir Montecanal	5,1	220936	19		235819	8	619298
56	Cir Valdespartera	Cir Valdespartera	6,43	129335	16		91304	20	365389
57	Cir Casablanca	Cir Casablanca	3,96	186648	14		170428	7	535486
58	Cir Fuente Junquera	Cir Fuente de la Junquera	5,91	83393	13		93658	30	219121
C1	Plaza de las Canteras	Cementerio	2,42	55921	4	5	251400	15	206629
C4	Puerto Venecia	Plaza de las Canteras	9,63	177898	14	11	698015	15	424183
CI1	Camino de las Torres	Estación Delicias	14,84	691979	20	23	3824585	8	876950
CI2	Camino de las Torres	Estación Delicias	13,81	696059	20	20	4123638	8	801405

ANEJO 2: Matrices de Comparaciones Pareadas y Escala de Saaty

	G	1. TEC	2. ECO	3. SOC	4. AMB
	1. TEC				
	2. ECO				
DM ^[1] =	3. SOC				
	4. AMB				

1=	IGUAL	
3=	LIGERO	
5=	FUERTE	
7=	MUY FUERTE	
9=	EXTREMO	

	TEC	1.1 MOV	1.2 CON	1.3 SEG		ECO	2.1 REN	2.2 DEM	2.3 RIQ
	1.1 MOV					2.1 REN			
DM ^[1] =	1.2 CON				DM ^[1] =	2.2 DEM			
	1.3 SEG					2.3 RIQ			

	SOC	3.1 CAL	3.2 ACC	3.3 EQU		AMB	4.1 TOX	4.2 GEI	4.3 INT
	3.1 CAL					4.1 TOX			
DM ^[1] =	3.2 ACC				DM ^[1] =	4.2 GEI			
	3.3 EQU					4.3 INT			

ANEJO 3: Juicios

Anejo 3a: Juicios de las matrices de comparaciones pareadas para los tres decisores

	G	1. TEC	2. ECO	3. SOC	4. AMB		G	1. TEC	2. ECO	3. SOC	4. AMB		G	1. TEC	2. ECO	3. SOC	4. AMB
DM ^[1] =		1	1/6	1/2	1/7			1	1/4	1/4	3			1	2	1/3	5
			1	4	7				1	1	5				1	1/4	4
				1	3					1	6					1	6
					1						1						1
	TEC	1.1 MOV	1.2 CON	1.3 SEG			TEC	1.1 MOV	1.2 CON	1.3 SEG			TEC	1.1 MOV	1.2 CON	1.3 SEG	
DM ^[1] =		1	1/6	1/2				1	4	1/3				1	1/4	3	
			1	5					1	1/5					1	6	
				1						1						1	
	ECO	2.1 REN	2.2 DEM	2.3 RIQ			ECO	2.1 REN	2.2 DEM	2.3 RIQ			ECO	2.1 REN	2.2 DEM	2.3 RIQ	
DM ^[1] =		1	1	6				1	5	3				1	2	6	
			1	7					1	1/2					1	5	
				1						1						1	
	SOC	3.1 CAL	3.2 ACC	3.3 EQU			SOC	3.1 CAL	3.2 ACC	3.3 EQU			SOC	3.1 CAL	3.2 ACC	3.3 EQU	
DM ^[1] =		1	1/2	5				1	4	6				1	3	6	
			1	6					1	3					1	5	
				1						1						1	
	AMB	4.1 TOX	4.2 GEI	4.3 INT			AMB	4.1 TOX	4.2 GEI	4.3 INT			AMB	4.1 TOX	4.2 GEI	4.3 INT	
DM ^[1] =		1	2	4				1	7	6				1	4	5	
			1	5					1	1/2					1	2	
				1						1						1	

Anejo 3b: Juicios para la priorización de las categorías de los atributos (académicos)

	MB	B	R	M	MM		MB	B	R	M	MM		MB	B	R	M	MM
AT1=	1	4	6	7	8		1	4	5	7	8		1	3	5	7	9
	0,25	1	3	4	5		0,25	1	2	4	5		0,333	1	3	5	7
	0,167	0,333	1	2	3		0,2	0,5	1	3	4		0,2	0,333	1	2	3
	0,143	0,25	0,5	1	2		0,143	0,25	0,333	1	2		0,143	0,2	0,5	1	3
	0,125	0,2	0,333	0,5	1		0,125	0,2	0,25	0,5	1		0,111	0,143	0,333	0,333	1
	MB	B	R	M	MM		MB	B	R	M	MM		MB	B	R	M	MM
AT4=	1	3	6	7	8		1	3	5	6	7		1	2	3	4	5
	0,333	1	3	4	5		0,333	1	3	4	6		0,5	1	2	3	4
	0,167	0,333	1	3	3		0,2	0,333	1	3	4		0,333	0,5	1	2	3
	0,143	0,25	0,333	1	2		0,167	0,25	0,333	1	2		0,25	0,333	0,5	1	2
	0,125	0,2	0,333	0,5	1		0,143	0,167	0,25	0,5	1		0,2	0,25	0,333	0,5	1
	MB	B	R	M	MM		MB	B	R	M	MM		MB	B	R	M	MM
AT7=	1	3	4	6	7		1	2	3	4	6		1	4	6	8	9
	0,333	1	2	4	5		0,5	1	2	3	5		0,25	1	2	4	5
	0,25	0,5	1	3	4		0,333	0,5	1	2	4		0,167	0,5	1	2	3
	0,167	0,25	0,333	1	3		0,25	0,333	0,5	1	3		0,125	0,25	0,5	1	2
	0,143	0,2	0,25	0,333	1		0,167	0,2	0,25	0,333	1		0,111	0,2	0,333	0,5	1
	MB	B	R	M	MM		MB	B	R	M	MM		MB	B	R	M	MM
AT10=	1	2	4	6	8		1	2	4	5	7		1	4	5	6	7
	0,5	1	2	4	6		0,5	1	2	4	6		0,25	1	2	3	4
	0,25	0,5	1	3	5		0,25	0,5	1	3	5		0,2	0,5	1	3	4
	0,167	0,25	0,333	1	4		0,2	0,25	0,333	1	3		0,167	0,333	0,333	1	2
	0,125	0,167	0,2	0,25	1		0,143	0,167	0,2	0,333	1		0,143	0,25	0,25	0,5	1

ANEJO 5: Juicios, prioridades y consistencias en la selección de la opción de mejora

	1.1 MOV	A1	A2	A3	Prior. L	Prior. G		1.2 CON	A1	A2	A3	Prior. L	Prior. G		1.3 SEG	A1	A2	A3	Prior. L	Prior. G
DM ^[3] =	A1	1	1/3	2	0,238	0,008	DM ^[3] =	A1	1	0,25	1/6	0,082	0,005	DM ^[3] =	A1	1	2	3	0,540	0,021
	A2		1	4	0,625	0,021		A2		1	1/4	0,236	0,016		A2		1	2	0,297	0,012
	A3			1	0,136	0,005		A3			1	0,682	0,045		A3			1	0,163	0,006
			GCI=	0,055	1	0,034				GCI=	0,321	1	0,066				GCI=	0,028	1	0,0394
	2.1 REN	A1	A2	A3	Prior. L	Prior. G		2.2 DEM	A1	A2	A3	Prior. L	Prior. G		2.3 RIQ	A1	A2	A3	Prior. L	Prior. G
DM ^[3] =	A1	1	1/3	1/5	0,101	0,024	DM ^[3] =	A1	1	3	1/3	0,268	0,021	DM ^[3] =	A1	1	1	1/2	0,250	0,016
	A2		1	1/4	0,226	0,053		A2		1	1/4	0,117	0,009		A2		1	1/2	0,250	0,016
	A3			1	0,674	0,158		A3			1	0,614	0,048		A3			1	0,500	0,032
			GCI=	0,255	1	0,234				GCI=	0,219	1	0,078				GCI=	0,000	1	0,0633
	3.1 CAL	A1	A2	A3	Prior. L	Prior. G		3.2 ACC	A1	A2	A3	Prior. L	Prior. G		3.3 EQU	A1	A2	A3	Prior. L	Prior. G
DM ^[3] =	A1	1	4	1/2	0,333	0,078	DM ^[3] =	A1	1	2	3	0,540	0,078	DM ^[3] =	A1	1	1/2	1/3	0,163	0,006
	A2		1	1/5	0,097	0,023		A2		1	2	0,297	0,043		A2		1	1/2	0,297	0,011
	A3			1	0,570	0,133		A3			1	0,163	0,024		A3			1	0,540	0,020
			GCI=	0,074	1	0,233				GCI=	0,028	1	0,145				GCI=	0,028	1	0,0365
	4.1 TOX	A1	A2	A3	Prior. L	Prior. G		4.2 GEI	A1	A2	A3	Prior. L	Prior. G		4.3 INT	A1	A2	A3	Prior. L	Prior. G
DM ^[3] =	A1	1	1/3	2	0,249	0,012	DM ^[3] =	A1	1	1/2	2	0,297	0,004	DM ^[3] =	A1	1	2	2	0,500	0,004
	A2		1	3	0,594	0,029		A2		1	3	0,540	0,007		A2		1	1	0,250	0,002
	A3			1	0,157	0,008		A3			1	0,163	0,002		A3			1	0,250	0,002
			GCI=	0,160	1	0,048				GCI=	0,028	1	0,0139				GCI=	0,000	1	0,0089

ANEJO 6: Primera iteración de la simulación

	1.1 MOV	1.2 CON	1.3 SEG	2.1 REN	2.2 DEM	2.3 RIQ	3.1 CAL	3.2 ACC	3.3 EQU	4.1 TOX	4.2 GEI	4.3 INT		
	0,05002969	0,09818822	0,05836109	0,22362217	0,0747098	0,06056303	0,2047407	0,12730161	0,03209469	0,04782885	0,01373558	0,00882558		
	C1: TECNOLÓGICOS			C2: ECONÓMICOS			C3: SOCIALES			C4: AMBIENTALES				Iter. 1
LINEA	1.1 MOV	1.2 CON	1.3 SEG	2.1 REN	2.2 DEM	2.3 RIQ	3.1 CAL	3.2 ACC	3.3 EQU	4.1 ATM	4.2 GEI	4.3 INT	Puntuación	Orden
21	1,000	1,000	0,196	1,000	0,574	0,520	0,312	0,088	0,234	0,135	0,178	1,000	0,558	5
22	1,000	0,457	0,357	1,000	0,345	0,520	0,153	0,135	0,384	0,135	0,178	0,079	0,467	22
23	1,000	0,457	0,113	1,000	0,574	0,520	0,484	0,135	0,631	0,135	0,367	0,407	0,551	7
24	1,000	0,457	0,196	1,000	1,000	1,000	0,312	0,135	0,384	0,071	0,089	0,190	0,565	4
25	0,389	0,119	1,000	0,636	0,077	0,135	0,153	0,088	1,000	0,212	0,367	0,079	0,336	31
28	0,077	0,218	1,000	0,392	0,077	0,135	0,312	0,088	0,234	0,517	0,612	0,079	0,302	33
29	0,389	0,457	1,000	1,000	0,171	0,263	0,312	0,135	0,631	0,212	0,367	0,079	0,492	17
30	1,000	0,218	0,357	1,000	0,171	0,135	0,312	0,135	0,384	0,517	0,612	0,079	0,464	23
31	0,389	0,218	0,196	1,000	0,171	0,263	1,000	0,088	0,234	0,212	0,367	0,122	0,544	10
32	1,000	0,457	0,196	1,000	0,574	1,000	0,312	0,088	0,631	0,135	0,178	1,000	0,547	8
33	1,000	0,457	1,000	1,000	1,000	1,000	0,312	0,088	0,631	0,135	0,178	1,000	0,625	2
34	1,000	0,457	0,196	1,000	0,345	1,000	0,153	0,088	0,147	0,135	0,178	0,407	0,476	18
35	1,000	1,000	0,196	1,000	0,574	1,000	0,484	0,372	0,234	0,071	0,089	0,122	0,646	1
36	0,389	0,218	0,357	1,000	0,171	0,263	0,312	0,135	1,000	0,212	0,367	0,122	0,443	24
38	1,000	0,457	0,357	1,000	0,345	0,520	0,484	0,135	0,384	0,135	0,178	0,079	0,535	12
39	1,000	1,000	0,357	1,000	0,574	1,000	0,312	0,088	0,631	0,071	0,089	0,190	0,598	3
40	1,000	0,218	0,196	1,000	0,171	0,263	0,312	0,270	0,147	0,517	0,612	0,122	0,472	20
41	0,255	0,119	0,196	0,636	0,077	0,135	0,312	0,088	0,631	0,517	0,612	0,079	0,321	32
42	1,000	0,457	0,073	1,000	0,077	0,520	0,153	1,000	1,000	0,071	0,089	0,079	0,556	6
43	0,077	0,084	1,000	0,636	0,077	0,086	0,484	0,088	0,384	1,000	1,000	0,079	0,409	26
44	0,389	0,119	0,196	1,000	0,077	0,135	0,153	0,270	1,000	0,212	0,367	0,079	0,394	27
50	0,255	0,218	1,000	0,636	0,077	0,135	0,312	0,135	0,234	0,517	0,612	0,079	0,371	29
51	0,389	0,457	0,357	1,000	0,171	0,135	0,484	0,135	0,631	0,517	0,612	0,190	0,501	14
52	0,389	0,218	0,357	1,000	0,077	0,135	0,086	0,135	0,631	0,517	0,612	0,122	0,388	28
53	1,000	0,218	0,196	1,000	0,171	0,263	0,484	0,135	1,000	0,212	0,367	0,079	0,499	15
54	0,389	0,084	1,000	0,636	0,077	0,086	1,000	0,088	0,384	1,000	1,000	0,079	0,530	13
55	1,000	0,084	1,000	0,244	0,077	0,086	1,000	0,088	1,000	1,000	1,000	0,079	0,493	16
56	0,116	0,084	1,000	0,114	0,077	0,086	0,312	0,088	0,147	1,000	1,000	0,079	0,251	34
57	1,000	0,084	1,000	0,244	0,077	0,086	1,000	0,088	0,384	1,000	1,000	0,079	0,473	19
58	0,077	0,084	1,000	0,392	0,077	0,086	1,000	0,088	0,631	1,000	1,000	0,079	0,468	21
C1	0,389	0,084	0,357	1,000	0,077	0,086	0,153	0,088	1,000	1,000	1,000	0,079	0,420	25
C4	0,255	0,119	0,113	1,000	0,077	0,086	0,086	0,135	0,234	1,000	1,000	0,079	0,370	30
C11	1,000	0,457	0,196	1,000	0,345	1,000	0,312	0,270	0,234	0,212	0,367	0,079	0,538	11
C12	1,000	0,119	0,357	1,000	0,345	1,000	0,484	0,270	0,147	0,212	0,367	0,079	0,546	9

ANEJO 7: Trayectos de la 34 líneas



Línea 21



Línea 22



Línea 23

ANEJO 7: Trayectos de la 34 líneas (continuación)



Línea 24



Línea 25



Línea 28

ANEJO 7: Trayectos de la 34 líneas (continuación)



Línea 29



Línea 30



Línea 31

ANEJO 7: Trayectos de la 34 líneas (continuación)



Línea 32



Línea 33



Línea 34

ANEJO 7: Trayectos de la 34 líneas (continuación)



Línea 35



Línea 36



Línea 38

ANEJO 7: Trayectos de la 34 líneas (continuación)



Línea 39

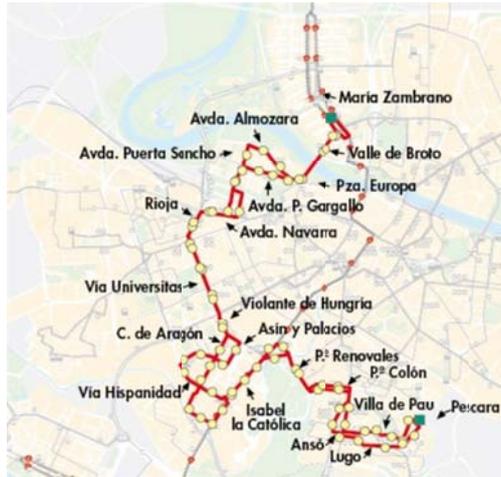


Línea 40



Línea 41

ANEJO 7: Trayectos de la 34 líneas (continuación)



Línea 42



Línea 43



Línea 44

ANEJO 7: Trayectos de la 34 líneas (continuación)



Línea 50



Línea 51



Línea 52

ANEJO 7: Trayectos de la 34 líneas (continuación)



Línea 53



Línea 54



Línea 55

ANEJO 7: Trayectos de la 34 líneas (continuación)



Línea 56



Línea 57



Línea 58

ANEJO 7: Trayectos de la 34 líneas (continuación)



Línea C1



Línea C4



Línea C1i



Línea C2i

ANEJO 8: Unidades equivalentes de CO2 para evaluar Gases Efecto Invernadero

Líneas	Kg CO2/día			Kg CO2/semana
	lab	sab	fes	
21	2606,98731	2281,1139	2027,6568	17343,70727
22	2910,92484	2328,73988	2117,03625	19000,40034
23	2373,16114	1845,792	1510,19345	15221,79117
24	3426,60375	2569,95281	2055,96225	21758,93381
25	1972,18125	1365,35625	1365,35625	12591,61875
28	1394,53475	1394,53475	1394,53475	9761,743215
29	1965,6432	1263,62777	1263,62777	12355,47154
30	948,40875	603,532841	553,238438	5898,815028
31	1883,47091	1726,515	1726,515	12870,38455
32	2723,9004	1735,29599	1466,7156	16821,51359
33	2459,19746	1844,3981	1475,51848	15615,90389
34	2952,34065	2214,25549	1771,40439	18747,36313
35	3644,4735	3188,91431	2551,13145	23962,41326
36	2078,67281	1758,87699	1429,08756	13581,32859
38	2424,41968	2121,36722	1414,24481	15657,71042
39	3204,24741	2670,20618	1780,13745	20471,58068
40	1193,92959	1044,68839	928,6119	7942,948216
41	1220,0706	915,05295	915,05295	7930,4589
42	3880,74934	2469,56776	2263,77045	24137,08493
43	218,36304	218,36304	218,36304	1528,54128
44	2066,53275	1337,16825	1337,16825	13007,00025
50	1632,74684	816,373418	816,373418	9796,48101
51	1442,76648	1322,53594	1442,76648	9979,134801
52	1444,88948	1238,47669	1238,47669	9701,400761
53	1935,98708	1548,78966	1290,65805	12519,38309
54	657,55557	597,777791	438,37038	4323,926021
55	816,130688	725,4495	408,065344	5214,168281
56	407,80989	407,80989	407,80989	2854,66923
57	777,384771	418,5918	418,5918	4724,107457
58	270,710505	270,710505	270,710505	1894,973535
C1	133,58763	0	133,58763	801,52578
C4	576,832185	0	288,416093	3172,577018
CI1	2091,5496	1673,23968	1394,3664	13525,35408
CI2	1997,06842	1597,65473	1331,37894	12914,37575