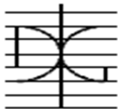



# APLICACIÓN DE LA TOMA DE DECISIÓN MULTI-CRITERIO AL DISEÑO SOSTENIBLE DE PUENTES DE HORMIGÓN

Por:

Vicent Penadés Plà

Septiembre 2017

Autor / Author: Vicent Penadés Plà		Fecha / Date: Septiembre 2017
Título / Title APLICACIÓN DE LA TOMA DE DECISIÓN MULTI-CRITERIO AL DISEÑO SOSTENIBLE DE PUENTES DE HORMIGÓN		
Director del trabajo / Supervisor: Pr. Dr. Victor Yepes Piqueras	Código / Code: CST/MIH-	Nº páginas / Pages: 93
Departamento / Department: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL		
Universidad / University: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Palabras clave / Keywords: Sostenibilidad / Toma de decisiones / Ciclo de vida / Puentes / Hormigón		
Código Unesco: 3305.04 Tecnología de la construcción / Puentes		



## **Agradecimientos**

A Victor Yepes por dirigirme y darme la oportunidad de realizar este trabajo. A Julián Alcalá, Fernando González, Juanjo Clemente y José Vicente Albiñana con quienes he aprendido y compartido momentos tanto en el mundo laboral como en el mundo de la investigación. A Leonardo y Paqui con quienes he trabajado conjuntamente en temas relacionados de este trabajo. A Tatiana por guiarme y animarme, y por el tiempo que ha invertido ayudándome a realizar mejor mi trabajo.

A mis compañeros del máster de hormigón, en especial a Álvaro, Daniel, Débora, Jorge Pablo, Phillip y Ricardo con quienes he pasado casi dos magníficos años en los que he pasado grandes momentos y espero pasar otros grandes momentos en el futuro en cualquier lugar del planeta. A mis compañeros del ICITECH por la buena acogida, por los almuerzos, por romper la monotonía del día a día, y con quienes puedo aprender mucho y apoyarme cuando es necesario.

A mi familia por las oportunidades que me han dado y el apoyo en mis decisiones. A Lorena por aguantarme y estar siempre ahí cuando lo he necesitado. A mis amigos de Xàtiva y Valencia con los que siempre se puede contar, por las risas y por todos los buenos ratos que pasamos.



## Resumen

Actualmente existe una tendencia clara hacia la sostenibilidad en los proyectos de estructuras, para lo cual es necesario equilibrar los pilares principales que apoyan esta sostenibilidad: la economía, el medio ambiente y la sociedad. Estos pilares básicos presentan objetivos diferentes y habitualmente enfrentados entre sí. Esta realidad conduce hacia la necesidad de adoptar procesos de toma de decisiones que permitan obtener soluciones capaces de satisfacer, de la mejor manera posible, los principios de sostenibilidad antes citados. De todas las estructuras, los puentes son una de las construcciones más destacadas, formando parte de las infraestructuras básicas de comunicación entre los distintos territorios. Por lo tanto, constituye una necesidad ineludible garantizar la sostenibilidad de este tipo de estructuras a lo largo de su ciclo de vida.

La toma de decisiones es un proceso que permite obtener soluciones que satisfagan diferentes objetivos. Este proceso puede llevarse a cabo de múltiples formas. Hwang y Yoon [1], clasificaron los procesos de toma de decisiones multi-criterio en toma de decisiones multi-atributo (*Multiple Attribute Decision-Making, MADM*), y toma de decisiones multi-objetivo (*Multiple Objective Decision-Making, MODM*). Los MADM se usan para decidir sobre un número discreto de soluciones. En este caso, los decisores actúan al inicio del proceso, o bien dando pesos a los diferentes criterios existentes para la evaluación de cada una de las soluciones, o bien evaluando dichas soluciones atendiendo a criterios subjetivos. Finalmente, se obtiene una priorización de las alternativas estudiadas. Por su parte, los MODM permiten obtener un conjunto continuo de soluciones, respecto a dos o más criterios, denominado frontera de Pareto. Esta frontera está constituida por el conjunto de soluciones no dominadas. En este sentido, una solución se dice que domina a otra si y sólo si es al menos tan buena como las otras soluciones en todos sus objetivos y es la mejor de todas en al menos un objetivo. En este caso, los decisores actúan al final del proceso, escogiendo una solución entre las existentes dentro de la frontera de Pareto.

Este trabajo se va a centrar en los métodos de decisión multi-atributo, ya que es el proceso de toma de decisión más común, y por lo tanto, el que más posibilidades tiene de utilizarse para la valoración de la sostenibilidad en proyectores reales. El primer capítulo se va a centrar en el concepto de sostenibilidad y su aplicabilidad en el sector

de la construcción. El segundo capítulo se centra en el proceso de toma de decisiones. Para ello, primero se va a realizar una descripción de que es la toma de decisión y posteriormente se va a llevar a cabo una clasificación y posterior explicación de los métodos de toma de decisión multi-atributo más comunes. El tercer capítulo se va a centrar en la aplicación de dichos métodos para la valoración de la sostenibilidad de los puentes en todas las fases de su ciclo de vida. Para este fin, se realiza una revisión bibliográfica, tanto de los métodos utilizados para la valoración de la sostenibilidad como de los criterios considerados. De esta forma, se pueden ver los vacíos de conocimiento existente, así como los criterios más comunes para evaluación de los diferentes pilares de la sostenibilidad en los puentes. En el cuarto capítulo se va a llevar a cabo un caso de estudio, en el que tras definir los criterios y pesos a considerar, se van a aplicar los métodos de toma de decisiones multi-atributo más comunes para obtener el puente más sostenible entre tres alternativas diferentes. Finalmente, en un quinto capítulo se van a hablar de las conclusiones obtenidas.

## Resum

Actualment hi ha una tendència clara cap a la sostenibilitat en els projectes d'estructures, per a la qual cosa és necessari equilibrar els principals pilars que recolzen esta sostenibilitat: l'economia, el medi ambient i la societat. Estos pilars bàsics presenten objectius diferents i habitualment enfrontats entre si. Esta realitat conduïx cap a la necessitat d'adoptar processos de presa de decisions que permeten obtindre solucions capaces de satisfer, de la millor manera possible, els principis de sostenibilitat abans citats. De totes les estructures, els ponts són una de les construccions més destacades, formant part de les infraestructures bàsiques de comunicació entre els distints territoris. Per tant, constituïx una necessitat ineludible garantir la sostenibilitat d'aquest tipus d'estructures al llarg del seu cicle de vida.

La presa de decisions és un procés que permet obtindre solucions que satisfacen diferents objectius. Este procés pot dur-se a terme de múltiples formes. Hwang i Yoon [1], van classificar els processos de presa de decisions multi-criteri en presa de decisions multi-atribut (*Múltiple Attribute Decision-Making*, MADM) , i presa de decisions multi-objectiu (*Múltiple Objective Decision-Making*, MODM) . Els MADM es gasten per a decidir sobre un número discret de solucions. En este cas, els decisors actuen a l'inici del procés, o bé donant pesos als diferents criteris existents per a l'avaluació de cada una de les solucions, o bé avaluant les dites solucions atenent a criteris subjectius. Finalment, s'obté una prioritizació de les alternatives estudiades. Per la seua banda, els MODM permeten obtindre un conjunt continu de solucions, respecte a dos o més criteris, denominat frontera de Pareto. Esta frontera està constituïda pel conjunt de solucions no dominades. En este sentit, una solució es diu que domina a una altra, sí i només sí, és almenys tan bona com les altres solucions en tots els seus objectius i és la millor de totes en almenys un objectiu. En este cas, els decisors actuen al final del procés, triant una solució entre les existents dins de la frontera de Pareto.

Este treball es va a centrar en els mètodes de decisió multi-atribut, ja que és el procés de presa de decisió més comú, i per tant, el que més possibilitats té d'utilitzar-se per a la valoració de la sostenibilitat en projectes reals. El primer capítol es va a centrar en el concepte de sostenibilitat i la seua aplicabilitat en el sector de la construcció. El segon capítol se centra en el procés de presa de decisions. En aquest, primer es va a realitzar una descripció sobre que és la presa de decisió i posteriorment es va a dur a terme una

classificació i posterior explicació dels mètodes de presa de decisió multi-atribut més comuns. El tercer capítol es va a centrar en l'aplicació dels dits mètodes per a la valoració de la sostenibilitat dels ponts en totes les fases del seu cicle de vida. Per a este fi, es realitza una revisió bibliogràfica, tant dels mètodes utilitzats per a la valoració de la sostenibilitat com dels criteris considerats. D'esta manera, es poden veure els buits de coneixement existent, així com els criteris més comuns per a l'avaluació dels diferents pilars de la sostenibilitat en els ponts. En el quart capítol es va a dur a terme un cas d'estudi, en el que després de definir els criteris i pesos a considerar, es van a aplicar els mètodes de presa de decisions multi-atribut més comuns per a obtindre el pont més sostenible entre tres alternatives diferents. Finalment, en un quint capítol es van a parlar de les conclusions obtingudes.



## **Abstract**

There is now a clear trend towards sustainability in the structural projects, for which it is necessary to balance the main pillars that support this sustainability: the economy, the environment and society. These basic pillars present different objectives and usually faced each other. This reality leads to the need to adopt decision-making processes to obtain solutions capable of satisfying, in the best possible way, the aforementioned principles of sustainability. Of all the structures, the bridges are one of the most outstanding constructions being part of the basic communication infrastructures between different territories. Therefore, it is a crucial need to ensure the sustainability of this types of structures throughout their life-cycle.

Decision making is a process that allows us the obtaining of solutions that satisfy different goals. This process can be carried out in multiple ways. Hwang and Yoon [1], classified multi-criteria decision-making processes in Multiple Attribute Decision-Making (MADM) and Multiple Objective Decision-Making (MODM). MADMs are used to decide on a discrete number of solutions. In this case, the decision makers act at the beginning of the process, either taking into account the importance of different existing criteria for the assessment of each of the solutions, or evaluating these solutions according to subjective criteria. Finally, a prioritization of the studied alternatives is obtained. On the other hand, the MODM allows the obtaining of a continuous set of solutions, with respect to two or more criteria, denominated Pareto frontier. This frontier is constituted by the set of non-dominated solutions. In this sense, one solution is said to dominate over the other if and only if it is at least as good as the other solutions in all its objectives and is the best of all in at least one objective. In this case, the decision makers act at the end of the process, choosing a solution among the existing ones within the Pareto border.

This work will focus on the multi-attribute decision methods, since it is the most common decision-making process, and therefore, the one that has the greatest potential to be used for the assessment of sustainability in real projectors. The first chapter will focus on the sustainability concept and its applicability in the construction sector. The second chapter focuses on the decision-making process. To do this, a description of decision making will first be made and a classification and subsequent explanation of

the most common multi-attribute decision-making methods will be carried out. The third chapter will focus on the application of these methods for assessing the sustainability of bridges at all stages of their life cycle. For this purpose, a bibliographic review is done to study the most used methods used for the assessment of sustainability and the criteria considered. In this way, we can see the gaps of existing knowledge, as well as the most common criteria for evaluating the different pillars of sustainability in bridges. In the fourth chapter, a case of study will be carried out, in which, after defining the criteria and weights to be considered, most common multi-attribute decision-making methods will be applied to obtain the most sustainable bridge between three different alternatives. Finally, in the fifth chapter, the conclusions will be discussed.

## TABLA DE CONTENIDOS

Agradecimientos .....	- 1 -
Resumen.....	- 3 -
Resum.....	- 5 -
Abstract .....	- 7 -
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	- 13 -
CAPÍTULO II: LA TOMA DE DECISIÓN MULTI-CRITERIO .....	- 17 -
2.1. Introducción a la toma de decisiones .....	- 17 -
2.1.1. Asignación de pesos objetiva .....	- 19 -
2.1.2. Asignación de pesos subjetiva.....	- 20 -
2.2. Clasificación de los métodos de toma de decisión multi-criterio .....	- 22 -
2.2.1. Métodos de puntuación directa ( <i>scoring methods</i> ).....	- 26 -
2.2.2. Métodos de distancia ( <i>distance-based methods</i> ) .....	- 28 -
2.2.3. Métodos de comparación directa por pares ( <i>pairwise comparison methods</i> ) .....	- 32 -
2.2.4. Métodos de superación ( <i>outranking methods</i> ) .....	- 39 -
2.2.5. Métodos de teoría de utilidad o valor ( <i>utility/value methods</i> ).....	- 42 -
CAPÍTULO III: ESTADO DEL ARTE .....	- 46 -
3.1. Revisión bibliográfica .....	- 46 -
3.2. Revisión de criterios .....	- 48 -
CAPÍTULO IV: CASO DE ESTUDIO.....	- 53 -
4.1. Descripción .....	- 53 -
4.2. Criterios considerados.....	- 56 -
4.2.1. Pilar económico.....	- 56 -
4.2.2. Pilar medio ambiental .....	- 57 -
4.2.3. Pilar social.....	- 62 -
4.3. Resumen criterios y pesos.....	- 63 -
4.4. Métodos de puntuación directa.....	- 66 -
4.4.1. SAW .....	- 66 -
4.4.2. COPRAS.....	- 67 -
4.5. Métodos basados en la distancia .....	- 69 -
4.5.1. TOPSIS .....	- 69 -
4.5.2. VIKOR.....	- 71 -
4.6. Métodos de comparación a pares.....	- 73 -

4.6.1. AHP y MACBETH.....	- 73 -
4.6.2. ANP.....	- 75 -
4.7. Métodos de superación .....	- 78 -
4.7.1. ELECTRE .....	- 78 -
4.7.2. PROMETHEE .....	- 80 -
4.8. Métodos de funciones de utilidad y valor.....	- 82 -
4.6.1. MIVES .....	- 82 -
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....	- 83 -
Referencias.....	- 88 -

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Proceso toma de decisiones.....	- 17 -
Figura 2.2. Matriz toma de decisión.....	- 18 -
Figura 2.3. Clasificación general de los MCDM .....	- 23 -
Figura 2.4. Distancias TOPSIS .....	- 30 -
Figura 2.5. Distancias VIKOR .....	- 31 -
Figura 2.6. Estructura jerárquica AHP .....	- 33 -
Figura 2.7. Estructura en red de ANP .....	- 35 -
Figura 2.8. Estructura jerárquica de MACBETH.....	- 37 -
Figura 2.9. Estructura plana de MACBETH .....	- 37 -
Figura 2.10. Funciones preferencia TOPSIS.....	- 41 -
Figura 2.11. Funciones de valor MIVES .....	- 45 -
Figura 3.1. Combinación palabras en buscador Scopus.....	- 46 -
Figura 3.2. Fases del ciclo de vida .....	- 51 -
Figura 4.1. Vista general de las alternativas 1 y 2 .....	- 54 -
Figura 4.2. Vista general de la alternativa 3.....	- 54 -
Figura 4.3. Pesos considerados .....	- 64 -

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación de los métodos MADM .....	- 25 -
Tabla 2.2. Escala de Saaty .....	- 33 -
Tabla 2.3. Escala de Bana e Costa .....	- 38 -
Tabla 2.4. Parámetros funciones de valor de MIVES .....	- 44 -
Tabla 3.1. Estado del arte en fase de diseño.....	- 47 -
Tabla 3.2. Estado del arte en fase de construcción.....	- 47 -
Tabla 3.3. Estado del arte en fase de uso y mantenimiento.....	- 48 -
Tabla 3.4. Estado del arte en fase final de ciclo de vida.....	- 48 -
Tabla 3.5. Criterios en fase de diseño .....	- 49 -
Tabla 3.6. Criterios en fase de construcción .....	- 50 -
Tabla 3.7. Criterios en fase de uso y mantenimiento .....	- 50 -
Tabla 3.8. Criterios en fase final de ciclo de vida .....	- 50 -
Tabla 4.1. Cantidades de materiales para cada alternativa .....	- 55 -
Tabla 4.2. Precios unitarios .....	- 56 -
Tabla 4.3. Coste total de las alternativas .....	- 57 -
Tabla 4.4. Categorías de impacto de la alternativa 1 por metro lineal.....	- 59 -
Tabla 4.5. Categorías de impacto de la alternativa 2 por metro lineal.....	- 60 -
Tabla 4.6. Categorías de impacto de la alternativa 3 por metro lineal.....	- 60 -
Tabla 4.7. Categorías de daño de la alternativa 1.....	- 61 -
Tabla 4.8. Categorías de daño de la alternativa 2.....	- 61 -
Tabla 4.9. Categorías de daño de la alternativa 3.....	- 61 -
Tabla 4.2. Resumen de criterios considerados .....	- 63 -
Tabla 4.3. Resumen general .....	65
Tabla 5.1. Puntuación métodos MADM.....	- 87 -

## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

El concepto de desarrollo sostenible aparece por primera vez en 1969 en el *National Environmental Policy Act* y se define cómo el progreso económico que puede beneficiar a las generaciones actuales y futuras sin dañar los recursos y organismos vivos del planeta [2]. Posteriormente, en 1987, el *Our Common Future Report* de *The World Commission on Environment and Development* [3] define el desarrollo sostenible cómo aquel desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras, compatibilizando factores económicos, medio ambientales y sociales, convirtiéndose en los tres pilares sobre los que se fundamentan la sostenibilidad. Más adelante, otras definiciones sobre el desarrollo sostenible han ido apareciendo, considerándolo la mayor parte de las mismas como un balance entre los tres pilares básicos de la sostenibilidad (económico, medio ambiental, y social). Esto implica que en la evaluación sostenible de un producto, proceso o actividad haya que considerar diferentes criterios que habitualmente están enfrentados entre sí. La toma de decisiones multi-criterio es un proceso que puede ayudar en la valoración y selección de alternativas sostenibles.

El sector de la construcción es uno de los sectores más importantes y activos, que además tienen un gran impacto económico, medio ambiental y social. Es por esto que lograr estructuras sostenibles es vital para un desarrollo adecuado. Una estructura sostenible se puede definir como aquella que logra un consenso entre los tres pilares de la sostenibilidad (económico, medio ambiental y social) a lo largo de toda su vida. Waas et al. [4] indica que la sostenibilidad debe considerarse como una estrategia de toma de decisiones, por lo que para la obtención de un indicador de sostenibilidad hay que aplicar un proceso de toma de decisión multi-criterio sobre unos criterios previamente definidos. Esto implica conocer los diferentes procesos de toma de decisión multi-criterio y los criterios que mejor representan cada uno de los tres pilares básicos de la sostenibilidad en las estructuras.

De los tres pilares sobre los que se fundamenta la sostenibilidad, el pilar medio ambiental es el que mayor incremento de importancia está consiguiendo en la actualidad. Es un hecho que actualmente estamos frente de un problema medio ambiental, y que la influencia humana ha sido una causa vital en este problema. Por esta razón, la conciencia social sobre el medio ambiente se ha incrementado. El *Fifth*

*Assessment Report* de *The Intergovernmental Panel on Climate Change* [5] muestra que desde 1950, las emisiones de gas de efecto invernadero se han incrementado. Este incremento de concentración de gas de efecto invernadero en la atmosfera ha provocado cambios en el ciclo medio ambiental, siendo el más conocido el incremento de la temperatura media de la tierra. El *Fifth Assessment Report* además de aportar datos sobre el incremento de gas de efecto invernadero en el pasado, realiza una estimación futura para el siglo XXI. En esta estimación propone diferentes escenarios en función de la política medio ambiental que se va realizar en el futuro: hay una primera tendencia donde no se realiza ningún cambio para la reducción de las emisiones (RCP 8.5), dos tendencias intermedias donde se realiza algún cambio (RC 6 y RC 4.5) y una tendencia donde se realizan cambios severos para reducir las emisiones (RC 2.6). De estos cuatro escenarios, solo el RC 2.6 consigue una reducción de las emisiones de gas de efecto invernadero a lo largo del siglo XXI.

Además, el sector de la construcción es responsable de una gran parte de estos gases de efecto invernadero [6,7]. Los materiales más usados en las estructuras son el acero, la madera y sobretodo el hormigón. El acero tiene la ventaja de que es un material reciclable y la madera renovable. A pesar de que estos dos materiales tienen sus propios impactos medio ambientales, el hormigón es el material que mayor impacto tiene en la emisión de los gases de efecto invernadero, con la desventaja de que no es ni reciclable ni renovable. La producción de hormigón actual provoca más de un 5% de los gases de efecto invernadero antropogénicos por año, siendo la mayor parte atribuidos a la producción de cemento donde 1 tonelada de producción de cemento equivale a una media de 0.87 toneladas de emisión de CO<sub>2</sub> [7]. Algunos autores [8] indican que la producción anual de 3 Gtoneladas de cemento puede crecer hasta alcanzar los 5.5 Gtoneladas en el 2050. Todo esto implica que la evaluación ambiental en el sector de la construcción sea esencial. Además, a pesar de la importancia de las emisiones de los gases de efecto invernadero, hay otros impactos medio ambientales que hay que considerar para lograr una completa evaluación medio ambiental.

A pesar de la tendencia creciente en la importancia medio ambiental, no hay que dejar de lado la sostenibilidad social. Para poder evaluar y mejorar el pilar social de la sostenibilidad es necesario conocer que se entiende por impacto social. Por un lado, Polese y Stren [9] define la sostenibilidad social como el estado logrado a partir del desarrollo compatible con la evolución armónica de la sociedad civil, fomentando un



entorno propicio para la convivencia de diversos grupos culturales y sociales, al mismo tiempo que motiva a la integración social mejorando la calidad de vida para todos los segmentos de la población. Por otro lado, McKenzie [10] sostiene que la sostenibilidad social se produce cuando los procesos, sistemas, estructuras y relaciones formales e informales apoyan activamente la capacidad de las generaciones actuales y futuras de crear comunidades saludables y habitables. Las comunidades socialmente sostenibles son equitativas, diversas, conectadas y democráticas. Además, diferentes autores han formulado una serie de principios sociales que se deben tener en cuenta para lograr una estructura sostenible. Así pues, el aseguramiento de las necesidades básicas, los diseños que recogen la identidad y diversidad cultural de las ciudades, la equidad inter e intra-generacional y la seguridad laboral, salud humana y adecuada capacitación laboral son las directrices a seguir para lograr una buena sostenibilidad social [11–13].

Ambos pilares hay que considerarlos sin olvidar, por supuesto, el impacto económico de la estructura para lograr una valoración sostenible de la estructura. Todo esto convierte la sostenibilidad en una ciencia multidisciplinar que engloba diferentes enfoques interconectados y habitualmente con metas opuestas bajo un entorno local, nacional o internacional. Por esta razón, es necesaria la comprensión del proceso de toma de decisiones multi-criterio para la correcta resolución de problemas relacionados con la sostenibilidad. Al no existir un único método de toma de decisiones y un grupo de criterios fijos que sirvan para evaluar la sostenibilidad de una estructura, el mayor problema consiste en saber que métodos de toma de decisiones es el adecuados para cada caso y que criterios son aquellos que mejor pueden definir cada uno de los tres primeros básicos de la sostenibilidad.

De todas las estructuras del sector de la construcción, posiblemente los puentes sean las estructuras más representativas debido a su importancia en la sociedad. Los puentes permiten la unión entre diferentes núcleos de interés superando obstáculos y reduciendo de esta forma las distancias entre diferentes puntos del territorio. Además, en muchas ocasiones un puente puede ser algo más que una estructura, pudiéndose convertir en símbolo de una ciudad o región.

En este trabajo se va a realizar un estudio de la sostenibilidad de los puentes. Para ello, se va a estudiar el proceso de toma de decisiones multi-criterio y se va a realizar una descripción de los métodos de toma de decisión multi-atributo más usados de forma que

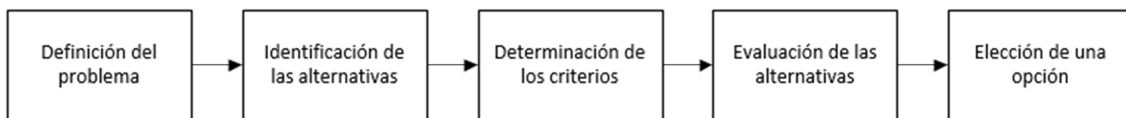
se pueda entender en qué circunstancias es más adecuado el uso de un u otro método. A continuación se va a realizar una revisión bibliográfica para determinar los métodos de decisión multi-atributo y criterios más utilizados. Posteriormente, se va a realizar una aplicación práctica de todos los métodos de toma de decisión multi-atributo, en la que se realizará una valoración de la sostenibilidad de tres puentes diferentes. Para finalizar, se obtendrán las conclusiones más importantes del trabajo descrito anteriormente.

## CAPÍTULO II: LA TOMA DE DECISIÓN MULTI-CRITERIO

### 2.1. Introducción a la toma de decisiones

La toma de decisiones aparece de forma frecuente en el día a día de todos nosotros, pudiendo ser debido a situaciones de menor importancia como acudir a una cena o no, a qué hora poner el despertador o que camino recorrer para ir de un punto a otro; o situaciones de mayor importancia como decidir en qué casa se quiere vivir. Al igual que nosotros como unidad debemos tomar decisiones, empresas o instituciones se enfrentan de forma similar a este tipo de problema, con la diferencia que una decisión de estas entidades afecta de forma significativa a dicha entidad e incluso a la sociedad. Es por esto, que la toma de decisiones se ha convertido en un proceso de gran importancia al que hay que prestar atención cuando se va a realizar la elección de una solución o alternativa.

La mayor parte de las decisiones que un individuo toma en el día a día se realiza por intuición. En el momento en el que se presenta un problema de mayor importancia y se quiere convertir la toma de decisiones en un problema racional aparece el proceso de toma de decisiones, el cual está comprendido por 5 fases: (1) definición del problema, (2) identificación de las alternativas, (3) determinación de los criterios, (4) evaluación de las alternativas, y (5) elección de una opción.



**Figura 2.1. Proceso toma de decisiones**

Cuando el problema de toma de decisión depende de únicamente un criterio (mono-criterio), la solución óptima es aquella que optimiza el criterio. Este tipo de problema ofrece una visión reducida de la realidad, ya que normalmente en la solución a un problema influyen diferentes aspectos a tener en cuenta que pueden ser contradictorios y entrar en conflicto. Aquí es donde entran en escena los problemas de decisión que tienen en cuenta dos o más criterios (multi-criterio).

La toma de decisiones multi-criterio es el proceso o acción que se utiliza para resolver un problema con diferentes criterios. Por lo tanto, su objetivo principal es la evaluación

de una serie de soluciones o alternativas  $A_j$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) a un problema basadas en las puntuaciones  $r_{ij}$  en relación a una serie de criterios  $C_i$  ( $j=1,2,\dots,m$ ). La interacción entre los dos conjuntos de elementos se suele expresar como la matriz de toma de decisiones  $M_{mn}$ :

$$M_{mn} = \begin{array}{c|cccc} & A_1 & A_2 & \dots & A_n \\ \hline C_1 & r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ C_2 & r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_m & r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{array}$$

**Figura 2.2. Matriz toma de decisión**

Las características de las puntuaciones  $r_{ij}$  varían dependiendo de si el criterio evaluado es cuantitativo o cualitativo. Los criterios cuantitativos son criterios objetivos que se evalúan numéricamente, pero al tratar de realizar el mismo tipo de evaluación frente a criterios subjetivos, como son los cualitativos, la confusión aflora y se vuelve difícil asignar un valor numérico a un criterio cualitativo. Teniendo presente lo dicho, es más sencillo crear una escala de evaluación mediante términos lingüísticos que posteriormente sean asociados a valores numéricos

Como se ha visto, los criterios a evaluar pueden ser cuantitativos y cualitativos, y además dentro de cada grupo las unidades de medida serán diferentes. Es por esto, que anteriormente a la evaluación de las alternativas se debe normalizar la matriz de toma de decisiones, de forma que las puntuaciones  $r_{ij}$  se conviertan en puntuaciones  $r'_{ij}$  normalizadas. Paralelamente a la normalización de la matriz de toma de decisiones se deben obtener los pesos  $w_i$  de cada criterio  $C_i$  en función de la mayor o menor importancia de estos criterios para la obtención de la meta final. Por lo tanto, la matriz de decisiones previa a la evaluación, se convierte en una matriz donde las puntuaciones  $r_{ij}$  se convierten en puntuaciones normalizadas con pesos asociados  $v_{ij}$ :

$$v_{ij} = w_i \cdot r'_{ij}$$

Los pesos asociados a cada criterio expresan la importancia relativa de cada uno de estos criterios, que sirven para alcanzar la valoración final de cada alternativa. La asignación de los pesos a cada criterio es un punto muy importante en la toma de decisiones, ya que una pequeña variación de los mismos puede provocar que en un

mismo problema de toma de decisiones, la solución final se decante por una u otra alternativa. Existe una gran variedad de métodos de asignación de pesos, que pueden considerarse objetivos o subjetivos.

### 2.1.1. Asignación de pesos objetiva

- Método de la entropía (*Entropi method*): El valor de la entropía  $e_i$  mide la cantidad de información obtenida en la matriz de decisión  $M_{mn}$ .

$$e_i = -k \cdot \sum_{j=1}^m r_{ij} \cdot \ln r_{ij}$$

donde  $k=1/\ln(m)$  es una constante que garantiza que  $e_j$  se encuentre entre 0 y 1. La divergencia  $d_j$  de la media de información contenida en cada criterio se calcula como:

$$d_i = 1 - e_i$$

Cuanto más divergente sean las puntuaciones  $r_{ij}$  de los criterios  $C_i$ , mayor es la importancia del criterio  $C_i$  para el problema de toma de decisión. El peso objetivo para cada criterio se obtiene como:

$$w_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^m d_i}$$

- Medidas de dispersión (*Measures of dispersión*): Este enfoque considera la desviación típica ( $\sigma$ ) para calcular los pesos objetivos, de forma que:

$$D_i = \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r})^2}{n - 1}}$$

donde  $D_i$  es la dispersión de las puntuaciones  $r_{ij}$ , y  $r$  es la media de la muestra. El peso de cada criterio se determina en función del grado de dispersión, lo cual implica que dar mayor importancia a aquellos criterios que hacen que las alternativas varíen más.

$$w_i = \frac{D_i}{\sum_{i=1}^m D_i}$$

### 2.1.2. Asignación de pesos subjetiva

- Asignación directa (*Direct point allocation*): Los pesos son asignados directamente por los decisores, los cuales deben valorar los diferentes criterios dentro de una escala, normalmente repartiendo 100 puntos entre los diferentes criterios, es decir, asignando un porcentaje.
- Método de clasificación (*Ranking method*): Los decisores clasifican los criterios por orden de importancia, y posteriormente se obtienen los pesos relativos en función de la clasificación inicial. La transformación de clasificación a pesos se puede realizar mediante diferentes técnicas.

En el método SMART (*Simple multi-attribute rating technique*) se asigna al criterio peor clasificado un valor de 10 y el resto se evalúa comparándolo con este primero, de forma que sus valores serán iguales o superiores a 10. Finalmente, estas puntuaciones se normalizan para obtener los pesos.

El método SWING weighting parte de un supuesto hipotético donde todos los atributos tienen los peores valores posibles y se le ofrece al decisor la posibilidad de cambiar el valor del criterio que prefiera al mejor valor posible. A este atributo se le asigna una puntuación de 100. Este proceso se repite para los otros criterios, valorándolos con puntuaciones inferiores a 100. Finalmente estas valoraciones se normalizan para obtener los pesos de los atributos.

Los métodos SMARTS (*SMART using swings*) y SMARTER (*SMART exploiting ranks*) son métodos derivados del SMART.

- Comparación por pares (*Pairwise comparisons*): Los pesos son asignados por comparación por pares entre los diferentes criterios. Para ello el decisor debe indicar cuál de los dos criterios comparados es más importante y cuánto más importante es mediante respuestas lingüísticas que están asociados a valores numéricos. Posteriormente se forma una matriz de comparaciones, a partir de la cual se obtienen los pesos de los criterios mediante métodos de estimación como el autovector principal o los mínimos cuadrados logarítmicos.
- Método TRADE-OFFS (*TRADE-OFFS weighting*): Teniendo en cuenta que el conjunto de atributos se puede dividir en el conjunto de valores mejores o más preferidos  $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*)$  y peores o menos preferidos  $(x_{1*}, x_{2*}, \dots, x_{m*})$ , el método TRADE-OFFS se basa en cuestiones de dos tipos:

- ¿Para qué probabilidad ( $p$ ) el decisor queda indiferente entre una lotería en la que se tiene con dicha probabilidad los mejores valores de los atributos y con su probabilidad complementaria los peores valores, y la consecuencia  $(x_{1*}, \dots, x_{(i-1)*}, x_i, x_{(i+1)*}, \dots, x_{m*})$ ?

La utilidad esperada de la lotería es  $p$  y la utilidad de la consecuencia es  $k_i$  igualando las utilidades esperadas se tiene que  $k_i=p$ .

- Seleccionar un nivel del atributo  $X_i$  (por ejemplo,  $x_i$ ) y un nivel del atributo  $X_l$  (por ejemplo,  $x_l$ ) de forma que cualquier valor fijado en el resto de atributos, el decisor queda indiferente entre las consecuencias con  $x_i'$  y  $x_{i*}$  juntos, y otra con  $x_k'$  y  $x_{j*}$ . Las utilidades de estas dos consecuencias se pueden igualar y dan lugar a la ecuación lineal  $k_i u_i(x_i') = k_l u_l(x_l')$ , siendo  $u_i(x_i')$  y  $u_l(x_l')$  las utilidades asociadas a las consecuencias  $x_i'$  y  $x_l'$  en los atributos  $i$ -ésimo y  $l$ -ésimo respectivamente.

Una práctica común para calcular los coeficientes  $k_i$  es, en primer lugar, calcular su ranking, entonces usar cuestiones del primer tipo para evaluar el  $k_i$  más grande y, finalmente, usar cuestiones del segundo tipo para evaluar la magnitud del resto respecto al más grande.

Una vez que se tienen todos los pesos, si su suma es la unidad, se tiene un modelo multi-atributo aditivo en ese nivel o rama de la jerarquía de objetivos. En caso contrario, se sustituyen los  $k_i$  en la ecuación asociada al segundo tipo de cuestiones.

En los niveles intermedios de la jerarquía de objetivos, los pesos describirán cómo el cambio del peor al mejor nivel de todos los atributos por debajo del objetivo en cuestión contribuye a los resultados finales. Por lo tanto, el cálculo de pesos en niveles intermedios de la jerarquía implica comparaciones de grupos de atributos.

- *Princing out method*: En este método se listan todos los atributos del problema con excepción de los que representen costes, junto con sus valores mejores o más preferidos y peores o menos preferidos. A continuación, se le pide al decisor que especifique cuánto estaría la sociedad dispuesta a pagar por cambiar la peor consecuencia por la mejor en cada uno de los atributos.

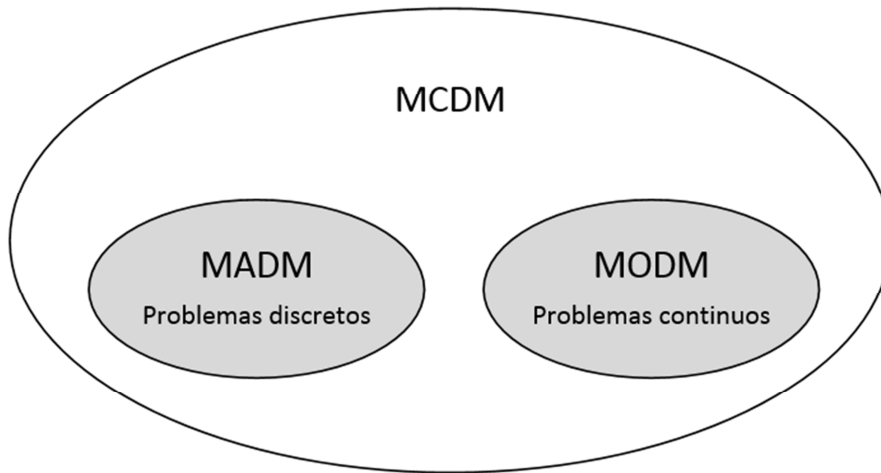
Suponiendo un atributo monetario  $M$ , medido en unidades monetarias  $m$  con valor fijado  $m_0$  y un conjunto de atributos con valores mejores o más preferidos  $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*)$  y peores o menos preferidos  $(x_{1*}, x_{2*}, \dots, x_{n*})$ , se quiere encontrar el valor  $m_0$  de forma que el decisor quede indiferente entre  $(m_0', x_1^*, \dots, x_m^*) \sim (m_0', x_{1*}, \dots, x_{m*})$ .

## 2.2. Clasificación de los métodos de toma de decisión multi-criterio

Inicialmente, el concepto de toma de decisiones multi-criterio (MCDM) se utilizaba para describir un conjunto de métodos que servían como herramienta para el proceso de toma de decisiones [14]. Pero, el desarrollo de este tipo de técnicas de forma exponencial generó la creación de nuevas subdivisiones para la clasificación de estos métodos.

Hwang and Yoon [1] propuso una primera división de los métodos de toma de decisión multi-criterio entre métodos de toma de decisión multi-atributo (*Multi-attribute decision-making*, MADM) y métodos de toma de decisión multi-objetivo (*Multi-objective decision-making*, MODM). Los métodos MADM se utilizan para resolver problemas discretos. Las diferentes alternativas están predeterminadas y la participación de los expertos es *a priori* valorando cada criterio e indicando la importancia de cada uno de ellos. Los métodos MODM se utilizan para resolver problemas continuos. Las diferentes alternativas no están predeterminadas, se caracteriza por obtener un grupo de soluciones igualmente buenas bajo una serie de restricciones, y la participación de los expertos es *a posteriori*.





*Figura 2.3. Clasificación general de los MCDM*

Los diferentes métodos MADM se pueden clasificar de diferentes formas, como por ejemplo en función del tipo de información inicial (determinista, estocástica o incierta), o dependiendo de los grupos de decisores (un único grupo o varios grupos), aunque la clasificación más usual es dependiendo de las características en comunes de estos métodos propuesta por Hajkowicz and Collins [15] y De Brito y Evers [16]. Estos métodos se pueden agrupar en: (1) métodos de puntuación directa, (2) métodos basados en la distancia, (3) métodos de comparación por pares, (4) métodos de superación, y (5) métodos basados en funciones de utilidad o valor.

- Los **métodos de puntuación directa** (*scoring methods*) son los métodos de MADM más simples. Se basan en evaluar las diferentes alternativas mediante operaciones aritméticas básicas. Los métodos SAW y COPRAS evalúan las alternativas realizando el sumatorio del valor normalizado de cada criterio por su peso correspondiente. SAW es el método más antiguo y permite realizar este proceso únicamente cuando se desea maximizar un criterio. COPRAS es una evolución de SAW y puede ser aplicado tanto para criterios que se desean maximizar como minimizar.
- Los **métodos basados en la distancia** (*distance-based methods*) tienen como principio básico calcular la distancia entre cada alternativa y un punto concreto. Dentro de los métodos basados en la distancia existen dos filosofías en función de cual es este punto. El método GP, cuyo objetivo es obtener la alternativa que satisfaga un conjunto de metas, es decir, el punto no es el óptimo, sino aquel que cumpla una serie de condiciones. El método CP, cuyo objetivo es obtener

aquella alternativa más próxima de la hipotética mejor solución, es decir, el punto es el óptimo. Los métodos VIKOR y TOPSIS se basan en el método CP. La diferencia entre ambos de fundamenta en la manera de normalizar los criterios, además de que el método VIKOR solo tiene en cuenta la distancia a la solución ideal y el método TOPSIS tiene en cuenta tanto la distancia tanto a la solución ideal como a la solución no ideal.

- Los **métodos de comparación por pares** (*pairwise comparison methods*) son muy útiles para obtener los pesos de los diferentes criterios y evaluar criterios subjetivos comparando las alternativas entre sí. El método AHP fue el primero en ser desarrollado y uno de los métodos más usados en los problemas de toma decisiones. El método ANP es una evolución del método AHP que permite resolver el problema que tiene el AHP, el cual supone que los criterios son independientes. El método MACBETH es una alternativa muy similar al AHP en cuanto a forma, pero con algunas diferencias en cuanto a conceptos.
- Los **métodos de superación** (*outranking methods*) consisten en establecer una relación de preferencia entre un conjunto de soluciones donde cada una de ellas muestra un grado de dominación sobre las otras respecto a un criterio. Estos métodos son capaces de tratar con información incompleta y difusa, y permite obtener una clasificación de las alternativas en función de la relación de preferencia existente entre ellas. Dentro de este grupo se encuentran los métodos de PROMETHEE y ELECTRE.
- Los **métodos basados en funciones de utilidad o valor** (*utility/value methods*) como MAUT, y de valor como MAVT, son métodos que definen funciones que determinan el grado de satisfacción de una alternativa respecto a un criterio. Estas funciones convierten las valoraciones que definen el comportamiento de las alternativas en relación a un criterio en un grado de satisfacción. La expresión de dichas funciones puede tener diferentes formas en función de la relación entre la valoración y el grado de satisfacción. El método MIVES es un derivado de los anteriores en el cual se proporciona las ecuaciones que definen las diferentes funciones de satisfacción.

**Tabla 2.1. Clasificación de los métodos MADM**

<b>Grupo MADM</b>	<b>Método MADM</b>	
Métodos de puntuación directa	Simple additive weighting (SAW)	[17]
	Complex proportional assessment (COPRAS)	[17]
Métodos basados en la distancia	Goal programming (GP)	[18]
	Compromise programming (CP)	[19]
	Technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)	[20]
	Multicriteria optimization and compromise solution (VIKOR)	[20]
Métodos de comparación por pares	Analytic hierarchy process (AHP)	[21]
	Analytic network process (ANP)	[21]
	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH)	[22]
Métodos de superación	Preference ranking organization method for enrichment of evaluations (PROMETHEE)	[23]
	Elimination and choice expressing reality (ELECTRE)	[24]
Métodos basados en funciones de utilidad o valor	Multi-attribute utility theory (MAUT)	[25]
	Multi-attribute value theory (MAVT)	[25]
	Modelo integrado de valor para evaluaciones sostenibles (MIVES)	[26]

No obstante, en la vida real, las valoraciones o comparaciones no están sujetos a un único número discreto, sino que hay incertidumbre. Es por esto, que muchos de estos métodos se pueden apoyar sobre unas herramientas que tenga en cuenta la incerteza en del mundo real como la *teoría fuzzy*, el *método de Montecarlo* o los *números Grey*. Además, cuando la toma de decisiones no es individual suelen existir diferentes grupos con diferentes intereses, con lo que es necesario llegar a un consenso entre ellos. El método *Delphi* es una herramienta útil para cuando hay diferentes decisores.

### 2.2.1. Métodos de puntuación directa (*scoring methods*)

Los métodos de puntuación directa son aquellos que se basan en la clasificación de las alternativas aplicando operaciones aritméticas. Estos métodos son los más simples, y dentro se pueden incluir los métodos SAW y COPRAS. El principio básico consiste en, tras asignar un peso relativo a cada criterio y valorar cada alternativa respecto a cada criterio, obtener una puntuación de cada alternativa. Esto permite clasificar las alternativas y obtener la alternativa más adecuada.

#### SAW

El método SAW (*Simple additive weighting*), para el cual también se pueden utilizar otros términos como *weighted linear combination*, *weighted summation* or *weighted linear average*, es el método más antiguo y posiblemente el método más utilizado en problemas de toma de decisiones multicriterio [1]. Este método consiste en obtener la suma para cada alternativa ( $S_j$ ) del producto de cada criterio normalizado ( $r_{ij}'$ ) y su peso relativo ( $w_i$ ).

$$S_j = \sum_{i=1}^m w_i \cdot r_{ij}' = \sum_{i=1}^m v_{ij}$$

Una vez obtenida la suma para todas las alternativas se comparan y se ordenan de forma ascendente. Aquella alternativa cuyo valor sea el mayor será la mejor. La asignación del peso relativo de cada criterio es asignado directamente por expertos. En muchos artículos [1,27], la normalización de un criterio de una alternativa ( $r_{ij}'$ ) se realiza mediante el cociente del valor del criterio de dicha alternativa ( $r_{ij}$ ) entre el valor máximo de ese criterio para todas las alternativas ( $\max_j r_{ij}$ ):

$$r_{ij}' = \frac{r_{ij}}{\max_j r_{ij}}$$

En un primer momento SAW fue pensado solo para maximizar criterios que sean positivos, por lo tanto tiene dos limitaciones que deben ser tenidas en cuenta. Por un lado, para normalizar los criterios que se deban minimizar, se realiza una conversión de esta minimización por una maximización, de forma que la normalización de un criterio de una alternativa ( $r_{ij}'$ ) se realiza mediante el cociente del valor mínimo de ese criterio para todas las alternativas ( $\min_j r_{ij}$ ) entre el valor del criterio de dicha alternativa ( $r_{ij}$ ):

$$r_{ij}' = \frac{\min_j r_{ij}}{r_{ij}}$$

Por otro lado, para normalizar los criterios cuyos valores sean negativos, se realiza una conversión a valores positivos. Para ello, se proponen varias fórmulas, entre las cuales destaca la propuesta por Podvezko en 2007 [17], donde la normalización de un criterio para una alternativa ( $r_{ij}$ ) se obtiene como la suma del el valor del criterio de dicha alternativa ( $r_{ij}$ ), del valor mínimo de ese criterio para todas las alternativas ( $\min_j r_{ij}$ ), y la unidad (1):

$$r_{ij}' = r_{ij} + |\min_j r_{ij}| + 1$$

### **COPRAS**

El método COPRAS (*Complex Proportional Assessment*) fue propuesto por Zavadskas y Kaklauskas en 1996 [27], y es una evolución del método SAW que permite superar alguna de sus limitaciones. Al igual que el método SAW la asignación de los pesos relativos se realiza directamente por expertos, pero en este caso se permite evaluar tanto los criterios que se deban maximizar (expresado con el signo +) como los que se deban minimizar (expresado con el signo -). La evaluación de los criterios a maximizar y minimizar se realiza por separado, siendo la suma para cada alternativa ( $Z_j$ ) el valor obtenido en la siguiente expresión:

$$Z_j = S_{+j} + \frac{S_{-min} \cdot \sum_{j=1}^n S_{-j}}{S_{-j} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{S_{-min}}{S_{-j}}}$$

El primer término de la expresión es la componente de los criterios a maximizar, la cual se obtiene al igual que el método SAW, por lo tanto si no hay criterios a minimizar, los métodos SAW y COPRAS resultan ser el mismo.

$$Z_+ = S_{+j} = \sum_{i=1}^m w_{+i} \cdot r_{+ij}'$$

El segundo término de la expresión es la componente de los criterios a minimizar.

$$Z_- = \frac{S_{-min} \cdot \sum_{j=1}^n S_{-j}}{S_{-j} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{S_{-min}}{S_{-j}}}$$

donde  $S_{-j}$ , es la misma expresión que  $S_{+j}$  pero aplicada a los criterios a minimizar, siendo  $S_{-min}$ , el mínimo valor de  $S_{-j}$  de todas las alternativas. Al ser  $S_{-min}$  una constante, la expresión se puede simplificar al quedar cancelada por estar en el numerador y denominador:

$$Z_{-} = \frac{\sum_{j=1}^n S_{-j}}{S_{-j} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{S_{-j}}}$$

Lo que consigue el método COPRAS con estas expresiones, es obtener un valor para cada alternativa ( $Z_j$ ) que sea directamente proporcional a la componente positiva o de maximización ( $Z_{+}$ ) e inversamente proporcional a la componente negativa o de minimización ( $Z_{-}$ ). Podvezko realiza una comparación entre ambos métodos [17].

### 2.2.2. Métodos de distancia (*distance-based methods*)

En este grupo de métodos, se encuentran aquellos que utilizan la distancia hasta una solución ideal positiva (SIP), solución ideal negativo (SIN), o ambos, para determinar la mejor solución o alternativa. Dentro de este grupo se pueden agrupar el CP, TOPSIS y VIKOR. En todos estos métodos se obtiene el SIP como aquella solución que tiene el valor óptimo para cada criterio del conjunto de soluciones, siendo el SIN el opuesto. Por lo tanto, si en un problema de toma de decisiones, existen dos criterios como el coste y la durabilidad, el SIP será aquella solución que minimice el coste y maximice la durabilidad, y el SIN aquel que maximice el coste y minimice la durabilidad. Antes de determinar la distancia de las diferentes soluciones hay que asignar los pesos a los diferentes criterios. La diferencia entre unos métodos u otros, es fundamentalmente la forma de normalizar dicha distancia. Dependiendo del método se utiliza una métrica, otra, o varias.

#### **CP**

El método CP (*Compromise Programming*), trata de encontrar la solución de compromiso más cercana al punto ideal u óptimo. Las bases del método CP se establecen por Yu en 1973 [28] y Zeleny en 1982 [29], y posteriormente se han utilizado como base para el desarrollo de otros métodos como TOPSIS o VIKOR, que son dos de los métodos más representativos de este grupo.

Para aplicar el método CP, primero hay que definir la frontera eficiente, que es aquella en la que ningún criterio puede ser mejorado. De esta frontera se obtiene el punto ideal, formado por el mejor valor de cada criterio. Finalmente, se resuelve minimizando la distancia de cada alternativa hasta el punto ideal u óptimo. Esta distancia se obtiene con la siguiente expresión:

$$L_j = \min \left[ \sum_{i=1}^m w_i^p \left| \frac{r_{*i} - r_{ij}}{k_i} \right|^p \right]^{\frac{1}{p}}$$

donde  $p$  es la métrica de normalización ( $p=1,2,\dots, \infty$ ),  $m$  el número total de criterios,  $w_i$  representan los peso del criterio  $i$ ,  $k_i$  representa las constantes de normalización para cada criterio (diferencia entre el mejor valor de un criterio ( $r_{*i}$ ) y el peor ( $r_{-i}$ ), siendo  $r_{ij}$  la puntuación del criterio  $i$  para la alternativa  $j$ . Se denomina conjunto de compromiso al conjunto de soluciones óptimas de todos los problemas de CP, aunque habitualmente solo se utiliza  $p=1,2$  y  $\infty$ .

### **TOPSIS**

El *Technique for order preference by similarity to an ideal solution* (TOPSIS) es un método de toma de decisiones presentado por Chen y Hwang en 1992 [30], aunque sus raíces vienen del libro Hwang and Yoon de 1981 [1]. El principio básico de este método es elegir la alternativa que tiene la menor distancia al SIP y la mayor distancia al SIN. La distancia relativa se calcula utilizando la métrica  $L_2$ .

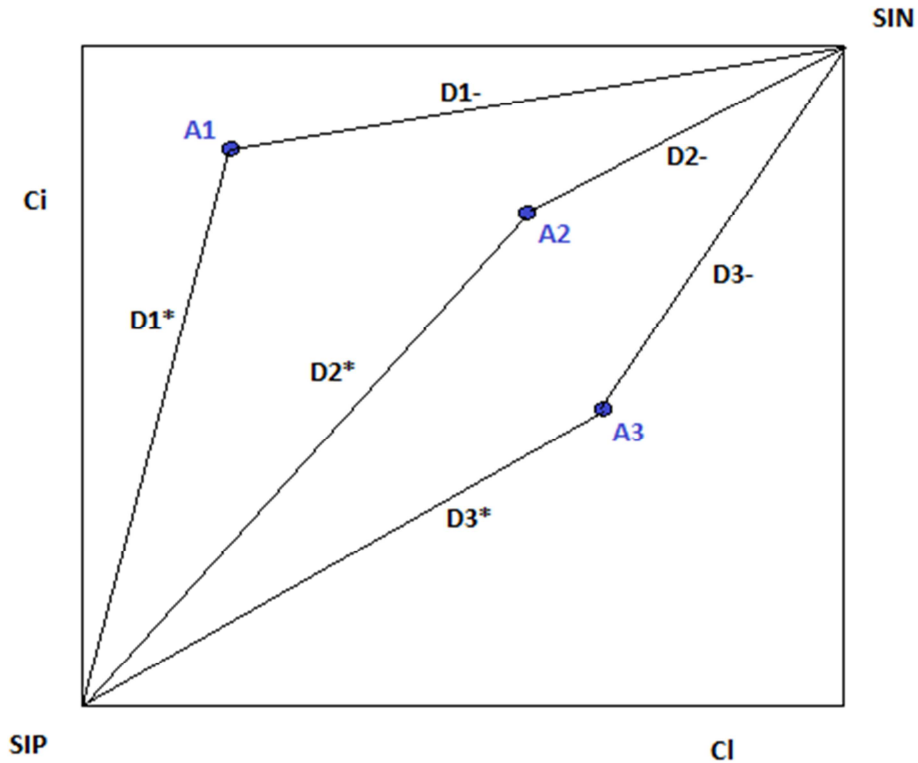
Para aplicar TOPSIS primero hay que normalizar el valor de los criterios de cada alternativa ( $r'_{ij}$ ):

$$r'_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n r_{ij}^2}}$$

Posteriormente se multiplica cada uno de estos valores por el peso relativo correspondiente ( $w_i$ ) de forma que se obtiene el valor normalizado multiplicado por el peso relativo ( $v_{ij}$ ). Con estos valores se determina la SIP ( $A^*$ ) y la SIN ( $A^-$ ) y se calcula la distancia de cada alternativa hasta el SIP y SIN, de forma que:

$$D_j^* = \sqrt{\sum_{i=1}^m (v_{ij} - v_i^*)^2}$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (v_{ij} - v_i^-)^2}$$



**Figura 2.4. Distancias TOPSIS**

Finalmente se calcula la distancia relativa al ideal de cada alternativa  $j$  y se clasifican.

$$C_j^* = D_j^- / (D_j^* + D_j^-)$$

### **VIKOR**

El método *multi-criteria optimization and compromise Solution (VIKOR en Serbio)* fue desarrollado por Opricovic en 1998 [31] para la optimización multi-criterio e sistemas complejos. El método VIKOR se basa en determinar la alternativa más cercana al SIP. Para ello, utiliza una medida basada en una unión de métricas  $L_1$  y  $L_\infty$ . La solución obtenida por  $L_1$  es para tener en cuenta la utilidad de grupo de los criterios, y la solución

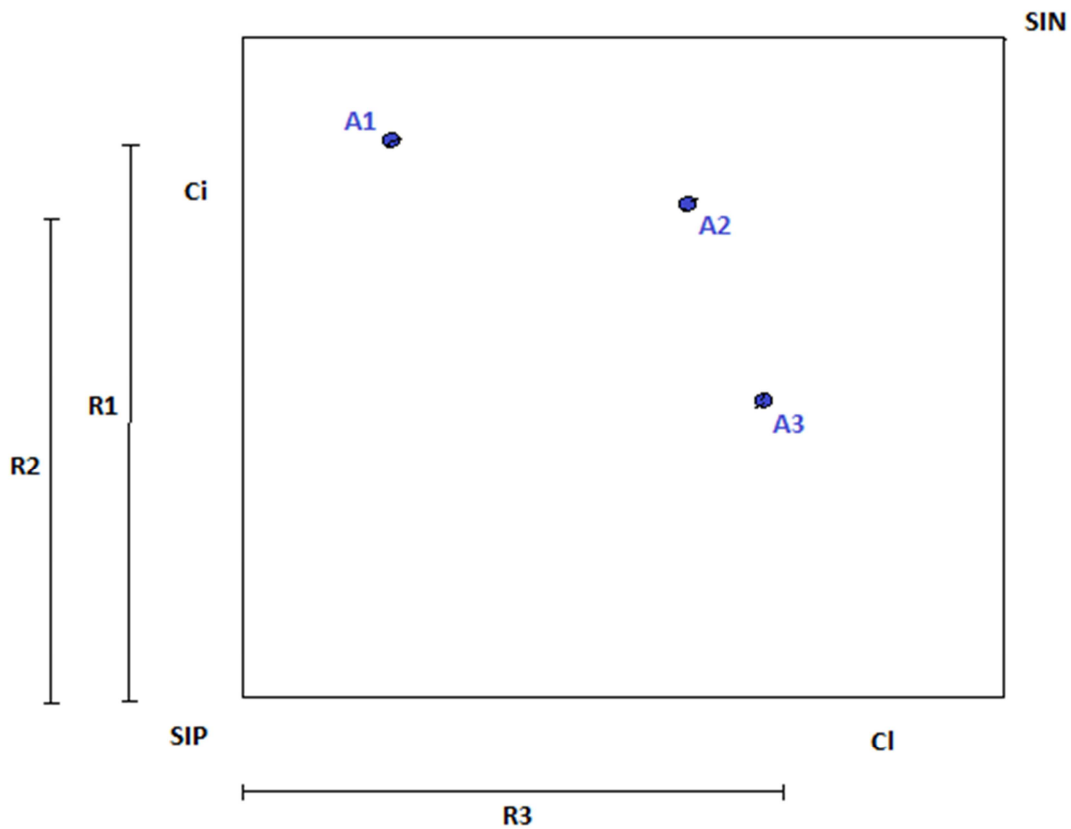


obtenida por  $L_\infty$  es para tener en cuenta el mínimo individual de cada criterio La solución de compromiso es una solución factible que está cerca de la solución ideal.

Para aplicar VIKOR hay que determinar la SIP ( $A^*$ ) y la SIN ( $A^-$ ). Posteriormente asignar un peso relativo a cada criterio ( $w_i$ ) y determinar las distancias  $L_1$  y  $L_\infty$  para cada alternativa como (S y L):

$$S_j = \sum_{i=1}^m w_i(r_i^* - r_{ij}) / (r_i^* - r_i^-)$$

$$R_j = \max[w_i(r_i^* - r_{ij}) / (r_i^* - r_i^-)]$$



**Figura 2.5. Distancias VIKOR**

por lo que se puede deducir, que la normalización de cada criterio se realiza mediante la parte final de ambas expresiones:

$$r_{ij}' = (r_i^* - r_{ij}) / (r_i^* - r_i^-)$$

Finalmente determinar las distancias agregadas de cada alternativa  $j$  y se clasifican.

$$Q_j = v \cdot \frac{(S_j - S^*)}{S^- - S^*} + (1 - v) \cdot \frac{(R_j - R^*)}{R^- - R^*}$$

donde  $S^* = \min S_j$ ,  $S^- = \max S_j$ ,  $R^* = \min R_j$ ,  $R^- = \max R_j$ , y  $v$  es un factor estratégico que determina la importancia de ambas métricas.

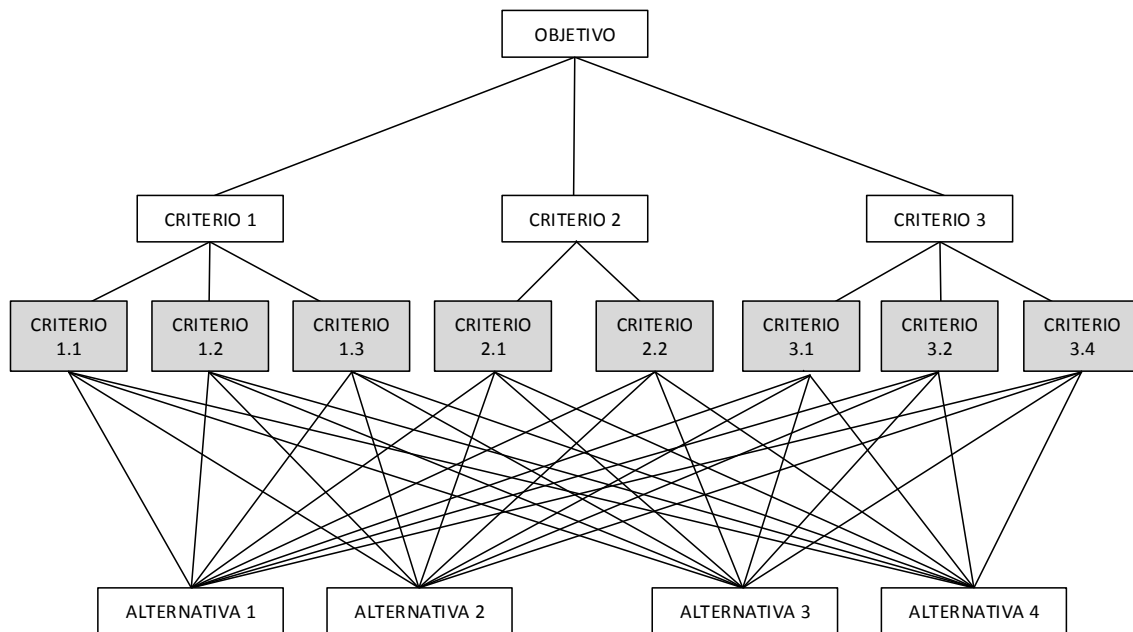
Estos dos últimos métodos, TOPSIS y VIKOR, son métodos con una misma raíz (CP) y son dos de los métodos de toma de decisiones más representativos de esta familia. Por lo que a pesar de tener sus similitudes, presentan diferencias de agregación y normalización. Estos dos métodos utilizan formas diferentes de agregación de la métrica: la métrica de VIKOR se basa en la unión de las métricas  $L_1$  y  $L_{inf}$ , en cambio la métrica de TOPSIS se basa en la métrica  $L_2$ . Además, utilizan diferentes tipos de normalización para eliminar las unidades de los criterios: el método VIKOR usa una normalización lineal, en cambio TOPSIS utiliza una normalización vectorial. Opricovic y Tzeng realizan una comparativa entre ambos métodos [20].

### 2.2.3. Métodos de comparación directa por pares (*pairwise comparison methods*)

Dentro de los métodos de comparación directa por pares se clasifican el AHP, ANP y MACBETH. Todos estos se fundamentan en que tanto la obtención de los pesos de los criterios o subcriterios, como la valoración de las diferentes alternativas respecto a un criterio, se realiza mediante una comparación una a una generando una matriz de comparación. Este tipo de métodos resultan especialmente útiles para la obtención de opiniones subjetivas en valores numéricos.

#### **AHP**

El método *analytical hierarchy process* (AHP) fue el primero en ser desarrollado por Thomas L. Saaty en la década de 1970 [32], que unido a su sencillez lo ha convertido en un método de toma de decisiones ampliamente utilizado y muy popular. Para ello, un problema de toma de decisiones debe ser estructurado de forma jerárquica donde el objetivo final se encuentra en el nivel más elevado, y los criterios y subcriterios en los niveles inferiores como se muestra en la figura 2.6. Es muy importante la elección correcta de los criterios y sub-criterios, los cuales tienen que estar muy bien definidos, ser relevantes y mutuamente excluyentes.



**Figura 2.6. Estructura jerárquica AHP**

A la hora de definir la estructura jerárquica hay que tener presente que el número de criterios no debe ser excesivo. Por ejemplo, según Bahurmoz [33], el número de criterios y sub-criterios en cada nivel no debe ser mayor de 7, para evitar un excesivas comparaciones a pares, y Miller [34] dice que el número de criterios asimilables por las personas es de  $7 \pm 2$ .

Tras definir la estructura jerárquica, se realiza la comparación de los criterios de cada grupo del mismo nivel jerárquico, y la comparación directa por pares de las alternativas respecto a los criterios del nivel inferior. Este proceso se repetirá sistemáticamente en dirección ascendente hasta evaluar el objetivo final. Estas valoraciones se realizan mediante la escala fundamental propuesta por Saaty [35] de la tabla 2.2. A partir de esta aparecen muchas otras escalas.

**Tabla 2.2. Escala de Saaty**

Intensidad	Definición	Explicación
1	Importancia igual	Ambos elementos contribuyen por igual
3	Importancia moderada	Un elemento es moderadamente favorecido sobre el otro
5	Importancia fuerte	Un elemento es fuertemente favorecido sobre el otro
7	Importancia muy fuerte	Un elemento es muy fuertemente favorecido sobre el otro
9	Importancia extrema	Un elemento es extremadamente favorecido sobre el otro
2,4,6,8	Valores intermedios	Usado como valores de consenso entre dos juicios

Tanto en la comparación de las diferentes alternativas respecto al criterio del nivel inferior de la estructura jerárquica, como la comparación de los diferentes criterios de un mismo nivel jerárquico resultan una matriz denominada matriz de decisión. Cada vez que se genera una matriz, la consistencia de esta es evaluada. Esto se realiza para detectar contradicciones en la valoración de los decisores. Dicha consistencia se obtiene mediante el índice de consistencia (*Consistency Index*, CI) donde  $\lambda_{max}$  es el máximo autovalor y n es la dimensión de la matriz de decisión. Un índice de consistencia igual a 0 significa que la consistencia es completa. Una vez obtenido el índice de consistencia, se obtiene la proporción de consistencia (*Consistency Ratio*, CR) siendo aceptado siempre que no supere el 10%.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Una vez verificada la consistencia, se obtienen los pesos, que representan la importancia relativa de cada criterio o las prioridades de las diferentes alternativas respecto a un determinado criterio. Para ello, el AHP original utiliza el método de los autovalores, donde hay que resolver la siguiente ecuación:

$$A \cdot w = \lambda_{max} \cdot w$$

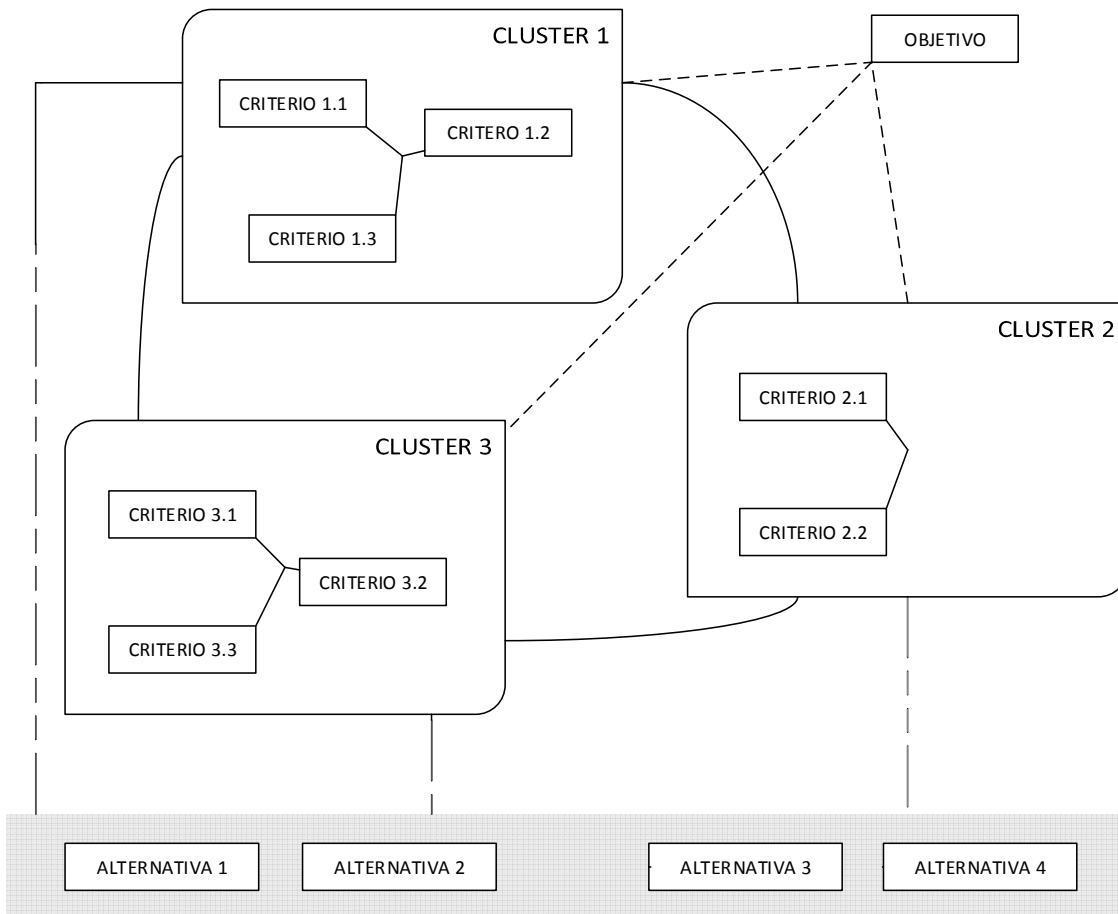
donde A representa la matriz de comparación, w el autovector o vector de preferencia, y  $\lambda_{max}$  el autovalor.

### **ANP**

Unos años después, el propio Saaty desarrollo un método que solventaba algunos de los problemas que tiene el AHP como la necesaria independencia entre los criterios de un mismo nivel jerárquico denominado *analytical network process* ANP. En 1996, Saaty definió AHP como un caso particular del ANP y presento una comparación entre ambos métodos donde realizaba una estimación del mercado de comida rápida [36]. Según Saaty y Ozfrmit [37] muchos problemas de toma decisión no pueden ser estructurados de forma jerárquica, ya que hay una interacción de dependencia entre elementos de diferentes niveles.

A raíz del desarrollo del método ANP se han realizado numerosas comparaciones entre ambos métodos[21,38,39]. A pesar de que el método ANP se aproxima mejor a la realidad, se usa menos que el AHP debido a la simplicidad operativa de este. Aún así, existen numerosos artículos que aplican el método ANP para solventar el problema de toma de decisiones.

A diferencia del AHP, el método ANP organiza el problema de toma de decisiones como una red, donde agrupa los criterios dentro de lo que se denomina *clusters*. Posteriormente, se crea una gran matriz denominada matriz de denominación interfactorial, la cual nos indica la influencia del criterio o alternativa de una fila sobre el criterio o alternativa de una columna colocando 1 cuando existe influencia y 0 cuando no la hay (no tiene porqué ser una matriz simétrica ya que un criterio puede tener influencia sobre otro, pero no al revés).



**Figura 2.7. Estructura en red de ANP**

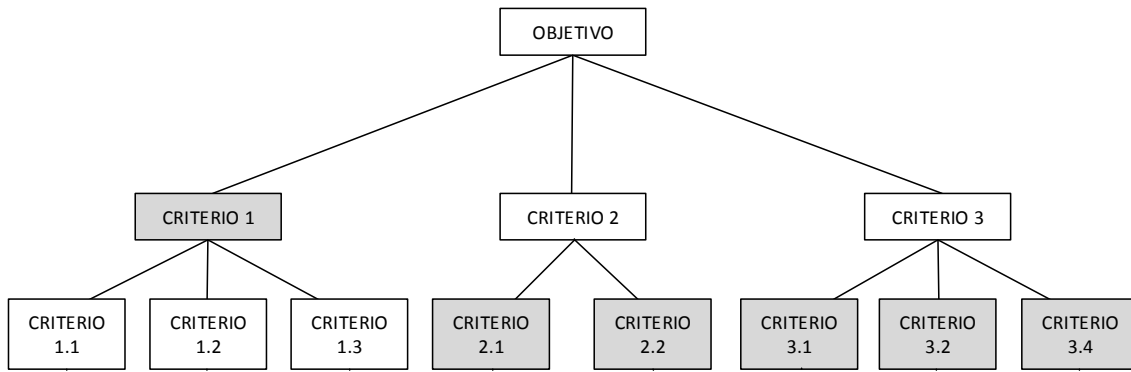
Una vez se tiene la matriz de denominación interfactorial, se realiza el cálculo de la supermatriz original, la cual se realiza siguiendo el procedimiento del método AHP para los criterios de un mismo *cluster*, de forma que se obtiene los pesos relativos de cada criterio dentro de cada bloque. Posteriormente se realiza lo mismo para los *clusters*, para obtener el peso relativo total multiplicando el peso relativo de los criterios por el peso relativo de los *clusters*, obteniendo la supermatriz ponderada.

Finalmente, se obtiene la supermatriz límite elevando a potencias sucesivas la supermatriz ponderada hasta que las columnas de estas sean todas iguales. Las columnas de esta matriz son todas iguales y representan la influencia de los diferentes criterios en el problema planteado. Los resultados finales se obtienen operando alternativas y criterios por separado, de forma que al normalizarlos se obtienen el orden de prioridad.

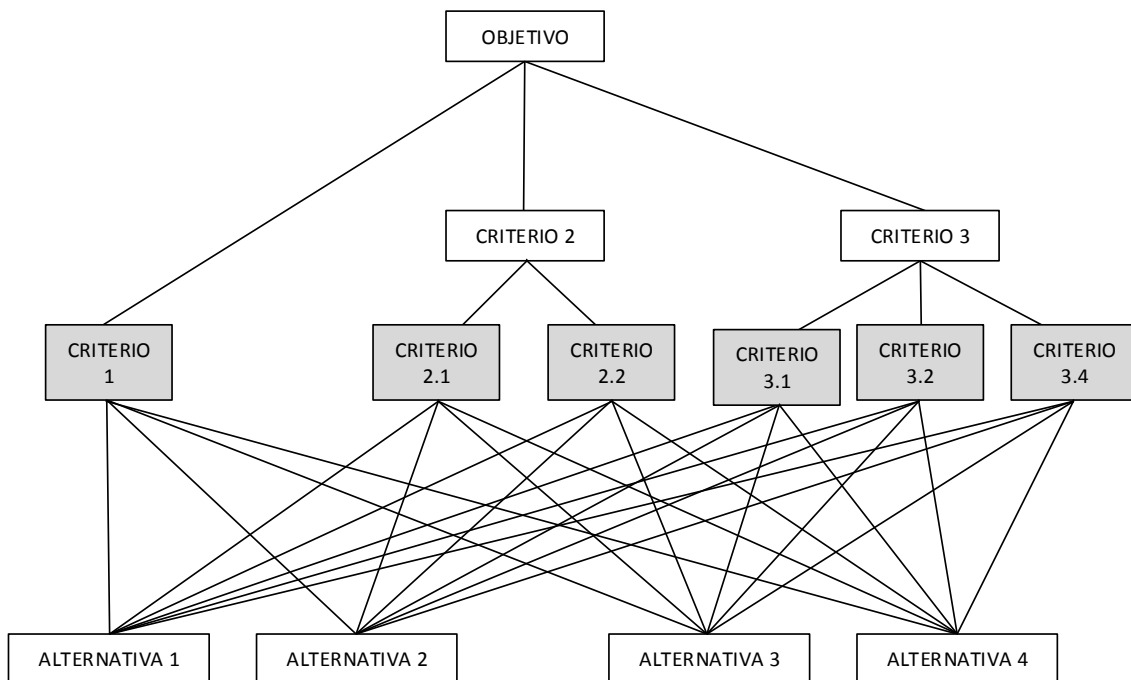
### **MACBETH**

Otro de los métodos que se basa en la comparación directa por pares es el *measuring attractiveness by a categorical based evaluation technique* (MACBETH). Este es un método creado por Bana e Costa y Vansnick en 1994 [40] como alternativa al tradicional AHP. Es por esto, que a pesar de tener la misma estructura, tiene una serie de diferencias que hay que comentar.

Al igual que mediante AHP, el planteamiento del problema en MACBETH se realiza mediante una estructura jerárquica, donde el objetivo final se encuentra en el nivel más elevado, y los criterios y subcriterios en los niveles inferiores. La diferencia se encuentra en que a la hora de realizar la valoración del objetivo final, en MACBETH solo existe un nivel de valoración, es decir, la estructura jerárquica de MACBETH mostrada en la figura 2.8 pasa a la estructura llana mostrada en la figura 2.9.



**Figura 2.8. Estructura jerárquica de MACBETH**



**Figura 2.9. Estructura plana de MACBETH**

Otra de las diferencias entre AHP y MACBETH son las categorías semánticas que se utilizan para realizar la comparación directa a pares. Como se ha visto en la tabla 2.2, el método AHP utiliza una escala fundamental donde realiza la comparación de alternativas o criterios según lo importante que uno es respecto a otro. En el caso de MACBETH, utiliza el concepto de “atractividad” de una alternativa o criterio respecto a otro. Así pues, las categorías semánticas utilizadas por MACBETH indican como de atractivo es una opción respecto a otra, siendo las opciones las indicadas en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3. Escala de Bana e Costa**

Definición	Explicación
Muy débil	Un elemento es muy poco atractivo respecto a otro
Débil	Un elemento es poco atractivo respecto a otro
Moderado	Un elemento es moderadamente atractivo respecto a otro
Fuerte	Un elemento es fuertemente atractivo respecto a otro
Muy fuerte	Un elemento es muy fuertemente atractivo respecto a otro
Extrema	Un elemento es extremadamente más atractivo respecto a otro

Además, a diferencia de AHP, en MACBETH, la consistencia de la matriz de comparación es analizada simultáneamente cada vez que se añade una nueva comparación directa. Si se detecta que existe inconsistencia, aparece una advertencia y nos permite modificar la categoría semántica hasta conseguir que la matriz sea consistente. Además, MACBETH no permite que exista ningún tipo de inconsistencia a diferencia de AHP, que permite hasta un 10% debido a la naturaleza inconsistente humana.

Los pesos también se obtienen mediante procedimientos diferentes. Aunque posteriormente han aparecido variantes que han utilizado diferentes métodos para el cálculo de los pesos en el método AHP, el método AHP original obtiene los pesos mediante el método de los autovalores. Por el contrario, MACBETH la programación lineal.

Finalmente, otra de las diferencias que se pueden observar entre estos dos métodos es que en el caso de AHP, la suma de los pesos es igual a la unidad. En cambio, al utilizar MACBETH, se permite indicar e introducir en la matriz de comparación dos valores de referencia (normalmente muy bueno y muy malo) a los que se le asigna una valoración. Esto provoca que la suma de los pesos de la matriz de comparación, generalmente, no sea igual a la unidad.

Desde la aparición de ambos métodos, existen múltiples autores que se han posicionado a favor de uno u otro, o discutiendo ciertas características de ambos. Salomon y Montevechi [41] publicaron una comparativa de ambos métodos aplicándolos a la elección de tres nuevos coches.



#### 2.2.4. Métodos de superación (*outranking methods*)

En este grupo se encuentran aquellos métodos que realizan comparaciones entre pares de alternativas, como son los métodos ELECTRE y PROMETHEE. El concepto de *outranking* o superación fue propuesto por Roy en 1968 [42], siendo la idea básica que si una alternativa supera a otra alternativa en muchos criterios, la primera alternativa puede ser mejor que la segunda a pesar de no ser la que mejor valor tenga en la función de agregación.

##### **ELECTRE**

El método *Elimination et choix traduisant la réalité (ELECTRE)* fue creado por Roy en 1968 [42] y se basa en unos índices de concordancia (c) y discordancia (d). En un par de alternativas ( $A_j$  y  $A_k$ ) el índice de concordancia ( $c_{jk}$ ) es la suma de los pesos de aquellos criterios cuyo valor en la alternativa j sea mayor que en la alternativa k.

$$c_{jk} = \sum_{i=1}^n w_i \text{ con } j, k = 1, \dots, n \text{ y } \neq k$$

donde  $w_i$  son los pesos del criterio i. Por lo tanto el valor de concordancia será un valor entre 0 y 1.

En el mismo par de alternativas ( $A_j$  y  $A_k$ ), el índice de discordancia ( $d_{jk}$ ) será 0 si la alternativa j es mayor que la alternativa k en todos los criterios, y en el resto de los casos será igual a:

$$d_{jk} = \max_{i=1, \dots, m} [r_{ik}' - r_{ij}'] \text{ con } j, k = 1, \dots, n \text{ y } \neq k$$

donde  $r_{ik}'$  y  $r_{ij}'$  son los valores normalizados entre 0 y 10 de las puntuaciones  $r_{ik}$  y  $r_{ij}$ .

Obteniendo los índices de concordancia y discordancia para cada par de alternativas obtenemos las matrices de concordancia y discordancia. El umbral de concordancia  $c^*$  se define como el valor próximo mayor o igual al promedio en los números de la matriz de concordancia, y el valor umbral discordancia  $d^*$  se definen como el valor próximo menor o igual al promedio de la matriz de discordancia. Una alternativa  $A_j$  supera a  $A_k$  si:

$$c_{jk} > c^* \text{ y } d_{jk} < d^*$$

Esto nos proporciona un ranking parcial (entre pares de alternativas) donde se ve que si la alternativa  $A_j$  domina a la alternativa  $A_k$  o no (en caso de no cumplir 1 de las dos condiciones anteriores). Realizando este proceso por filas obtenemos el número de dominancias de una alternativa respecto a otra en filas, y realizando lo mismo por columnas el número de dominancias de una alternativa respecto a otra en columnas. Finalmente se restan en número de dominancias de filas y columnas para cada alternativa para obtener la diferencia de dominancia. La alternativa con mayor diferencia de dominancia será la más adecuada.

Este método ha ido evolucionando desde su primera publicación, creándose diferentes versiones del mismo. Govindan y Jespen [24] muestran la evolución histórica de este método así como las aplicaciones que se han realizado.

### **PROMETHEE**

El método *Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations* (*PROMETHEE*) fue introducido por Brans and Vincke en 1985 [43] y Brans et al. en 1986 [44]. Al igual que el método ELECTRE trata de obtener una ordenación jerarquizada de un conjunto de alternativas. En este caso se presenta una tabla de decisión o preferencia donde cada fila representa una alternativa y cada columna los diferentes criterios. Dentro de dicha tabla se coloca la valoración  $r_{ij}$  de cada criterio respecto a cada alternativa sin necesidad de normalizar. La asignación de los pesos de cada criterio depende de la importancia relativa de cada uno de los criterios, pero no es tarea del PROMETHEE.

El método PROMETHEE se fundamenta en las comparaciones a pares de las diferentes alternativas, creando finalmente un orden desde la mejor alternativa a la más débil. Para ello, primero el decisor debe escoger una función  $f$  que defina la valoración de cada criterio  $i$ , la cual valore la preferencia de una alternativa  $j$  respecto a una alternativa  $k$  como diferencia de las diferencias evaluadas  $f_i(j)-f_i(k)$ . En estas funciones, además se debe fijar los parámetros  $p$  y  $q$  que definen el área de indiferencia y el área de preferencia estricta respectivamente. Brans et al. [43] proponen 6 funciones para este propósito, las cuales que muestran en la figura 2.10. De esta forma se obtiene un índice de preferencia de una alternativa  $j$  sobre otra alternativa  $k$  para un criterio  $i$ . Este índice de preferencia se encuentra entre 0 y 1 y tienen el siguiente significado:

- $P(a, b) = 0 \rightarrow$  No hay preferencia o indiferencia
- $P(a, b) \approx 0 \rightarrow$  Preferencia débil de a sobre b
- $P(a, b) \approx 1 \rightarrow$  Preferencia fuerte de a sobre b
- $P(a, b) = 1 \rightarrow$  Preferencia absoluta de a sobre b

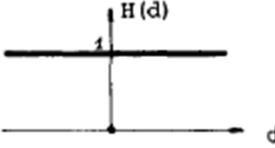

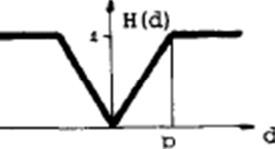
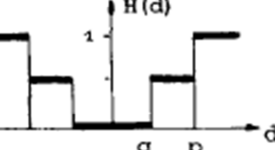
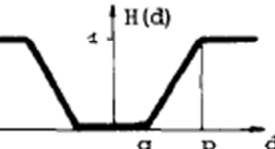
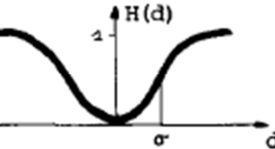
Types of generalized criteria		Param-eters
I. Usual criterion		-
II. Quasi-criterion		q
III. Criterion with linear preference		p
IV. Level criterion		q, p
V. Criterion with linear preference and indifference area		q, p
VI. Gaussian criterion		$\sigma$

Figura 2.10. Funciones preferencia TOPSIS

A continuación se define un índice de preferencia multi-criterio  $\pi(j,k)$  que mida el grado en que la alternativa j es mejor que la alternativa k en todos los criterios como:

$$\pi(j, k) = \sum_{i=1}^m w_i \cdot P_i(j, k)$$

Finalmente, para poder clasificar las alternativas se obtiene el flujo de ordenación positivo y negativo de cada alternativa. El flujo de ordenación positivo  $\emptyset^+(A_j)$  expresa el carácter dominante de una alternativa respecto a las otras, y el flujo de ordenación negativa  $\emptyset^-(A_j)$  el grado de debilidad de una alternativa respecto a las otras.

$$\emptyset^+(A_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^m \pi(A_j, A_k)$$

$$\emptyset^-(A_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^m \pi(A_k, A_j)$$

A través de estos flujos se puede definir un orden entre pares de alternativas.  $A_j$  es preferible a  $A_k$  cuando  $\emptyset^+(A_j) \geq \emptyset^+(A_k)$  y  $\emptyset^-(A_j) \leq \emptyset^-(A_k)$  y al menos una de las inecuaciones es estrictamente superada, es indiferente cuando  $\emptyset^+(A_j) = \emptyset^+(A_k)$  y  $\emptyset^-(A_j) = \emptyset^-(A_k)$ , y es incomparable en el resto de los casos. Además también se puede obtener un orden total de estas alternativas obteniendo  $\emptyset(A_j) = \emptyset^+(A_j) - \emptyset^-(A_j)$  y posteriormente ordenándolas de mayor a menor.

Tanto el ELECTRE como el PROMETHEE se basan en el mismo principio de comparación a pares para finalmente obtener un ranking parcial o total de las diferentes alternativas. Ambos métodos tienen diferentes variantes, debido a la evolución de los métodos y ambos permiten la obtención de un ranking parcial (comparación entre pares) y ranking global. Corrente et al. [45] realizan una comparación de ambos métodos.

### 2.2.5. Métodos de teoría de utilidad o valor (*utility/value methods*)

Esta familia de métodos busca obtener la mejor alternativa de un grupo determinado en función del grado de satisfacción que estas proporcionan. Estas funciones de satisfacción convierten los valores reales que representan el comportamiento de la alternativa a través de los criterios en un grado de satisfacción. Estas funciones pueden adoptar diferentes formas para representar diferentes patrones provocados por la relación entre las puntuaciones de cada criterio y el grado de satisfacción asociado al mismo.

Dentro de este grupo podemos encontrar aquellos métodos de *multi-attribute utility theory* (MAUT) y *multi-attribute value theory* (MAVT). La diferencia entre ambos es que el MAUT identifica un grado de satisfacción en condiciones de incerteza y el

MAUT en condiciones de certeza. Ambos métodos provienen de los conceptos determinados en la teoría de utilidad [46] y de ingeniería de valor [47] y las funciones las dejan a elección del decisor. El *método modelo integrado de valor para evaluaciones sostenibles (MIVES)* desarrollado por Pons y de la Fuente en 2013 [26] es un derivado de los anteriores en el cual se proporciona las ecuaciones que definen las diferentes funciones de satisfacción. Por lo tanto, de este grupo de métodos, el MIVES será la metodología de referencia, que además es la usada en el Anejo 13 de la EHE-08.

## MIVES

Para obtener el índice de valor de cada una de las alternativas, primero hay que realizar una estructura jerárquica similar a la de AHP de todos los aspectos que serán estudiados. Cada uno de los niveles de la estructura jerárquica se puede dividir en muchos o pocos subniveles dependiendo de la precisión que se quiere alcanzar. En el primer nivel se encuentran los requerimientos que son los aspectos principales que conforman la decisión (aspecto económico, medio ambiental y social), en próximos niveles se encuentran los criterios y subcriterios, y en el último nivel los indicadores. Dependiendo del grado de precisión deseado se tendrán más o menos niveles, aunque no se aconseja más de 3 o 4 niveles ni que el número de indicadores final sea superior a 20, ya que las valoraciones de los indicadores poco importantes pueden diluir los resultados.

Cada indicador tendrá asociado una función de valor, cuyo objetivo final es poder asignarle un valor entre 0 y 1 de forma que posteriormente se puedan comparar las valoraciones con indicadores con una unidad de medida diferente. Esta función de valor se define mediante 5 parámetros que, al modificarlos, permite obtener formas de S, cóncavas o convexas. Los parámetros que definen el tipo de función son  $K_i$ ,  $C_i$ ,  $X_{max}$ ,  $X_{min}$ , y  $P_i$ .

$$V_{ind} = B \cdot \left[ 1 - e^{-k_i \left( \frac{|X - X_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]$$

El valor de B depende de los 5 parámetros de forma:

$$B = \left[ 1 - e^{-k_i \left( \frac{|X_{max} - X_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]^{-1}$$

donde  $X_{max}$  es la abscisa del indicador que genera un valor igual a 1 y  $X_{min}$  es la abscisa del indicador que genera un valor igual a 0 (en el caso de funciones de valor creciente),  $X$  es el valor del indicador evaluado para cada alternativa,  $P_i$  es un factor de forma que define si la curva es en forma de S, cóncava, convexa o lineal (se obtienen curvas cóncavas para valores de  $P_i < 1$ , convexa o en forma de S para valor de  $P_i > 1$ , y tendiendo a lineales para valores de  $P_i = 1$ ,  $C_i$  se aproxima a la abscisa del punto de inflexión y  $K_i$  se aproxima a la ordenada del punto de inflexión.

Para funciones decrecientes el valor máximo es  $X_{min}$  y el valor mínimo es  $X_{max}$ , de forma que las ecuaciones que determinan la forma de las funciones quedaría:

$$V_{ind} = B \cdot \left[ 1 - e^{-k_i \left( \frac{|x - x_{max}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]$$

$$B = \left[ 1 - e^{-k_i \left( \frac{|x_{min} - x_{max}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]^{-1}$$

En la tabla 2.4 se muestran los valores de los parámetros de la función de valor que han de tomarse para cada uno de los indicadores en función de la forma que se quiera obtener, y las figura 1.11 representa las distintas formas que se pueden obtener. Finalmente indicar, que la asignación de pesos de cada nivel de la estructura jerárquica se realiza mediante la comparación a pares, o lo que es lo mismo, el método AHP descrito en el punto 2.2.3.

**Tabla 2.4. Parámetros funciones de valor de MIVES**

Forma	Pi	Ki
Cóncava	< 0.75	> 0.9
Convexa	> 2	< 0.1
Lineal	1	0
S suave	2 < Pi < 4	0.1 < Ki < 0.2
S fuerte	4 < Pi < 10	0.1 < Ki < 0.2

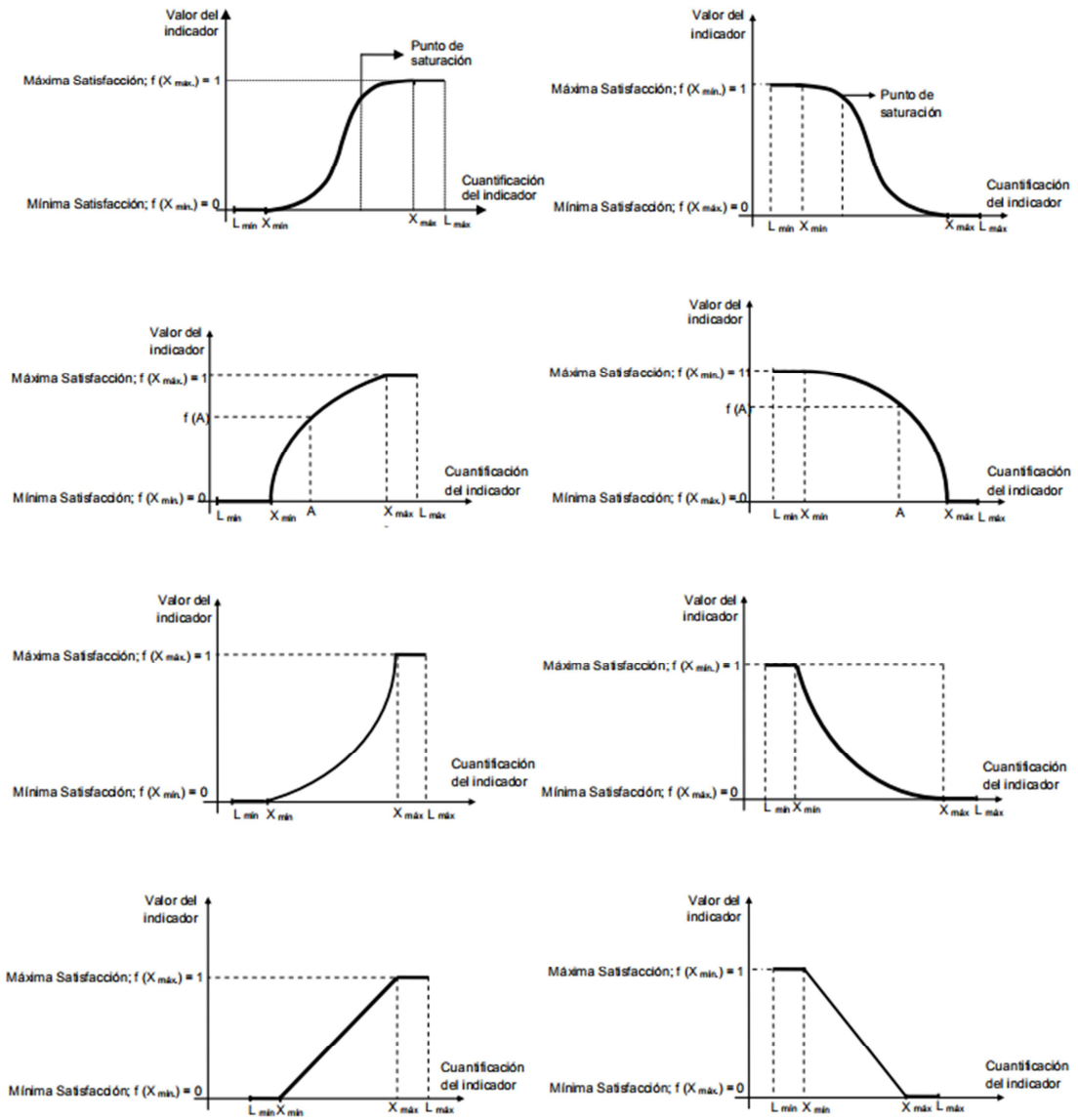


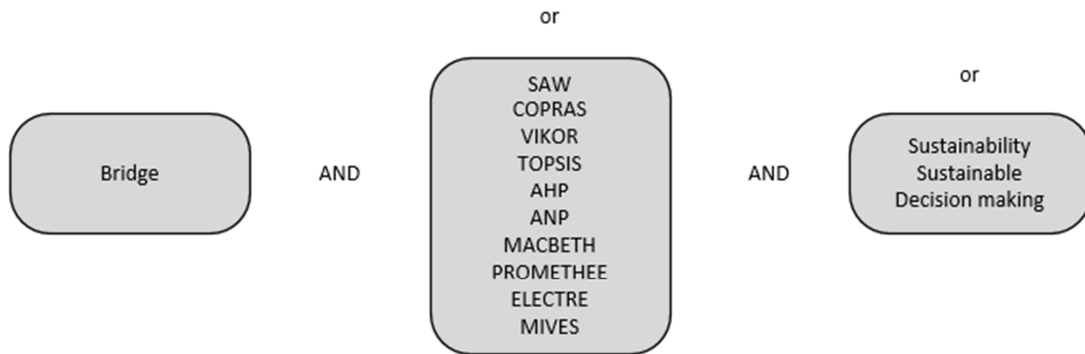
Figura 2.11. Funciones de valor MIVES

## CAPÍTULO III: ESTADO DEL ARTE

### 3.1. Revisión bibliográfica

Una vez conocidos los métodos más comunes de toma de decisión multi-atributo se pretende realizar una revisión bibliográfica para ver cuáles han sido usados en la valoración de la sostenibilidad de puentes. Para este propósito se ha utilizado el buscador bibliográfico Scopus y la combinación de palabras clave representada en la figura 3.1 tanto en *tittle, abstract, como keywords*.

( TITLE-ABS-KEY ( bridge ) AND TITLE-ABS-KEY ( saw OR copras OR vikor OR topsis OR ahp OR anp OR macbeth OR electre OR promethee OR maut OR mavt OR mives ) AND TITLE-ABS-KEY ( sustainability OR sustainable OR decision AND making ) )



**Figura 3.1. Combinación palabras en buscador Scopus**

Con la información introducida se ha obtenido un total de 94 resultados, que limitándolos al campo de la ingeniería y a artículos y conferencias, se reduce a 54 resultados. A pesar de tratarse la mayoría de la toma de decisión, muchos no corresponden con la evaluación de la sostenibilidad de puentes. Esto es porque en algunos casos la palabra *bridge* significa unir/enlazar en algunos casos y otros utilizan los métodos de toma de decisión para evaluar la condición de un puente. Para este trabajo se han seleccionado únicamente aquellos artículos o ponencias de conferencias que utilizan los diferentes métodos de toma de decisiones para la elección de una alternativa dentro de un grupo discreto de alternativas bajo diferentes criterios.

Se han encontrado un total de 20 trabajos que cumplen estas condiciones. Estos trabajos, además, pueden hacer referencia al diseño del puente, así como a las diferentes como a la selección del proceso constructivo más adecuado, como a la selección de la



mejor solución de mantenimiento o mejor uso en la fase final del ciclo de vida. Por lo tanto se pueden dividir en las fases del ciclo de vida de un puente: (a) diseño, (b) construcción, (c) uso y mantenimiento, (d) final del ciclo de vida. En las tablas 3.1, 3.2, 3.3, y 3.4 se tienen los trabajos encontrados divididos por fases del ciclo de vida. La primera columna contiene el autor del trabajo, la segunda el título, y la tercera el método de toma de decisión multi-atributo utilizado.

**Tabla 3.1. Estado del arte en fase de diseño**

<b>AUTOR</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>MÉTODO</b>
Malekly et al. [48]	A fuzzy integrated methodology for evaluating conceptual bridge design	Fuzzy QFD / Fuzzy TOPSIS
Hui-li Wang et al. [49]	Fuzzy optimum model of semi-structural decision for lectotype	Fuzzy AHP
Farkas [50]	A. Multi-criteria comparison of bridge designs	AHP
Aghdaie et al. [51]	Prioritizing constructing projects of municipalities based on AHP and COPRAS-G	COPRAS-G (AHP para pesos)
Gervasio et al. [52]	A probabilistic decision-making approach for the sustainable assessment of infrastructures	PROMETHEE (AHP para pesos)
Ardehir et al. [53]	Selection of a bridge construction site using Fuzzy Analytical Hierarchy Process in Geographic Information System	Fuzzy AHP
Balali et al. [54]	Selection of appropriate material, construction technique, and structural system of bridges by use of multicriteria decision-making method	PROMETHEE
Jaikel et al. [55]	FAHP model used for assessment of highway RC bridge structural and technological arrangements	Fuzzy AHP

**Tabla 3.2. Estado del arte en fase de construcción**

<b>AUTOR</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>MÉTODO</b>
Pan [56]	Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridge construction method	Fuzzy AHP
Gu et al. [57]	Method for selecting the suitable bridge construction projects with interval-valued intuitionistic Fuzzy information	Fuzzy TOPSIS
Chou et al. [58]	Bidding strategy to support decision-making by integrating Fuzzy AHP and regression-based simulation	Fuzzy AHP
Mousavi et al. [59]	A new hesitant fuzzy Analytical Hierarchy Process method for decision-making problems under uncertainty	Fuzzy AHP
Balali et al. [54]	Selection of appropriate material, construction technique, and structural system of bridges by use of multicriteria decision-making method	PROMETHEE
Chen [60]	Decision support for construction method selection in concrete buildings: Prefabrication adoption and optimization	Fuzzy PROMETHEE

**Tabla 3.3. Estado del arte en fase de uso y mantenimiento**

AUTOR	TÍTULO	MÉTODO
Sobanjo et al. [61]	Evaluation of projects for rehabilitation of highway bridges	Fuzzy AHP
El-Mikawi [62]	A methodology for evaluation of the use of advanced composites in structural civil engineering applications	AHP
Dabous et al. [63]	A multi-attribute ranking method for bridge management	AHP
Dabous and Alkass [64]	Decision support method for multi-criteria selection of bridge rehabilitation strategy	AHP

**Tabla 3.4. Estado del arte en fase final de ciclo de vida**

AUTOR	TÍTULO	MÉTODO
Chen et al. [65]	ANP experiment for demolition plan evaluation	ANP

Se puede observar que de los métodos de toma de decisión multi-atributo, el método AHP es el más común siendo usado 11 veces (y combinado en otros dos casos para la obtención de los pesos), el método PROMETHEE es el segundo método más común con 4 usos, seguido del TOPSIS con 2, y del COPRAS y ANP con 1 cada uno. El resto de métodos (MACBETH, VIKOR, ELECTRE y MIVES) no se han utilizado en literatura científica para la selección de una alternativa sostenible de un grupo discreto de alternativas en puentes. Por otro lado se puede ver, que en muchos casos los métodos de decisión multi-atributo se asocian con herramientas complementarias. De todas estas la *teoría fuzzy* es la más usada, aunque también se ha utilizado los *números grey*.

### **3.2. Revisión de criterios**

Considerando los mismos trabajos de la literatura científica del punto anterior, se han estudiado los criterios que los mismos han tenido en cuenta para la valoración de cada alternativa. De esta forma, se pretende obtener una tendencia o grupo de criterios más comunes para la valoración de cada pilar de la sostenibilidad (económico, medio ambiental y social). Al igual que en el punto anterior, los artículos se han dividido según fase del ciclo de vida del puente. En un primer bloque se tienen los criterios tenidos en cuenta en la fase de diseño. Dentro de este bloque se pueden observar criterios de todas las fases del ciclo de vida del puente, ya que el diseño del puente condiciona el comportamiento del mismo a lo largo del ciclo de vida del puente. De todos modos, también existen criterios que se centran exclusivamente en fases concretas del ciclo de vida del puente como la construcción, uso y mantenimiento y final de ciclo de vida.

**Tabla 3.5. Criterios en fase de diseño**

<b>AUTOR</b>	<b>CRITERIOS</b>	<b>MÉTODO</b>
Malekly et al. [48]	<i>Design complexity, Speed of Construction, Durability, Environment, Aesthetics, Construction Complexity, and Geometric design</i>	Fuzzy QFD / Fuzzy TOPSIS
Hui-li Wang et al. [49]	<i>Economic rationale (Production cost, Construction period, Construction cost), Function completeness (Deformation adaptability, Anti.wind ability), Environmental adaptability and Advanced Technology</i>	Fuzzy AHP
Farkas [50]	<i>Engineering Feasibility, Capital Cost, Maintenance, Aesthetics, Environmental Impact, Durability</i>	AHP
Aghdaie et al. [51]	<i>Environmental (traffic related, accident related, average speed limit), influence of physical area attributes), Socio-economic (rate of transportation of families, children and business dates, situation of area growth in the future, special importance of each road or boulevard to the city, vision of roads or boulevards about issues) and Total cost.</i>	COPRAS-G (AHP para pesos)
Gervasio et al. [52]	<i>Environmental (Waste production, Abiotic, depletion, Acidification, Eutrophication, Global Warning, Human toxicity, Photochemical oxidation, Ozone depletion layer, and Terrestrial ecotoxicity), Economical (Construction cost, Maintenance cost, and End of life cost), and Social (Vehicle operation cost, Driver delay cost, and Safety cost)</i>	PROMETHEE (AHP para pesos)
Ardehshir et al. [53]	<i>Transportation (minimizes the total distance traveled), Economic, and Morphology site</i>	Fuzzy AHP
Balali et al. [54]	<i>Quantitative (Cost, Span, Inspection and Maintenance, Construction speed) and Qualitative (Ease of construction, Traffic load, Dependence on Imported technologies, Architecture Design, Irregular geometric, Complexity in construction, and Symbolic and Aesthetics)</i>	PROMETHEE
Jaikel et al. [55]	<i>Bridge structure geometry adjustable to locality conditions (Topography, Resistance to natural hazards, and complexity of erection), Mitigation of impact upon natural environment (Project area minimization, Minor interference on landscape and harmoniously integrated into landscape, Contamination), Structure design technologic ability (Complete mechanization of manufacturing and construction process, assembly technology universalism, assembly work in various weather conditions), Safety and sustainability of structure (design sub-criterion, Structure design safety in challenging topography, Structure design safety in natural hazards and contingencies), and Economic criterion (Total investment cost, Project duration, and Maintenance costs)</i>	Fuzzy AHP

**Tabla 3.6. Criterios en fase de construcción**

<b>AUTOR</b>	<b>CRITERIOS</b>	<b>MÉTODO</b>
Pan [56]	<i>Quality (Durability and Suitability), Cost (Damage cost and Construction cost), Safety (Traffic conflict and Site condition), Duration (Constructability and Weather condition) and Shape (Landscape, Geometry and Environmental preservation)</i>	Fuzzy AHP
Gu et al. [57]	<i>Quality, Cost, Safety, and Duration</i>	Fuzzy TOPSIS
Chou et al. [58]	<i>Construction (Project complexity, Government level, Project duration and Experience of project staff), Environment (Site condition, Geologic types, Climate, and Cultural conditions), Planning (Design concepts, Design drawings, Construction method, and Interface management), and Estimation (Contractors fitness, Indirect costs, Direct costs, and Risk assessment)</i>	Fuzzy AHP
Mousavi et al. [59]	<i>Quality, Cost, Safety, Duration and Shape</i>	Fuzzy AHP
Balali et al. [54]	<i>Quantitative (Cost, Usability in Height, Construction speed), and Qualitative (Environmental issues, Quality of construction, Module installation of deck, and traffic interference)</i>	PROMETHEE
Chen [60]	<i>Durability, Damage cost, Construction cost, Traffic conflict, Site condition, Weather condition, Landscape, and Environmental effect</i>	Fuzzy PROMETHEE

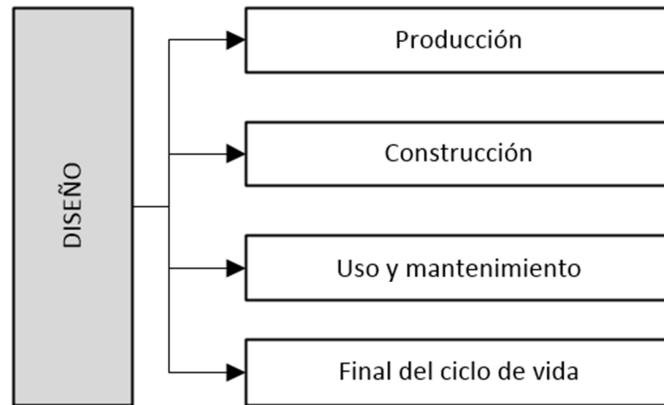
**Tabla 3.7. Criterios en fase de uso y mantenimiento**

<b>AUTOR</b>	<b>CRITERIOS</b>	<b>MÉTODO</b>
Sobanjo et al. [61]	<i>Ratio of the average daily traffic (ADT) to the project cost (ADT/Cost), Expected improvement in structural condition appraisal rating, In deck geometry appraisal rating, In clearance appraisal rating, In load capacity appraisal rating, In waterway adequacy appraisal rating, In approach roadway alignment appraisal rating, and Expected extension in bridge service life.</i>	Fuzzy AHP
El-Mikawi [62]	<i>Structural Performance Indicators, Economic Indicators, Environmental Aspects, Codes and Regulations, Material availability, Architectural Aspects</i>	AHP
Dabous et al. [63]	<i>Agency cost (Direct cost: material, labor, and equipment), User cost (Indirect cost), User cost (Delay cost, Increased vehicle operating cost and cost of accidents and crashes that may happen during the projects), Bridge safety, Useful life and Environmental impact</i>	AHP
Dabous and Alkass [64]	<i>Maximize bridge condition preservation and safety (Condition rating, Load carrying and capacity and Seismic risk), Maximize effectiveness of investment (Average daily traffic (ADT) and Supporting road type, and Minimize bridge deficiency (Vertical clearance, Approach condition and Draining system)</i>	AHP

**Tabla 3.8. Criterios en fase final de ciclo de vida**

<b>AUTOR</b>	<b>CRITERIOS</b>	<b>MÉTODO</b>
Chen et al. [65]	<i>Structure characteristics (height, type of structure, stability, scope of demolition, and usage), Conditions (Safety risk on/off site, Acceptable level of noise, Proximity to adjacent structures), Cost (Machinery and Manpower), Experiences (Familiarity with technologies, Availability of equipment, Availability of expertise), Environmental impacts and Time (Worksite preparation and Entire demolition process)</i>	ANP

Como en la segunda parte de este trabajo se va a realizar la comparación de tres diseños diferentes de puentes, los criterios a tener en cuenta serán aquellos que se consideren en la fase de diseño de los puentes. Esto no significa que solo se van a considerar los criterios que determinen el diseño de un puente, sino que la valoración de la sostenibilidad del puente se va a hacer en la fase de diseño teniendo en cuenta todo el ciclo de vida del puente. Esto se muestra en la figura 3.2.



**Figura 3.2. Fases del ciclo de vida**

Muchos de los criterios considerados por algunos autores son muy difíciles de evaluar debido a su subjetividad, por lo que en este punto se va a intentar determinar aquellos criterios que representen bien cada pilar de la sostenibilidad a lo largo del ciclo de vida del puente. Por un lado, de los tres pilares de la sostenibilidad, el que tiene una mayor facilidad para ser evaluado es el pilar económico, que será el coste total del puente a lo largo del ciclo de vida. Esto puede verse en algunos artículos como [50,51,66] donde se define el factor económico como la suma del coste de las diferentes fases del ciclo de vida. Por otro lado, los pilares medio ambientales y sociales son más complejos de medir. Muchos autores no definen los criterios concretos que utilizan para medir el aspecto medio ambiental [48–50], y lo indican de forma genérica (*Environment, Environment adaptability, Environment impact*). Generalmente, los criterios más utilizados para la valoración del impacto medio ambiental de un producto o proceso son el CO<sub>2</sub> y la energía, aunque algunos autores como Gervasio et al. [52] prefieren dar un perfil medio ambiental mucho más completo. Este perfil medio ambiental se consigue con los métodos de análisis de vida. Gervasio et al. [52] utiliza el método CML, aunque existen otros métodos también conocidos como el Eco Indicador y el ReCiPe. Estos tipos de métodos son muy aceptados para la evaluación del impacto medio ambiental.

El aspecto social es en el que menor consenso existe, observándose una gran variedad de criterios para la valoración de este aspecto, aunque si es cierto, que se ha observado una mayor frecuencia de los criterios referentes a la estética [48,50,54] y al tiempo de retraso debido a las actividades de mantenimiento [52,63].

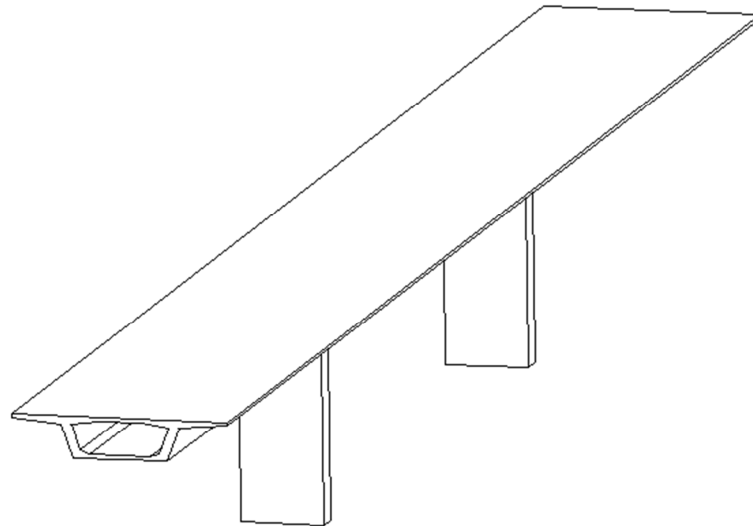
## **CAPÍTULO IV: CASO DE ESTUDIO**

En este capítulo se va a aplicar los diferentes métodos de toma de decisión multi-atributo a tres alternativas diferentes. Para ver la influencia del comportamiento del puente a lo largo del ciclo de vida, dos de estas alternativas corresponderán a puentes de hormigón en cajón, pero con diferentes características, y un tercer puente será de vigas en artesa prefabricadas. En un primer apartado se van a describir las características de las tres alternativas, tanto de diseño como de características que condicionen el comportamiento a lo largo del ciclo de vida. En un segundo punto se van a explicar los criterios que se han tenido en cuenta para la evaluación de los tres pilares básicos de la sostenibilidad. Finalmente se aplicarán los diferentes métodos de decisión multi-atributo para valorar las diferentes alternativas. De esta forma se pretende realizar una aplicación práctica de los métodos de decisión multi-atributo y ver las posibles similitudes y diferencias entre los mismos.

### ***4.1. Descripción***

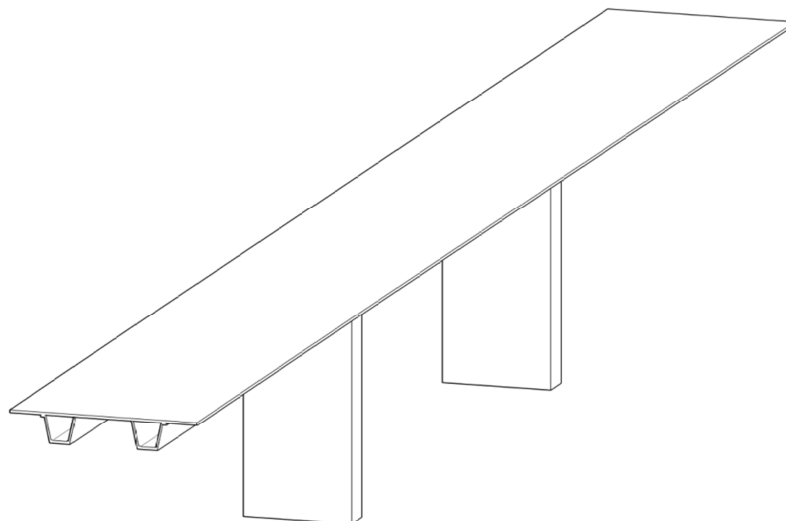
El problema planteado a resolver es la elección de un puente para salvar un valle en el área de Valencia con ambiente XC-4 para una carretera nacional. Para ello se proponen tres alternativas diferentes, las cuales han sido optimizadas a coste mediante algoritmos heurísticos, por lo que cada alternativa tendrá la geometría más eficiente. De esta forma se evita que alguna de las alternativas esté más sobredimensionada que otra.

Las dos primeras alternativas corresponden a un puente postensado de tablero en cajón de hormigón de tres vano con longitud de vano  $35.2+44+35.2$  metros y un ancho de 12 metros (figura 4.1). Estos puentes se han seleccionado de la frontera de Pareto de Garcia-Segura et al. [67] y tienen una vida en servicio de 150 años. La primera alternativa se construye con un hormigón de 35 MPa y el inicio de la corrosión se produce a los 10.45 años, lo cual implica realizar dos periodos de mantenimiento para que el puente cumpla con la normativa a lo largo de su vida de servicio. La segunda alternativa utiliza hormigón de 50 MPa y el inicio de corrosión se produce a los 65.68 años, lo cual implica la necesidad de un periodo de mantenimiento.



**Figura 4.1. Vista general de las alternativas 1 y 2**

La alternativa tres corresponde a puente formado por tres tramos isostáticos de 40+40+40 metros de dos vigas en artesa pretensado con losa de hormigón in situ y un ancho de 12 metros (figura 4.2). Este puente corresponde a la optimización realizada por Martí et al. [68] y tiene una vida en servicio de 120 años. El hormigón utilizado tiene una resistencia de 35 MPa para las vigas en artesa y 40 MPa para la losa y el inicio de corrosión se produce a los 10,45 años, lo cual implica realizar dos periodos de mantenimiento para que el puente cumpla con la normativa a lo largo de su vida de servicio.



**Figura 4.2. Vista general de la alternativa 3**



Por lo tanto, estas alternativas poseen diferentes cantidades de materiales que directamente afectan en la etapa de producción del ciclo de vida del puente, e indirectamente al número de periodos de mantenimiento necesarios para alcanzar la vida útil. Estas cantidades se presentan en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1. Cantidades de materiales para cada alternativa**

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	
			Vigas artesa	Losa
Vida en servicio (años)	150	150	120	
Resistencia (MPa)	35	50	35	40
Armadura pasiva (kg/m <sup>2</sup> )	67.1	74.67	12.53	23.93
Armadura activa (kg/m <sup>2</sup> )	21.99	19.8	10.63	-
Hormigón (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0.67	0.674	0.11	0.18
Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	300	400	300	320
Grava (kg/m <sup>3</sup> )	848	726	848	829
Arena (kg/m <sup>3</sup> )	1088	1136	1088	1102
Agua (kg/m <sup>3</sup> )	160	160	160	162
Superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	4	7	4	5

La construcción de las alternativas 1 y 2 se ha realizado mediante construcción tradicional con cimbra y encofrado de madera. Las vigas de la alternativa 3 se han colocado mediante la ayuda de grúas, y posteriormente la losa se ha realizado mediante construcción tradicional.

En la fase de uso y mantenimiento se tiene en cuenta los periodos de mantenimiento. En cada periodo de mantenimiento se realizará el descorchado del hormigón superficial y se sustituye el recubrimiento antiguo por uno nuevo. Además se tiene en cuenta los retrasos de tráfico, al tener que utilizar un desvío, provocados por el cierre total del puente debido a las operaciones de mantenimiento. Esta mayor longitud recorrida por los vehículos que con el puente en uso transitan sobre él, afectan tanto al aspecto medio ambiental debido a las emisiones provocadas por los coches como al aspecto social por los retrasos producidos. Para tener en cuenta estos aspectos, por un lado se supone que cada periodo de mantenimiento de las alternativas 1 y 2 se alarga durante 7 días, en cambio la alternativa 3 necesita 9.3 días debido al mayor perímetro en dicha alternativa. Por otro lado, se considera que el tráfico medio por día es de 8500 vehículos/día, de los

cuales un 12% corresponden a vehículos pesados, siendo la distancia de desvío de 2.9 km.

En cuando al final del ciclo de vida, se supone que se demuele todo el puente y a continuación pasa por una planta de separado para separar el acero del hormigón. Se considera que el acero se recicla por completo, y el hormigón pasa por una planta de molienda para poder ser reutilizado como base de carretera. Tanto en la fase de uso y mantenimiento, como en la fase final del ciclo de vida se supone la fijación del CO<sub>2</sub> como consecuencia de la recarbonatación del hormigón [69].

## 4.2. Criterios considerados

### 4.2.1. Pilar económico

El impacto económico se valora calculando el coste de las diferentes alternativas a lo largo del ciclo de vida, lo cual incluye el coste de producción, el coste de construcción, el coste de mantenimiento y el coste de demolición y procesado en la fase final del ciclo de vida. El cálculo del coste de las diferentes alternativas se ha basado en Garcia-Segura et al. [67]. Para ello, el coste económico de cada alternativa se ha valorado sumando el coste inicial (coste de producción y coste de construcción), coste de mantenimiento y coste en la fase final del ciclo de vida.

**Tabla 4.2. Precios unitarios**

Material	Coste (€)
Hormigón 35MPa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	104.57
Hormigón 40MPa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	109.33
Hormigón 50MPa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	119.87
Armadura pasiva (kg/m <sup>2</sup> )	1.16
Armadura activa (kg/m <sup>2</sup> )	3.4
Encofrado (m <sup>2</sup> )	33.81

El coste inicial, formado por el coste de producción y coste de construcción se ha obtenido como suma de los productos de las cantidades de materiales usados por el precio unitario de los mismos. Como se ha indicado en este coste unitario está implícito el coste de producción de cada material, el coste de transporte, y el coste en las operaciones de construcción. La tabla 4.2 muestra los precios unitarios considerados para los diferentes materiales. Con estos precios unitarios, el coste inicial de la

alternativa 1 es de 401260.99 €, el de la alternativa 2 es de 418635.77 €, y el de la alternativa 3 es de 206732.78 €. El número óptimo de periodos de mantenimiento y cuando realizarlos se ha obtenido basándose en Garcia-Segura et al [67]. La alternativa 1 tiene un coste de mantenimiento total de 215566 €, la alternativa 2 de 38353 €, y la alternativa 3 de 286394 €. Para todos los procesos realizados en la fase final de vida y el transporte realizado se ha supuesto un coste de final de ciclo de vida del 50% del coste inicial de cada alternativa. Considerando dichas características, el coste total de cada alternativa es el representado en la tabla 4.3.

**Tabla 4.3. Coste total de las alternativas**

	Coste inicial (€)	Coste mantenimiento (€)	Coste final (€)	Coste total (€)
<b>Alternativa 1</b>	401111.21	215566	200555.60	<b>817232.82</b>
<b>Alternativa 2</b>	417850.37	38353	208925.18	<b>665128.55</b>
<b>Alternativa 3</b>	206732.78	286394	103366.39	<b>596494.01</b>

#### 4.2.2. Pilar medio ambiental

Para la valoración del pilar medio ambiental se va a realizar una valoración del impacto ambiental mediante un método de impacto ambiental. El análisis de ciclo de vida (*Life-cycle assessment*, LCA) es una metodología para obtener el impacto ambiental de un producto, servicio o actividad a lo largo de toda su vida, evaluando los flujos de entrada y salida de un sistema. El LCA se ha convertido en una de las herramientas más importantes y aceptadas para la evaluación, reducción o mejora del impacto ambiental de un producto, proceso o actividad. Por lo tanto, el LCA es una herramienta muy útil para la valoración del pilar medio ambiental de las estructuras, y por lo tanto de los puentes. La normativa ISO 14040:2006 [70] es la normativa de referencia para llevar a cabo el LCA, describiendo una serie de pasos a seguir. La primera fase consiste en definir el objetivo del análisis, límites del sistema, unidad funcional y otras características importantes, en la segunda fase se realiza un inventario de la información necesaria para realizar el LCA. Posteriormente, en la tercera fase se utiliza un método de LCA para realizar el análisis medio ambiental, y finalmente se interpreta.

- (1) El objetivo principal de este LCA es determinar el impacto ambiental de los tres puentes a lo largo de todo su ciclo de vida para posteriormente poder incluir

dicha información en el proceso de toma de decisiones para comparar la sostenibilidad de las tres alternativas anteriormente descritas. Los productos, procesos y actividades tenidos en cuenta para este fin están descritos en la descripción anterior. Para poder realizar una comparación entre alternativas es necesario que tengan dimensiones semejantes y capacidad de carga semejante. En este problema tenemos dos alternativas de ancho y longitud igual, y otra alternativa con el mismo ancho y una longitud un poco mayor. En los tres casos la capacidad de carga será misma.

Otro de los aspectos fundamentales a determinar en este primer paso del LCA es la unidad funcional, que es la unidad que posteriormente va a servir de comparación. Pese a que muchos que han realizado el LCA sobre puentes utilizan como unidad funcional el metro lineal o metro cuadrado, en este caso se va a utilizar la totalidad del puente, para poder evaluarlo como una unidad.

- (2) El inventario se ha realizado mediante la información obtenida principalmente de la base de datos de Ecoinvent [71], aunque en algunos casos, sobretodo referente a la maquinaria, se ha recurrido a la base de datos del Bedec [72].
- (3) Para la valoración del impacto ambiental existen dos enfoques diferentes. El enfoque midpoint proporciona una gran cantidad de información mediante las categorías de impacto, y el enfoque endpoint proporciona un número reducido de categorías de daño. Existen diferentes métodos de impacto ambiental en función de sus características. En este caso se va a utilizar el método ReCiPe ya que proporciona tanto el enfoque midpoint como el endpoint. El enfoque midpoint se calcula para ver con mayor detalle el impacto de las tres alternativas. Pero para la comparación de las mismas se va a usar el enfoque endpoint normalizado, ya que al haber una menor cantidad de categorías, la comparación es mucho más sencilla. Este análisis de impacto ambiental se ha llevado a cabo mediante el programa informático OpenLCA.
- (4) El objetivo principal de este trabajo es la comparación de las tres alternativas descritas anteriormente.

A continuación se muestran los resultados del enfoque midpoint y endpoint de cada alternativa, por fase del ciclo de vida del puente y por metro lineal. El enfoque midpoint proporciona 18 categorías de impacto *Agricultural land occupation (ALO)*, *Climate change (GWP)*, *Fossil depletion (FD)*, *Freshwater ecotoxicity (FEPT)*, *Freshwater eutrophication (FEP)*, *Human toxicity (HTP)*, *Ionizing radiation (IRP)*, *Marine ecotoxicity (MEPT)*, *Marine eutrophication (MEP)*, *Metal depletion (MD)*, *Natural land transformation (NLT)*, *Ozone depletion (OD)*, *Particulate matter formation (PMF)*, *Photochemical oxidant formation (POFP)*, *Terrestrial acidification (TAP)*, *Terrestrial ecotoxicity (TEPT)*, *Urban land occupation (ULO)*, and *Water depletion (WD)*. A pesar de que este enfoque proporciona mucha información los resultados son difíciles de interpretar, más si cabe si se pretende obtener una valoración global. Las tablas 4.4, 4.5 y 4.6 muestran las 18 categorías de impacto para cada alternativa. Si el objetivo del análisis de ciclo de vida es reducir el impacto de una categoría concreta, con esta información se podría obtener en qué fase dicha categoría es la más influyente y así poder reducir su impacto. Como el objetivo de este trabajo es la comparación entre diferentes alternativas, el enfoque midpoint no resulta eficaz, y por dicho motivo se utiliza el enfoque endpoint.

**Tabla 4.4. Categorías de impacto de la alternativa 1 por metro lineal**

Acronimo	Unidad	Producción		Construcción		Uso y mantenimiento		Fase final	
		m	cv (%)	m	cv (%)	m	cv (%)	m	cv (%)
ALO	m2*a	155.34	4.13	576.41	33.43	22.23	24.51	3.84	4.89
GWP	kg CO2 eq	3589.85	18.93	1453.67	3.17	2770.57	12.17	-807.73	-5.62
FD	kg oil eq	577.04	6.44	148.42	6.38	964.35	11.68	24.10	16.00
FEPT	kg 1,4-DB eq	70.02	2.79	4.15	7.78	42.92	33.56	0.41	6.57
FEP	kg P eq	1.51	4.50	0.15	7.07	0.27	24.77	0.01	5.51
HTP	kg 1,4-DB eq	2687.18	2.90	137.99	9.51	429.79	26.39	12.75	6.40
IRP	kg U235 eq	414.10	15.96	208.40	4.13	195.61	12.26	22.61	5.49
MEPT	kg 1,4-DB eq	69.40	2.75	3.90	8.05	38.01	33.13	0.38	6.67
MEP	kg N eq	0.54	9.87	0.11	8.46	1.02	5.62	0.02	21.83
MD	kg Fe eq	1685.92	2.50	10.20	14.13	157.81	21.68	1.67	22.48
NLT	m2	0.45	7.85	0.08	9.32	1.02	11.04	0.02	23.64
ODP	kg CFC-11 eq	0.00	7.15	0.00	5.59	0.00	10.90	0.00	17.09
PMFP	kg PM10 eq	7.08	6.05	1.22	8.16	9.27	6.57	0.23	19.84
POFP	kg NMVOC	10.73	9.88	1.88	8.79	28.76	4.94	0.57	26.35
TAP	kg SO2 eq	9.93	9.88	3.23	6.15	17.96	6.56	0.54	16.41
TEPT	kg 1,4-DB eq	0.84	2.62	0.04	21.79	0.23	21.41	0.00	15.19
ULO	m2*a	41.60	6.68	14.72	28.80	31.52	28.10	0.37	7.79
WD	m3	15361.74	10.46	3197.70	4.60	2077.07	22.44	323.72	4.92

**Tabla 4.5. Categorías de impacto de la alternativa 2 por metro lineal**

Acrónimo	Unidad	Producción		Construcción		Uso y mantenimiento		Fase final	
		m	cv (%)	m	cv (%)	m	cv (%)	m	cv (%)
ALO	m2*a	186.01	4.07	568.93	33.85	10.97	22.96	3.84	4.84
GWP	kg CO2 eq	4413.77	21.13	1353.95	3.16	1345.10	11.51	-1099.20	-5.09
FD	kg oil eq	669.39	7.56	139.37	6.70	479.48	10.78	23.99	15.79
FEPT	kg 1,4-DB eq	78.01	3.19	3.91	8.21	21.08	31.55	0.41	6.62
FEP	kg P eq	1.71	5.27	0.14	7.45	0.13	23.15	0.01	5.55
HTP	kg 1,4-DB eq	3001.31	3.20	130.42	10.04	211.78	24.77	12.75	6.44
IRP	kg U235 eq	497.18	18.30	194.46	4.14	97.21	11.34	22.61	5.53
MEPT	kg 1,4-DB eq	77.27	3.13	3.67	8.50	18.67	31.15	0.38	6.71
MEP	kg N eq	0.63	11.64	0.11	8.93	0.51	5.18	0.02	21.47
MD	kg Fe eq	1864.44	2.73	9.73	14.84	78.03	20.20	1.66	22.11
NLT	m2	0.48	7.64	0.07	9.84	0.51	10.19	0.02	23.25
ODP	kg CFC-11 eq	0.00	8.54	0.00	5.82	0.00	10.06	0.00	16.85
PMFP	kg PM10 eq	8.06	7.22	1.15	8.62	4.62	6.04	0.23	19.53
POFP	kg NMVOC	12.49	11.64	1.77	9.29	14.36	4.58	0.57	25.91
TAP	kg SO2 eq	11.56	11.58	3.04	6.45	8.96	6.03	0.54	16.19
TETP	kg 1,4-DB eq	0.84	2.52	0.04	22.55	0.11	20.36	0.00	15.00
ULO	m2*a	44.99	6.54	14.41	29.41	15.48	26.67	0.37	7.81
WD	m3	17948.35	12.29	2988.85	4.70	1026.25	20.95	324.08	4.89

**Tabla 4.6. Categorías de impacto de la alternativa 3 por metro lineal**

Acrónimo	Unidad	Producción		Construcción		Uso y mantenimiento		Fase final	
		m	cv (%)	m	cv (%)	m	cv (%)	m	cv (%)
ALO	m2*a	79.76	3.77%	2.59	7.46%	29.53	14.09%	1.73	6.84%
GWP	kg CO2 eq	1838.55	16.86%	267.85	9.61%	3680.90	5.29%	-117.68	-6.97%
FD	kg oil eq	316.90	6.90%	51.48	17.52%	1281.21	4.94%	11.00	16.57%
FEPT	kg 1,4-DB eq	38.15	2.93%	0.93	18.86%	57.02	26.70%	0.19	7.94%
FEP	kg P eq	0.82	4.19%	0.01	10.56%	0.36	14.00%	0.01	7.16%
HTP	kg 1,4-DB eq	1470.92	3.01%	22.58	16.26%	571.01	16.36%	5.77	7.80%
IRP	kg U235 eq	244.70	12.29%	18.96	10.35%	259.88	5.22%	10.22	7.14%
MEPT	kg 1,4-DB eq	37.90	2.92%	0.96	17.91%	50.50	26.08%	0.17	8.01%
MEP	kg N eq	0.29	8.79%	0.05	20.79%	1.36	2.90%	0.01	22.26%
MD	kg Fe eq	926.19	3.22%	5.34	17.35%	209.66	11.06%	0.77	22.90%
NLT	m2	0.24	8.28%	0.05	18.78%	1.36	4.67%	0.01	24.03%
ODP	kg CFC-11 eq	0.00	8.59%	0.00	17.82%	0.00	4.61%	0.00	17.63%
PMFP	kg PM10 eq	3.84	5.67%	0.50	19.84%	12.32	3.12%	0.11	20.31%
POFP	kg NMVOC	5.76	9.12%	1.51	21.63%	38.21	2.77%	0.26	26.69%
TAP	kg SO2 eq	5.30	8.90%	1.00	19.21%	23.86	3.12%	0.25	16.97%
TETP	kg 1,4-DB eq	0.45	4.60%	0.02	27.71%	0.31	12.68%	0.00	15.79%
ULO	m2*a	23.29	9.86%	3.50	29.32%	41.88	21.00%	0.17	8.93%
WD	m3	8807.20	8.35%	219.49	7.63%	2759.54	11.89%	146.17	6.83%

El enfoque endpoint solo se proporciona tres categorías de daño: *Human health*, *Resources and Ecosystem*. A pesar de no dar información tan concreta como el enfoque midpont es más sencillo de interpretar, por este motivo es el enfoque utilizado para realizar el caso de estudio de este trabajo. En las tablas 4.7, 4.8, y 4.9 se muestran las tres categorías de daño para cada alternativa.

**Tabla 4.7. Categorías de daño de la alternativa 1**

<b>Categoría de daño</b>	<b>Unidad</b>	<b>Producción</b>	<b>Construcción</b>	<b>Uso y mantenimiento</b>	<b>Fase final</b>	<b>Total</b>
Salud humana	puntos	19411.392	5527.808	14680.952	-2628.912	36991.24
Recursos	puntos	15922.192	1853.28	12419.264	132.704	30327.44
Ecosistema	puntos	9830.392	4736.16	5311.592	-1703.416	18174.728

**Tabla 4.8. Categorías de daño de la alternativa 2**

<b>Categoría de daño</b>	<b>Unidad</b>	<b>Producción</b>	<b>Construcción</b>	<b>Uso y mantenimiento</b>	<b>Fase final</b>	<b>Total</b>
Salud humana	puntos	22900.592	5159.44	7238.088	-3349.632	31948.488
Recursos	puntos	17948.216	1741.168	6209.632	295.152	26194.168
Ecosistema	puntos	11856.416	4484.48	3163.16	-2188.472	17315.584

**Tabla 4.9. Categorías de daño de la alternativa 3**

<b>Categoría de daño</b>	<b>Unidad</b>	<b>Producción</b>	<b>Construcción</b>	<b>Uso y mantenimiento</b>	<b>Fase final</b>	<b>Total</b>
Salud humana	puntos	10682.64	1190.16	20459.52	-28.08	32304.24
Recursos	puntos	9154.32	651.6	17307.6	427.08	27540.6
Ecosistema	puntos	5244	608.16	7402.32	-75.6	13178.88

### **4.2.3. Pilar social**

El aspecto social es el aspecto donde menos certeza existe y por lo tanto, aquel donde mayor discusión hay a la hora de seleccionar los criterios más representativos. En este caso, se valora el impacto social de la construcción de un puente en un sitio determinado, es decir, el tipo de obra a realizar y el emplazamiento ya están definidos. Este aspecto es mucho más importante cuando se realiza una toma de decisiones sobre diferentes proyectos en un mismo territorio, ya que cada proyecto tiene un fin y unos objetivos sociales diferentes. En este caso, el fin y el objetivo social de las tres alternativas es el mismo, lo que implica que los criterios a considerar en la toma de decisión multi-atributo deben diferenciar las alternativas. Tras revisar los criterios más comunes usados en la bibliografía se van a utilizar tres criterios sociales que pueden representar las diferentes fases del ciclo de vida del puente. Estos son la estética, el número de empleados y el tiempo de retraso de los usuarios del puente debido a las operaciones de mantenimiento realizadas.

El número de empleados y el tiempo de retraso son criterios cuantitativos, ya que se puede determinar un valor concreto debido a las características de la alternativa. Por un lado, contando fase de construcción y las operaciones de mantenimiento, la primera alternativa tendrá 85 empleados, la segunda 80 y la tercera 60. Por otro lado, el tiempo de retraso de las diferentes alternativas ya está definido debido a las operaciones de mantenimiento que se van a realizar, siendo el de la primera alternativa de 14 días, el de la segunda de 7 días, y el de la tercera de 18.6 días.

La estética, es un criterio más subjetivo, y por lo tanto está más asociado al punto de vista del decisor. Para obtener una valoración estética de las tres alternativas recurrimos a la comparación por pares. Para ello se considera que las alternativas 1 y 2 son igual de buenas (son la misma tipología), y ambas alternativas respecto a la alternativa 3 son ligeramente más buenas. Esto implica, que contando un total de 100 puntos, las alternativas 1 y 2 tienen una puntuación de 42.9 puntos, y la alternativa 3 de 14.3 puntos.



### 4.3. Resumen criterios y pesos

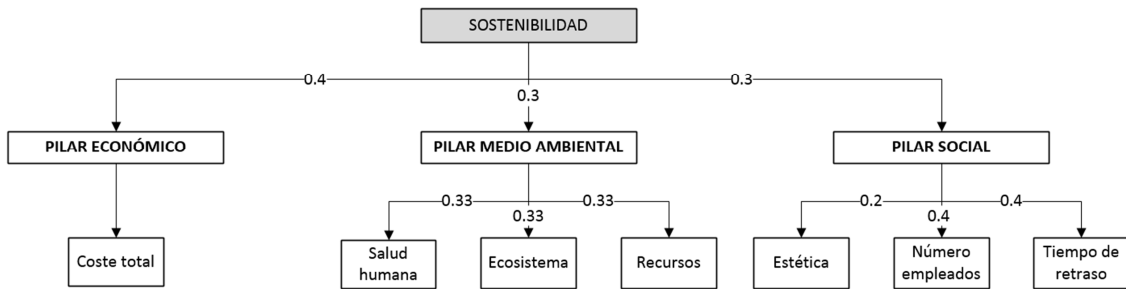
Tras la descripción de los criterios considerados para la evaluación de la sostenibilidad de las tres alternativas, se puede definir un diagrama donde se observa los criterios que representan cada pilar básico de la sostenibilidad (figura 4.3). Cada uno de estos criterios tiene una valoración para cada alternativa, que se puede ver de forma resumida en la tabla 4.2. El pilar económico (coste) y el pilar medio ambiental (análisis de ciclo de vida) abarcan todo el ciclo de vida del puente desde su diseño hasta la fase final del ciclo de vida. En cambio, para el pilar social, más difuso y complicado de evaluar, no existe un criterio que evalúe el impacto social a lo largo de todo el ciclo de vida de un puente. Por esta razón se han escogido 3 criterios que representan diferentes fases del ciclo de vida de un puente. Estos criterios son la estética, el número de empleados en la construcción y el tiempo de retraso de los usuarios del puente debido a las operaciones de mantenimiento realizadas.

**Tabla 4.2. Resumen de criterios considerados**

			Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 2
PILAR ECONÓMICO	Coste	(€)	817232.819	665128.548	596494.006
PILAR MEDIO AMBIENTAL	Salud humana	puntos	36991.24	31948.488	32304.24
	Recursos	puntos	30327.44	26194.168	27540.6
	Ecosistema	puntos	18174.728	17315.584	13178.88
PILAR SOCIAL	Estética		42.9	42.9	14.3
	Número empleados	nº	85	80	60
	Tiempo retraso	días	14	7	18.6

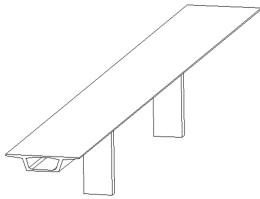
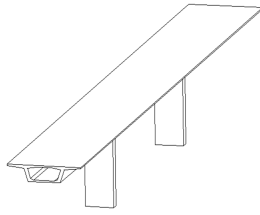
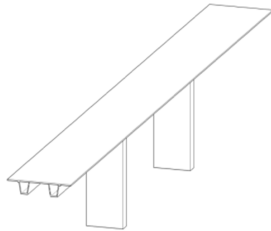
Una vez definidos los criterios a considerar para la comparación de la sostenibilidad de las diferentes alternativas, es necesaria la determinación del peso. Como se ha visto en el punto 2.1, la asignación de pesos es un paso clave en los procesos de toma de decisiones. Existen multitud de métodos para la determinación de dichos pesos. Los pesos definidos van a ser los mismos para todos los métodos de toma de decisión multi-atributo para no influir en ellos. Los pesos considerados para este caso de estudio se muestran de forma jerárquica en la figura 4.3. En caso de no querer obtener los pesos de forma jerárquica, el peso de cada criterio se obtiene como el producto de los pesos desde la rama inferior hasta el objetivo. De esta forma, los pesos absolutos en este caso

son: Coste total (0.4), salud humana (0.1), ecosistema (0.1), recursos (0.1), estética (0.06), número de empleados (0.12) y tiempo de retraso (0.12).



**Figura 4.3. Pesos considerados**

Tabla 4.3. Resumen general

				Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 2	
							
<b>PRODUCCIÓN</b>	VIDA EN SERVICIO	años		150	150	120	
	RESISTENCIA	Mpa		35	50	Viga: 35 Losa: 40	
	CANTIDAD HORMIGÓN	(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )		0.67	0.674	Viga: 0.11 Losa: 0.18	
	CANTIDAD ARMADURA PASIVA	(kg/m <sup>2</sup> )		67.1	74.67	36.46	
	CANTIDAD ARMADURA ACTIVA	(kg/m <sup>2</sup> )		21.99	19.8	10.63	
<b>CONSTRUCCIÓN</b>	CONSTRUCCIÓN		In situ	In situ	Viga: Prefabricada Losa: In situ		
<b>USO Y MANTENIMIENTO</b>	NÚMERO MANTENIMIENTOS	nº		2	1	2	
	DÍAS POR MANTENIMIENTO	días		7	7	9.3	
<b>FINAL DE CICLO DE VIDA</b>	FINAL CICLO VIDA			Demolición y reciclado	Demolición y reciclado	Demolición y reciclado	
<b>CRITERIOS</b>	PILAR ECONÓMICO	Coste	(€)	817232.819	665128.548	596494.006	
	PILAR MEDIO AMBIENTAL	Salud humana	puntos	36991.24	31948.488	32304.24	
		Recursos	puntos	30327.44	26194.168	27540.6	
		Ecosistema	puntos	18174.728	17315.584	13178.88	
	PILAR SOCIAL	Estética			42.9	42.9	14.3
		Número empleados	nº		85	80	60
	Tiempo retraso	días		14	7	18.6	

#### 4.4. Métodos de puntuación directa

##### 4.4.1. SAW

El primer paso a realizar en SAW es obtener el valor óptimo del cada criterio dentro de las tres alternativas a estudiar. Este será el máximo si se quiere maximizar el criterio y el mínimo si se quiere minimizar el criterio.

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Valor óptimo
Coste total (€)	<i>min</i>	817232.819	665128.548	596494.006	596494.006
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	36991.24	31948.488	32304.24	31948.488
Recursos (puntos)	<i>min</i>	30327.44	26194.168	27540.6	26194.168
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	18174.728	17315.584	13178.88	13178.88
Estética	<i>max</i>	42.9	42.9	14.3	42.9
Número de empleados	<i>max</i>	85	80	60	85
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	14	7	18.6	7

A continuación cada puntuación  $r_{ij}$  se normaliza, de forma que dependiendo de si se quiere maximizar o minimizar, su valor normalizado  $r_{ij}'$  será:

$$r_{ij}' = \frac{r_{ij}}{\max_j r_{ij}} \quad \text{para criterios que se quieren maximizar}$$

$$r_{ij}' = \frac{\min_j r_{ij}}{r_{ij}} \quad \text{para criterios que se quieren minimizar}$$

para finalmente obtener la puntuación final de cada alternativa  $S_j$

$$S_j = \sum_{i=1}^m w_i \cdot r_{ij}'$$

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Pesos
Coste total (€)	<i>min</i>	0.73	0.90	1.00	0.4
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	0.86	1.00	0.99	0.1
Recursos (puntos)	<i>min</i>	0.86	1.00	0.95	0.1
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	0.73	0.76	1.00	0.1
Estética	<i>max</i>	1.00	1.00	0.33	0.06
Número de empleados	<i>max</i>	1.00	0.94	0.71	0.12
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	0.50	1.00	0.38	0.12
<b>PUNTUACIÓN FINAL</b>	$S_j$	0.78	0.93	0.84	

#### 4.4.2. COPRAS

El primer paso en el método COPRAS es aplicar el método SAW de forma separada a los criterios que se quieren maximizar ( $S_{+j}$ ) y minimizar ( $S_{-j}$ ), pero considerando la normalización de maximización de los criterios. Este será siempre el valor máximo de cada criterio.

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Valor máximo
Coste total (€)	<i>min</i>	817232.819	665128.548	596494.006	817232.819
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	36991.24	31948.488	32304.24	36991.24
Recursos (puntos)	<i>min</i>	30327.44	26194.168	27540.6	30327.44
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	18174.728	17315.584	13178.88	18174.728
Estética	<i>max</i>	42.9	42.9	14.3	42.9
Número de empleados	<i>max</i>	85	80	60	85
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	14	7	18.6	18.6

A partir de aquí, cada puntuación  $r_{ij}$  se normaliza a  $r_{ij}'$  de forma:

$$r_{ij}' = \frac{r_{ij}}{\max_j r_{ij}}$$

para posteriormente obtener la suma ponderada de los criterios que se quieren maximizar ( $S_{+j}$ ) y minimizar ( $S_{-j}$ ).

$$S_{+j} = \sum_{i=1}^m w_{+i} \cdot r_{+ij}'$$

$$S_{-j} = \sum_{i=1}^m w_{-i} \cdot r_{-ij}'$$

A continuación se obtiene la puntuación de cada alternativa de los criterios que se quieren maximizar ( $Z_{+j}$ ) y minimizar ( $Z_{-j}$ ), para finalmente obtener la puntuación de final de cada alternativa ( $Z_j$ ).

$$Z_{+} = S_{+j} = \sum_{i=1}^m w_{+i} \cdot v_{+ij}$$

$$Z_{-} = \frac{\sum_{j=1}^n S_{-j}}{S_{-j} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{S_{-j}}}$$

$$Z_j = S_{+j} + \frac{S_{-min} \cdot \sum_{j=1}^n S_{-j}}{S_{-j} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{S_{-min}}{S_{-j}}}$$

		<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>	<b>Alternativa 3</b>	<b>Pesos</b>
Coste total (€)	<i>min</i>	1.00	0.81	0.73	0.4
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	1.00	0.86	0.87	0.1
Recursos (puntos)	<i>min</i>	1.00	0.86	0.91	0.1
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	1.00	0.95	0.73	0.1
Estética	<i>max</i>	1.00	1.00	0.33	0.06
Número de empleados	<i>max</i>	1.00	0.94	0.71	0.12
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	0.75	0.38	1.00	0.12
	$S_{+j}$	0.18	0.17	0.10	
	$S_{-j}$	0.59	0.74	0.74	
PUNTUACIÓN +	$Z_{+j}$	0.18	0.17	0.10	
PUNTUACIÓN -	$Z_{-j}$	0.59	0.74	0.74	
<b>PUNTUACIÓN FINAL</b>	$Z_j$	<b>0.77</b>	<b>0.92</b>	<b>0.85</b>	

#### 4.5. Métodos basados en la distancia

##### 4.5.1. TOPSIS

El primer paso en el método TOPSIS consiste en buscar aquella solución que esté más cerca de la solución ideal positiva (SIP) y más lejos de la solución ideal negativa (NIP). El SIP de cada criterio será el máximo si se quiere maximizar el criterio y el mínimo si se quiere minimizar el criterio, y el NIP será el mínimo si se quiere maximizar el criterio y el máximo si se quiere minimizar el criterio.

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	(*)
Coste total (€)	<i>min</i>	817232.819	665128.548	596494.006	1210814.01
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	36991.24	31948.488	32304.24	58588.58
Recursos (puntos)	<i>min</i>	30327.44	26194.168	27540.6	48624.82
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	18174.728	17315.584	13178.88	28351.95
Estética	<i>max</i>	42.9	42.9	14.3	62.33
Número de empleados	<i>max</i>	85	80	60	131.24
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	14	7	18.6	24.31

A partir de aquí, cada puntuación  $r_{ij}$  se normaliza a  $r_{ij}'$  de forma:

$$r_{ij}' = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2}} \text{ donde } (*) \text{ es } \sqrt{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2}$$

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Pesos
Coste total (€)	<i>min</i>	0.675	0.549	0.493	0.4
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	0.631	0.545	0.551	0.1
Recursos (puntos)	<i>min</i>	0.624	0.539	0.566	0.1
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	0.641	0.611	0.465	0.1
Estética	<i>max</i>	0.688	0.688	0.229	0.06
Número de empleados	<i>max</i>	0.648	0.610	0.457	0.12
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	0.576	0.288	0.765	0.12

para posteriormente obtener criterios normalizados relativos de cada criterio para cada alternativa ( $v_{ij}$ ), y luego el correspondiente al SIP ( $v^*$ ) y NIP ( $v^-$ ).

$$v_{ij} = w_i \cdot r_{ij}'$$

A continuación se obtiene la distancia euclidiana ( $L_2$ ) al SIP ( $D_j^*$ ) y SIN ( $D_j^-$ ) de cada alternativa, y finalmente la distancia relativa al ideal ( $C_j^*$ ):

$$D_j^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^*)^2}$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2}$$

$$C_j^* = D_j^- / (D_j^* + D_j^-)$$

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$v^*$	$v^-$
Coste total (€)	<i>min</i>	0.270	0.220	0.197	0.197	0.270
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	0.063	0.055	0.055	0.055	0.063
Recursos (puntos)	<i>min</i>	0.062	0.054	0.057	0.054	0.062
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	0.064	0.061	0.046	0.046	0.064
Estética	<i>max</i>	0.041	0.041	0.014	0.041	0.014
Número de empleados	<i>max</i>	0.078	0.073	0.055	0.078	0.055
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	0.069	0.035	0.092	0.035	0.092
DISTANCIA AL SIP		$D_j^*$	0.083	0.027	0.068	
DISTANCIA AL SIN		$D_j^-$	0.042	0.084	0.076	
<b>PUNTUACIÓN FINAL</b>		$C_j^*$	<b>0.337</b>	<b>0.754</b>	<b>0.528</b>	



#### 4.5.2. VIKOR

El primer paso en el método VIKOR, al igual que en el método TOPSIS consiste en buscar aquella solución que esté más cerca de la solución ideal positiva (SIP) y más lejos de la solución ideal negativa (NIP). A pesar de no usar el NIP para obtener distancias, se utiliza para la normalización de los criterios.

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Valor óptimo	Valor pésimo
Coste total (€)	<i>min</i>	817232.819	665128.548	596494.006	596494.01	817232.82
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	36991.24	31948.488	32304.24	31948.49	36991.24
Recursos (puntos)	<i>min</i>	30327.44	26194.168	27540.6	26194.17	30327.44
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	18174.728	17315.584	13178.88	13178.88	18174.73
Estética	<i>max</i>	42.9	42.9	14.3	42.90	14.30
Número de empleados	<i>max</i>	85	80	60	85.00	60.00
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	14	7	18.6	7.00	18.60

A partir de aquí, cada puntuación  $r_{ij}$  se normaliza a  $r_{ij}'$  de forma:

$$r_{ij}' = (r_i^* - r_{ij}) / (r_i^* - r_i^-)$$

Para posteriormente obtener las distancias de Manhattan ( $L_1$ , S) e infinitas ( $L_\infty$ , R) de cada alternativa.

$$S_j = \sum_{j=1}^m w_i \cdot r_{ij}$$

$$R_j = \max[w_i \cdot r_{ij}]$$

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Pesos
Coste total (€)	<i>min</i>	1.000	0.311	0.000	0.4
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	1.000	0.000	0.071	0.1
Recursos (puntos)	<i>min</i>	1.000	0.000	0.326	0.1
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	1.000	0.828	0.000	0.1
Estética	<i>max</i>	0.000	0.000	1.000	0.06
Número de empleados	<i>max</i>	0.000	0.200	1.000	0.12
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	0.603	0.000	1.000	0.12
		$S_j$	0.772	0.231	0.340
		$R_j$	0.400	0.124	0.120

A continuación se obtiene la distancia relativa de cada alternativa ( $Q_j$ ). En el método VIKOR existe una variable que determina la importancia de cada distancia ( $v$ ). En este caso, para hacer un breve estudio de sensibilidad se tomaran los valores 0.1, 0.5 y 0.9.

$$Q_j = v \cdot \frac{(S_j - S^*)}{S^- - S^*} + (1 - v) \cdot \frac{(R_j - R^*)}{R^- - R^*}$$

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	v
	$Q_j$	1.000	0.014	0.020	0.1
<b>PUNTUACIÓN FINAL</b>	$Q_j$	1.000	0.008	0.100	0.5
	$Q_j$	1.000	0.002	0.180	0.9

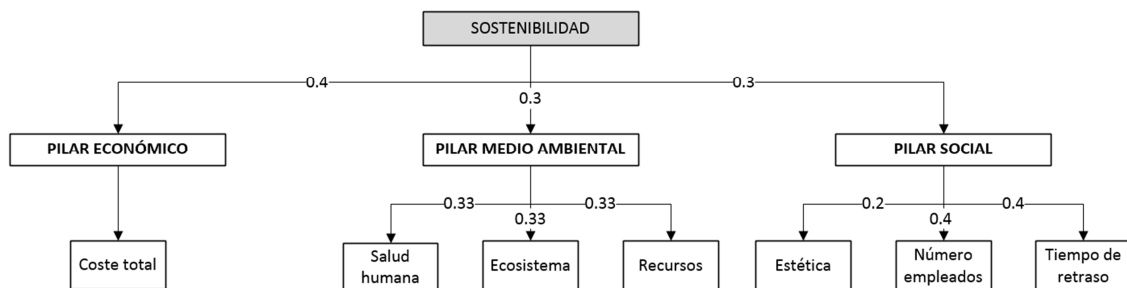
#### 4.6. Métodos de comparación a pares

##### 4.6.1. AHP y MACBETH

Los métodos AHP y MACBETH son útiles para obtener los pesos de los diferentes criterios, así como para la valoración de criterios subjetivos. En este caso de estudio, los pesos ya han sido asignados, y prácticamente todos los criterios se pueden cuantificar, por lo tanto, solo se ha usado para la valoración de la estética de las diferentes alternativas. . Para ello se considera que las alternativas 1 y 2 son igual de buenas (son la misma tipología), y ambas alternativas son moderadamente más buenas respecto a la alternativa 3. Esto implica la siguiente matriz AHP, con la valoración final de la estética.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Valoración
Alternativa 1	1	1	3	<b>0.429</b>
Alternativa 2	1	1	3	<b>0.429</b>
Alternativa 3	0.3333	0.3333	1	<b>0.143</b>

Con la valoración de la estética, ya se tienen todos los pesos y valoraciones de los criterios. Una de las ventajas del método AHP respecto al MACBETH, es que al mostrar una estructura jerárquica se pueden ver las valoraciones de las diferentes alternativas nivel a nivel.



A partir de aquí, cada puntuación  $r_{ij}$  se normaliza a  $r_{ij}^*$  y considerando los pesos de cada nivel jerárquico se obtienen la importancia de cada alternativa en cada nivel.

		<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>	<b>Alternativa 3</b>
Coste total (€)	<i>min</i>	0.28	0.34	0.38
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	0.3	0.35	0.35
Recursos (puntos)	<i>min</i>	0.31	0.36	0.34
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	0.29	0.31	0.4
Estética	<i>max</i>	0.43	0.43	0.14
Número de empleados	<i>max</i>	0.38	0.36	0.27
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	0.27	0.53	0.2
<hr/>				
Pilar económico		0.28	0.34	0.38
Pilar medio ambiental		0.33	0.36	
Pilar social		0.34	0.44	0.22
<hr/>				
<b>PUNTUACIÓN FINAL</b>		<b>0.3</b>	<b>0.37</b>	<b>0.32</b>

#### 4.6.2. ANP

El método ANP es una evolución del método AHP, que trata de solventar el principal problema del AHP, el cual es que no considera la interrelación entre criterios. Para ello se parte de la misma base que el método AHP en cuanto a la normalización de los criterios.

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Coste total (€)	<i>min</i>	0.28	0.34	0.38
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	0.3	0.35	0.35
Recursos (puntos)	<i>min</i>	0.31	0.36	0.34
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	0.29	0.31	0.4
Estética	<i>max</i>	0.43	0.43	0.14
Número de empleados	<i>max</i>	0.38	0.36	0.27
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	0.27	0.53	0.2

*\*Nota: En las siguientes tablas, las alternativas 1, 2 y 3 pasan a ser A1, A2, y A3; y los criterios coste total, salud humana, recursos, ecosistema, estética, número de empleados y tiempo de retraso pasan a ser CT, SH, R, Ec, Es, nº E y TR.*

Partiendo de esta base, el primer paso es generar la matriz interfactorial, la cual indica la relación existente entre criterio colocando un 1. Además se indica que hay dependencia entre los criterios y alternativas, alternativas y criterios, y interdependencia entre alternativas.

	A1	A2	A3	CT	SH	R	Ec	Es	nº E	TR
A1										
A2		0					1			
A3										
CT				0	1	1	1	0	0	0
SH				0	0	1	1	0	0	0
R				0	1	0	1	0	0	0
Ec				0	1	1	0	0	0	0
Es				0	0	0	0	0	0	0
nº E				1	0	0	0	0	0	0
TR				1	0	0	0	0	1	0

A continuación se define la supermatriz ponderada, en la cual se sustituyen los valores de 1 por el peso que determina la influencia de un criterio respecto a las alternativas, de las alternativas respecto los criterios o los criterios respecto los criterios.

	A1	A2	A3	CT	SH	R	Ec	Es	nº E	TR
A1	0	0	0	0.28	0.30	0.31	0.29	0.43	0.38	0.27
A2	0	0	0	0.34	0.35	0.36	0.31	0.43	0.36	0.53
A3	0	0	0	0.38	0.35	0.34	0.40	0.14	0.27	0.20
CT	0.40	0.30	0.30	0	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	0	0	0
SH	0.10	0.10	0.10	0	0	<b>0.25</b>	<b>0.25</b>	0	0	0
R	0.10	0.10	0.10	0	<b>0.25</b>	0	<b>0.25</b>	0	0	0
Ec	0.10	0.10	0.10	0	<b>0.25</b>	<b>0.25</b>	0	0	0	0
Es	0.10	0.10	0.15	0	0	0	0	0	0	0
nº E	0.05	0.20	0.10	<b>0.5</b>	0	0	0	0	0	0
TR	0.15	0.10	0.15	<b>0.5</b>	0	0	0	0	<b>1</b>	0

Pero esta supermatriz no es estocástica, ya que todas las columnas no suman 1. Para ello suponiendo que las importancias de las alternativas respecto a los criterios y de los criterios respecto a las alternativas son iguales ( $w = 0.5$ ), se multiplican las columnas que sumen dos por su peso correspondiente. En este caso 0.5.

	A1	A2	A3	CT	SH	R	Ec	Es	nº E	TR
A1	0	0	0	0.14	0.15	0.15	0.15	0.43	0.19	0.27
A2	0	0	0	0.17	0.18	0.18	0.15	0.43	0.18	0.53
A3	0	0	0	0.19	0.17	0.17	0.20	0.14	0.13	0.20
CT	0.40	0.30	0.30	0	<b>0.25</b>	<b>0.25</b>	<b>0.25</b>	0	0	0
SH	0.10	0.10	0.10	0	0	<b>0.125</b>	<b>0.125</b>	0	0	0
R	0.10	0.10	0.10	0	<b>0.125</b>	0	<b>0.125</b>	0	0	0
Ec	0.10	0.10	0.10	0	<b>0.125</b>	<b>0.125</b>	0	0	0	0
Es	0.10	0.10	0.15	0	0	0	0	0	0	0
nº E	0.05	0.20	0.10	<b>0.25</b>	0	0	0	0	0	0
TR	0.15	0.10	0.15	<b>0.25</b>	0	0	0	0	<b>0.5</b>	0

Finalmente se obtiene la supermatriz límite, como resultado de multiplicar la supermatriz ponderada por ella misma las veces que haga falta hasta que todas las columnas sean igual. Con esta matriz vemos la importancia de las alternativas y el peso de influencia de cada criterio.

<b>A1</b>	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121
<b>A2</b>	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166
<b>A3</b>	0.108	0.108	0.108	0.108	0.108	0.108	0.108	0.108	0.108	0.108
<b>CT</b>	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170
<b>SH</b>	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
<b>R</b>	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
<b>Ec</b>	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
<b>Es</b>	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
<b>nº E</b>	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093
<b>TR</b>	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140

#### 4.7. Métodos de superación

##### 4.7.1. ELECTRE

El primer paso en el método ELECTRE es obtener el valor óptimo del cada criterio dentro de las tres alternativas a estudiar. Este será el máximo si se quiere maximizar el criterio y el mínimo si se quiere minimizar el criterio.

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Valor óptimo
Coste total (€)	<i>min</i>	817232.819	665128.548	596494.006	596494.006
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	36991.24	31948.488	32304.24	31948.488
Recursos (puntos)	<i>min</i>	30327.44	26194.168	27540.6	26194.168
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	18174.728	17315.584	13178.88	13178.88
Estética	<i>max</i>	42.9	42.9	14.3	42.9
Número de empleados	<i>max</i>	85	80	60	85
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	14	7	18.6	7

A continuación cada puntuación  $r_{ij}$  se normaliza, de forma que dependiendo de si se quiere maximizar o minimizar, su valor normalizado  $r_{ij}'$  será:

$$r_{ij}' = \frac{r_{ij}}{\max_j r_{ij}} \quad \text{para criterios que se quieren maximizar}$$

$$r_{ij}' = \frac{\min_j r_{ij}}{r_{ij}} \quad \text{para criterios que se quieren minimizar}$$

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Pesos
Coste total (€)	<i>min</i>	7.30	8.97	10.00	0.4
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	8.64	10.00	9.89	0.1
Recursos (puntos)	<i>min</i>	8.64	10.00	9.51	0.1
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	7.25	7.61	10.00	0.1
Estética	<i>max</i>	10.00	10.00	3.33	0.06
Número de empleados	<i>max</i>	10.00	9.41	7.06	0.12
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	5.00	10.00	3.76	0.12

para finalmente obtener los índices de concordancia ( $c_{jk}$ ) y un índice de discordancia ( $d_{jk}$ ).

Por un lado, el índice de concordancia ( $c_{jk}$ ) de una alternativa  $A_j$  sobre otra alternativa  $A_k$  es la suma de los pesos de aquellos criterios en los que la alternativa  $A_j$  es mejor que la alternativa  $A_k$ . Esto se muestra en la siguiente matriz, donde además se indica  $c^*$ , que es el umbral de concordancia.



$$c_{jk} = \sum_{i=1}^n w_i \text{ con } j, k = 1, \dots, n \text{ y } j \neq k$$

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	
Alternativa 1	-	0.18	0.30	0.51
Alternativa 2	0.88	-	0.50	<b>c*=0.6</b>
Alternativa 3	0.70	0.50	-	

Por otro lado, el índice de discordancia ( $d_{jk}$ ) de una alternativa  $A_j$  sobre otra alternativa  $A_k$  es la máxima diferencia existente entre cualquier criterio normalizado entre las alternativas  $A_j$  y  $A_k$  (en caso de que la alternativa  $A_j$  sea superior a la  $A_k$  en todos los criterios, el índice de discordancia será 0). Esto se muestra en la siguiente matriz, donde además se indica  $d^*$ , que es el umbral de discordancia.

$$d_{jk} = \max_{i=1, \dots, m} [r_{ik}' - r_{ij}'] \text{ con } j, k = 1, \dots, n \text{ y } j \neq k$$

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	
Alternativa 1	-	5.00	2.75	4.01
Alternativa 2	0.59	-	2.39	<b>d* = 2.75</b>
Alternativa 3	6.67	6.67	-	

Con toda esta información, ya se puede realizar la comparación por pares y obtener la posición global. Una alternativa  $A_j$  supera a  $A_k$  si:

$$c_{jk} > c^* \text{ y } d_{jk} < d^*$$

	D. FILA	D. COLUMNA	Diferencia	Posición
Alternativa 1	0	A2	-1	3
Alternativa 2	A1	0	1	1
Alternativa 3	0	0	0	2

Por lo tanto, se obtiene que la alternativa 1 es dominada por la alternativa 2 (dominación por columnas) y que la alternativa 2 domina la alternativa 1 (dominación por filas). Entre las alternativas 1 y 3, y 2 y 3 no hay dominancia existente. Viendo la diferencia entre la dominación entre filas y columnas se observa que la alternativa 2 se posiciona en 1ª posición, seguida de la alternativa 3 y la alternativa 1.

#### 4.7.2. PROMETHEE

Al igual que ELECTRE el método PROMETHEE se basa en comparar las alternativas por pares. Pero en este caso, cada criterio tiene asociada una función de preferencia definida por los parámetros  $q$  y  $p$ , que indican el grado de preferencia de una alternativa  $A_j$  respecto a otra  $A_k$ . En la siguiente tabla se muestra la matriz de decisión junto a la gráfica utilizada para cada criterio y los parámetros seleccionados.

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Gráfica	$q$	$p$
Coste total (€)	<i>min</i>	817232.819	665128.548	596494.006	V	-60000	-240000
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	36991.24	31948.488	32304.24	III	0	-12000
Recursos (puntos)	<i>min</i>	30327.44	26194.168	27540.6	III	0	-12000
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	18174.728	17315.584	13178.88	III	0	-12000
Estética	<i>max</i>	42.9	42.9	14.3	V	20	50
Número de empleados	<i>max</i>	85	80	60	IV	25	50
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	14	7	18.6	V	-5	-10

Posteriormente, se obtiene la diferencia de las puntuaciones de los criterios entre diferentes alternativas, para a continuación obtener el grado de preferencia de una alternativa  $A_j$  respecto a otra  $A_k$ .

		A1 > A2	A1>A3	A2>A3	A2>A1	A3>A1	A3>A2
Coste total (€)	<i>min</i>	152104.27	220738.81	68634.54	-152104.271	-220739	-68634.5
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	5042.75	4687.00	-355.75	-5042.752	-4687	355.752
Recursos (puntos)	<i>min</i>	4133.27	2786.84	-1346.43	-4133.272	-2786.84	1346.432
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	859.14	4995.85	4136.70	-859.144	-4995.85	-4136.7
Estética	<i>max</i>	0.00	28.60	28.60	0	-28.6	-28.6
Número de empleados	<i>max</i>	5.00	25.00	20.00	-5	-25	-20
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	7.00	-4.60	-11.60	-7	4.6	11.6

		A1 > A2	A1>A3	A2>A3	A2>A1	A3>A1	A3>A2	Peso
Coste total (€)	<i>min</i>	0.000	0.000	0.000	0.512	0.893	0.048	0.4
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	0.000	0.000	0.030	0.420	0.391	0.000	0.1
Recursos (puntos)	<i>min</i>	0.000	0.000	0.112	0.344	0.232	0.000	0.1
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	0.000	0.000	0.000	0.072	0.416	0.345	0.1
Estética	<i>max</i>	0.000	0.287	0.287	0.000	0.000	0.000	0.06
Número de empleados	<i>max</i>	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.12
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	0.000	0.000	1.000	0.400	0.000	0.000	0.12

Con todo esto, ya se puede obtener un índice de preferencia multi-criterio de la alternativa  $A_j$  respecto a la alternativa  $A_k$ . Esto se puede ver en la siguiente matriz, donde también se han obtenido los flujos de ordenación positivos ( $\emptyset^+$ ) y negativos ( $\emptyset^-$ ) para cada alternativa.

$$\pi(a, b) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot P_i(a, b)$$

$$\emptyset^+(A_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \pi(A_j, A_k)$$

$$\emptyset^-(A_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \pi(A_k, A_j)$$

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\emptyset^+$
Alternativa 1	-	0.000	0.077	0.039
Alternativa 2	0.336	-	0.151	0.244
Alternativa 3	0.461	0.054	-	0.257
$\emptyset^-$	0.399	0.027	0.114	

Con toda esta información, ya se puede realizar la comparación por pares y obtener la posición global. Una alternativa  $A_j$  supera a  $A_k$  si:

$$\emptyset^+(A_j) \geq \emptyset^+(A_k) \text{ y } \emptyset^-(A_j) \leq \emptyset^-(A_k)$$

Por lo tanto, solo se deduce que las alternativas 2 y 3 son preferentes respecto la 1.

El ranking global se puede obtener restando los flujos de ordenación positivos ( $\emptyset^+$ ) y negativos ( $\emptyset^-$ ) de cada alternativa:

	Puntuación	Posición
Alternativa 1	-0.360	3
Alternativa 2	0.217	1
Alternativa 3	0.143	2

#### 4.8. Métodos de funciones de utilidad y valor

##### 4.6.1. MIVES

El primer paso en el método MIVES es determinar las funciones de satisfacción y los parámetros que las definen para cada criterio.

		Gráfica	Pi	Ki	Ci	Xmin	Xmax
Coste total (€)	<i>min</i>	S dec.	4	0.15	500000	400000	1200000
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	Cóncava dec.	0.5	1.5	27500	5000	50000
Recursos (puntos)	<i>min</i>	Cóncava dec.	0.5	1.5	27500	5000	50000
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	Cóncava dec.	0.5	1.5	27500	5000	50000
Estética	<i>max</i>	Convexa crec.	4	0.1	25	0	50
Número de empleados	<i>max</i>	Convexa crec.	2	0.1	60	20	100
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	S dec.	4	0.15	12	0	40

A partir de ahí los criterios se normalizan mediante las funciones de valor, para finalmente mediante los pesos relativos de cada criterio obtener la puntuación final de cada alternativa.

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Coste total (€)	<i>min</i>	817232.819	665128.548	596494.006
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	36991.24	31948.488	32304.24
Recursos (puntos)	<i>min</i>	30327.44	26194.168	27540.6
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	18174.728	17315.584	13178.88
Estética	<i>max</i>	42.9	42.9	14.3
Número de empleados	<i>max</i>	85	80	60
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	14	7	18.6

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Peso
Coste total (€)	<i>min</i>	0.08	0.28	0.44	0.4
Salud humana (puntos)	<i>min</i>	0.75	0.82	0.82	0.1
Recursos (puntos)	<i>min</i>	0.84	0.88	0.87	0.1
Ecosistema (puntos)	<i>min</i>	0.94	0.94	0.97	0.1
Estética	<i>max</i>	0.73	0.73	0.01	0.06
Número de empleados	<i>max</i>	0.68	0.58	0.27	0.12
Tiempo retraso (días)	<i>min</i>	0.96	1.00	0.78	0.12
<b>PUNTUACIÓN TOTAL</b>		<b>0.53</b>	<b>0.61</b>	<b>0.57</b>	

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES**

En este trabajo se ha realizado un estudio del proceso de toma de decisiones para la valoración de la sostenibilidad de puentes de hormigón aplicando los métodos de toma de decisión multi-atributo más importantes. Para ello, primero se ha realizado un acercamiento al concepto de sostenibilidad en las estructuras y al proceso de toma de decisiones, clasificando y describiendo los métodos de toma de decisión multi-atributo más importantes. Posteriormente se ha realizado un estudio bibliográfico para conocer, tanto los métodos de decisión multi-atributo como los criterios más usados, aplicados en la valoración de la sostenibilidad de los puentes de hormigón. Finalmente se ha realizado un caso práctico comparando tres alternativas en los métodos de toma de decisión multi-atributo más conocidos.

El desarrollo sostenible de la sociedad es un aspecto muy importante a considerar, más si cabe, en la actualidad debido al incremento de la población, incremento de la actividad humana y reducción de recursos naturales. El desarrollo sostenible implica satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras, compatibilizando factores económicos, medio ambientales y sociales, convirtiéndose en los tres pilares sobre los que se fundamentan la sostenibilidad, siendo necesario un proceso como el de la toma de decisión multi-criterio para la valoración de alternativas frente a criterios enfrentados. Este desarrollo sostenible es, aún más importante en el sector de la construcción, ya que es una de los sectores más activos. Por esta razón, la búsqueda de los criterios que mejor pueden representar los tres pilares básicos de la sostenibilidad en este sector, y el estudio de los métodos aplicables para la valoración de la sostenibilidad tiene su importancia tanto en la actualidad como para el futuro, ya que en la tendencia futura de la estructuras se encuentra la búsqueda de la sostenibilidad.

En una primera parte, tras realizar un estado del arte de los trabajos que realizan la valoración de la sostenibilidad en los puentes de hormigón se pueden obtener varias conclusiones. La primera conclusión, y fundamental, es que la valoración de la sostenibilidad de las estructuras depende de muchas variables que pueden hacer que la solución se decante por una alternativa u otra: los criterios considerados, los pesos asignados, y los métodos de toma de decisión multi-atributo utilizados. Todo esto hace del proceso de toma de decisión multi-criterio un proceso muy complicado que tiene

asociado una gran cantidad de incertidumbre. Esta incertidumbre se puede tener en cuenta mediante herramientas de apoyo del proceso de toma de decisiones como la teoría fuzzy o los números grey, a costa de incrementar la complejidad del proceso.

No obstante, tras realizar el estudio de los métodos de toma de decisión multi-atributo y el estado del arte de la aplicación de estos métodos para la valoración de la sostenibilidad en los puentes de hormigón se pueden sacar una serie de conclusiones y tendencias:

- Los métodos SAW y COPRAS, a pesar de ser los más sencillos, son muy indicados para problemas en los que todas las variables son cuantitativas. En el caso de la valoración de la sostenibilidad de puentes de hormigón existen tanto variables cuantitativas como variables cualitativas, por lo que ambos métodos son poco usados.
- Los métodos TOPSIS y VIKOR, son muy útiles cuando se conoce la solución ideal óptima y la solución ideal no óptima. Por lo tanto, a parte de su uso en la toma de decisión multi-atributo, se pueden usar para la selección de una alternativa dentro de una frontera de Pareto.
- La filosofía de los métodos de comparación a pares, hace que su uso sea muy indicado para la valoración de criterios subjetivos. A pesar de las limitaciones del método AHP explicadas en el punto 2.2.3, es el método de toma de decisión multi-atributo más usado debido a su sencillez y popularidad. Por otro lado, el método ANP que nació para solventar los problemas del método AHP, se utiliza con menor frecuencia.
- Los métodos ELECTRE y PROMETHEE son muy indicados para la clasificación de alternativas según grado de dominancia por pares. Estos métodos son de gran utilidad para problemas discretos de toma de decisión multi-atributo. De los dos, el método PROMETHEE es el más usado para la valoración de la sostenibilidad en puentes de hormigón, posiblemente debido que la comparación de los criterios entre alternativas se realiza mediante funciones de preferencia, lo cual permite asignar una u otra función dependiendo de las características de cada criterio.

- Finalmente, el método MIVES, desarrollado para la valoración de la sostenibilidad de estructuras, todavía no se ha utilizado para la valoración de la sostenibilidad de puentes de hormigón en literatura científica.

Además, también se ha podido realizar un estudio de los criterios más comunes para la valoración de los diferentes pilares básicos de la sostenibilidad. Para la valoración del impacto económico los autores utilizan muchos términos diferentes, aunque la gran mayoría se refiere al coste. Estos criterios de coste pueden concretar una fase determinada del ciclo de vida del puente como [49,52] (*Production cost, Construction period, Keep cost during service life*) o el coste global del puente como [51]. Pero al fin y al cabo, para realizar una valoración completa de la sostenibilidad tenemos que abarcar todo el ciclo de vida, por lo que el mejor criterio económico será el coste total de la obra. Para la valoración del impacto medio ambiental, ya hay más discrepancias. Muchos autores no concretan los criterios utilizados para la valoración del impacto medio ambiental y se limitan a utilizar términos genéricos como *environmental adaptability* [49] o *environmental impact* [50]. En general, los autores que si determinan los criterios que usan para la valoración del impacto ambiental, usualmente utilizan el CO<sub>2</sub>, la energía, o ambos. A pesar de que ambos criterios son importantes, no son suficientes para obtener un perfil medio ambiental completo. Para obtener dicho perfil medio ambiental completo, se debe utilizar los métodos de análisis de ciclo de vida como [52]. Estos métodos pueden proporcionar una valoración medio ambiental completa, y que mediante software especializado como Gabi, SimaPro, o OpenLca, se pueden normalizar las categorías de impacto o daño, permitiendo obtener una valoración final única del impacto medio ambiental. Por último, la valoración del impacto social es la más confusa, ya que depende mucho de las características de la construcción a realizar. Los autores utilizan multitud de criterios para tratar de valorar el impacto social, siendo los dos más comunes la estética [48,50,54] y el tiempo de espera por congestión de tráfico o desvío [52,63].

En una segunda parte, se han aplicado todos los métodos de decisión multi-atributo para ver las semejanzas y diferencias entre estos. En la tabla 5.1 se puede observar un resumen de todos los resultados obtenidos en los diferentes métodos. A pesar de las diferencias existentes entre los métodos, la alternativa 2 es la mejor valorada en todos

los casos. La alternativa 3 es la segunda mejor valorada seguida de la alternativa 1, a excepción del método ANP.

Los métodos de puntuación directa (SAW y COPRAS) ofrecen prácticamente la misma puntuación, algo que se podría intuir debido a que el método COPRAS es una evolución del método SAW. Esta evolución solo sirve para valorar criterios negativos o que se quieren minimizar, cosa que el método SAW soluciona con diferentes técnicas de normalización. Los métodos basados en la distancia (TOPSIS y VIKOR), a pesar de tener una base en común, tienen diferencias notables, incluido la forma de dar la puntuación final. En el caso de TOPSIS, a pesar de que se calculan las distancias al SIP y SIN, al final se hace una normalización y por este motivo se obtiene una mayor puntuación para la mejor alternativa. En cambio, el caso de VIKOR es diferente, dando como resultado la distancia de cada alternativa al ideal. Con el método VIKOR, además se ha realizado un estudio de sensibilidad modificando la variable  $v$ . En dicho estudio se observa que a medida que el valor de  $v$  baja, la alternativa 2 va perdiendo importancia y la alternativa 3 va ganándola. Esto se debe a que la distancia infinita beneficia a la alternativa 3 ya que en este caso  $R_2 = 0.124$  y  $R_3 = 0.120$ . Los métodos basados en la comparación a pares (AHP, ANP y MACBETH) son muy útiles para criterios subjetivos, por ese motivo se la comparación pareada se ha utilizado para obtener la puntuación de la estética de las tres alternativas. El método AHP permite jerarquizar los criterios, lo cual es muy útil para englobar criterios comunes. Se puede observar que a pesar de que la alternativa 3 tiene una mejor valoración en el pilar económico y medio ambiental que la alternativa 2, la valoración global es favorable a la alternativa 2. El método ANP permite tener en cuenta la interdependencia entre criterios. Por este motivo, la alternativa 1 pasa a ser la segunda mejor valorada, ya que la alternativa 3 es superior a la alternativa 1 en los pilares económicos y medio ambientales, que están relacionados y la alternativa 1 es superior a la alternativa 3 en el pilar social, que tiene una mayor independencia con el resto. Los métodos de superación (ELECTRE y PROMETHEE) ofrecen tanto un ranking global de las alternativas, como una comparación entre ellas. En el ranking global de las alternativas se observa que la alternativa 2 está en primera posición y la alternativa 1 en segunda posición, pero si observamos las comparaciones entre estas dos se deduce que ninguna es estrictamente superior a la otra. Finalmente, el método MIVES ofrece unos resultados similares a la tendencia mostrada.



**Tabla 5.1. Puntuación métodos MADM**

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
SAW	Puntuación final	0.78	0.93	0.84
COPRAS	Puntuación final	0.77	0.92	0.85
TOPSIS	Puntuación final	0.34	0.75	0.53
VIKOR	Puntuación	v = 0.1	1.00	0.014
		v = 0.5	1.00	0.008
		v = 0.9	1.00	0.002
AHP	Puntuación económica	0.28	0.34	0.38
	Puntuación medio ambiental	0.30	0.33	0.36
	Puntuación social	0.34	0.44	0.22
ANP	Puntuación final	0.30	0.37	0.32
	Puntuación final	0.12	0.17	0.11
ELECTRE	Ranking	3	1	2
PROMETHEE	Ranking	3	1	2
MIVES	Puntuación final	-0.36	0.22	0.14

El proceso de toma de decisión multi-atributo tiene siempre los mismos pasos, aunque la forma de llevar a cabo esos pasos es lo que diferencia unos métodos de otros. Todos los métodos tienen sus características, fortalezas y debilidades. A pesar de que algunos métodos tienen unas ventajas sobre otros en algunos aspectos, la elección de uno u otro es una elección subjetiva. No obstante, estos métodos son amoldables, se pueden modificar y combinar entre ellos para conseguir un método combinado que tenga todas las características que el decisor desee

## Referencias

1. Hwang, C. L.; Yoon, K. *Multiple attribute decision making: Methods and Applications*; 1981.
2. 91th United States Congress *National Environmental Policy Act (NEPA)*; Washinhton, USA, 1969.
3. World Commission on Environment and Development *Our common future* 1987, 383.
4. Waas, T.; Hugé, J.; Block, T.; Wright, T.; Benitez-Capistros, F.; Verbruggen, A. Sustainability Assessment and Indicators: Tools in a Decision-Making Strategy for Sustainable Development. *Sustainability* **2014**, *6*, 5512–5534.
5. Intergovernmental Panel on Climate Change *Climate change: Fifth assessment report*; 2014.
6. Ramesh, T.; Prakash, R.; Shukla, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy Build.* **2010**, *42*, 1592–1600.
7. Petek Gursel, A.; Masanet, E.; Horvath, A.; Stadel, A. Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cem. Concr. Compos.* **2014**, *51*, 38–48.
8. Taylor, M.; Tam, C.; Gielen, D. Energy Efficiency and CO2 Emissions from the Global Cement Industry. In *International Energy Agency*; Paris, 2006; pp. 4–5.
9. Polese, M.; Stren, R. The social sustainability of cities: Diversity and the management of change. *Univ. Toronto Press* **2000**, 15–16.
10. McKenzie, S. Social sustainability: Towards some definitions, Working Paper Series n°. 27. *Hawke Res. Inst.* **2004**.
11. Goodland, R. The Concept of Environmental Sustainability. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **1995**, *26*, 1–24.
12. Hill, R. C.; Bowen, P. A. Sustainable construction: principles and a framework for attainment. *Constr. Manag. Econ.* **1997**, *15*, 223–239.
13. Gardner, J. E. Decision making for sustainable development: selected approaches to

environmental assessment and management. *Environ. Impact Assess. Rev.* **1989**, *9*, 337–366.

14. Cinelli, M.; Coles, M.; Kirwan, K. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecol. Indic.* **2014**, *46*, 138–148.

15. Hajkovicz, S.; Collins, K. A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resour. Manag.* **2007**, *21*, 1553–1566.

16. De Brito, M. M.; Evers, M. Multi-criteria decision-making for flood risk management: A survey of the current state of the art. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2016**, *16*, 1019–1033.

17. Podvezko, V. The Comparative Analysis of MCDA Methods SAW and COPRAS. *Eng. Econ.* **2011**, *22*, 134–146.

18. Tamiz, M.; Jones, D.; Romero, C. Goal programming for decision making : An overview of the current state-of-the-art. *Eur. J. Oper. Res.* **1998**, *111*, 569–581.

19. Ballesteros, E. Compromise programming: A utility-based linear-quadratic composite metric from the trade-off between achievement and balanced (non-corner) solutions. *Eur. J. Oper. Res.* **2007**, *182*, 1369–1382.

20. Opricovic, S.; Tzeng, G. H. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Eur. J. Oper. Res.* **2004**, *156*, 445–455.

21. Görener, A. Comparing AHP and ANP: An application of strategic decisions making in a manufacturing company. *Int. J. Bus. Soc. Sci.* **2012**, *3*, 194–208.

22. Bana e Costa, C. A.; Chagas, M. P. A career choice problem: An example of how to use MACBETH to build a quantitative value model based on qualitative value judgments. *Eur. J. Oper. Res.* **2004**, *153*, 323–331.

23. Behzadian, M.; Kazemzadeh, R. B.; Albadvi, A.; Aghdasi, M. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *Eur. J. Oper. Res.* **2010**, *200*, 198–215.

24. Govindan, K.; Jepsen, M. B. ELECTRE: A comprehensive literature review on

methodologies and applications. *Eur. J. Oper. Res.* **2016**, 250, 1–29.

25. Sarabando, P.; Dias, L. C. Simple procedures of choice in multicriteria problems without precise information about the alternatives' values. *Comput. Oper. Res.* **2010**, 37, 2239–2247.

26. Pons, O.; De La Fuente, A. Integrated sustainability assessment method applied to structural concrete columns. **2013**.

27. Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A. Determination of an efficient contractor by using the new method of multicriteria assessment. *Assessment, Int. Symp. Organ. Manag. Constr. Shap. Theory Pr. tice; vol. 2; Manag. Constr. Proj. Manag. Risk* **1996**, 94–104.

28. Yu, P. L. A class of solutions for group decision problems. *Manage. Sci.* **1973**, 19, 936–946.

29. Zeleny, M. *Multiple criteria decision making*; McGraw-Hil.; New York, 1982.

30. Chen, S. J.; Hwang, C. L. *Fuzzy multiple attribute decision making: Methods and applications*; Springer-V.; Berlin.

31. Opricovic, S. *Multicriteria optimization of civil engineering systems*; Faculty of civil engineering, Belgrade, 1998.

32. Saaty, T. L. *The Analytic Hierarchy Process*; New York, 1980.

33. Bahurmoz, A. M. A. The Analytic Hierarchy Process: A Methodology for Win-Win Management. *JKAU Econ. Adm* **2006**, 20, 3–16.

34. Miller, G. A. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information.

35. Saaty, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Math. Model.* **1987**, 9, 161–176.

36. Saaty, T. L. *Decision making with dependence and feedback: The analytic network process*; Ellsworth.; Pittsburgh, 1996.

37. Saaty, T. L.; Özdemir, M. S. *The Encyclion: A dictionary of decisions with dependence and feedback based on the analytical network process*; RWS Public.;

Pittsburgh, 2005.

38. Zaim, S.; Turkyılmaz, A.; Acar, M. F.; Al-Turki, U.; Demirel, O. F. Maintenance strategy selection using AHP and ANP algorithms: a case study. *J. Qual. Maint. Eng.* **2012**, *18*, 16–29.
39. Begicevic, N.; Divjak, B.; Hunjak, T. Comparison between AHP and ANP: Case Study of Strategic Planning of E-Learning Implementation. *Development* **2007**, *1*, 1–10.
40. Bana e Costa, C. A.; Vansnick, J.-C.- MACBETH-An interactive path towards the construction fo cardinal value functions. *Int. Trans. Oper. Res.* **1994**, *1*, 489–500.
41. Salomon, V.; Montevechi, J. A compilation of comparisons on the analytic hierarchy process and others multiple criteria decision making methods: Some cases developed in Brazil. ... *Anal. Hierarchy Process. Bern* **2001**, 413–420.
42. Roy, B. Classement et choix en présence de points de vue multiples (le méthode ELECTRE). *Rev. Fr. D Inform. Rech. Oper.* **1968**, *8*, 57–75.
43. Brans, J. P.; Mareschal, B.; Vincke, P. PROMETHEE: A new family of outranking methods in multicriteria analysis. *Oper. Res.* **1984**, 408–421.
44. Brans, J. P.; Vincke, P.; Mareschal, B. How to select and how to rank projects: The Promethee method. *Eur. J. Oper. Res.* **1986**, *24*, 228–238.
45. Corrente, S.; Greco, S.; SŁowiński, R. Multiple Criteria Hierarchy Process with ELECTRE and PROMETHEE. *Omega (United Kingdom)* **2013**, *41*, 820–846.
46. Edwards, W. How to use multiattribute utility measurement for social decisionmaking. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* **1977**, *7*, 326–340.
47. Keeney, R. L.; Raiffa, H. *Decisions with multiple objective: Preferences and value tradeoffs*; Wiley.; New York, 1976.
48. Malekly, H.; Meysam Mousavi, S.; Hashemi, H. A fuzzy integrated methodology for evaluating conceptual bridge design. *Expert Syst. Appl.* **2010**, *37*, 4910–4920.
49. Wang, H.-L.; Zhang, Z.; Qin, S.-F.; Huang, C.-L. Fuzzy optimum model of semi-structural decision for lectotype. *China Ocean Eng.* **2001**, *15*, 453–466.

50. Farkas, A. Multi-criteria comparison of bridge designs. *Acta Polytech. Hungarica* **2011**, 8, 173–191.
51. Aghdaie, M. H.; Zolfani, S. H.; Zavadskas, E. K. Prioritizing constructing projects of municipalities based on AHP and COPRAS-G: A case study about footbridges in Iran. *Balt. J. Road Bridg. Eng.* **2012**, 7, 145–153.
52. Gervásio, H.; Simões Da Silva, L. A probabilistic decision-making approach for the sustainable assessment of infrastructures. *Expert Syst. Appl.* **2012**, 39, 7121–7131.
53. Ardeshir, A.; Mohseni, N.; Behzadian, K.; Errington, M. Selection of a bridge construction site using Fuzzy Analytical Hierarchy Process in Geographic Information System. *Arab. J. Sci. Eng.* **2014**, 39, 4405–4420.
54. Balali, V.; Mottaghi, A.; Shoghli, O.; Golabchi, M. Selection of appropriate material, construction technique, and structural system of bridges by use of multicriteria decision-making method. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2014**, 2431, 79–87.
55. Jakiel, P.; Fabianowski, D. FAHP model used for assessment of highway RC bridge structural and technological arrangements. *Expert Syst. Appl.* **2015**, 42, 4054–4061.
56. Pan, N.-F. Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridge construction method. *Autom. Constr.* **2008**, 17, 958–965.
57. Gu, X.; Wang, Y.; Yang, B. Method for selecting the suitable bridge construction projects with interval-valued intuitionistic Fuzzy information. *Int. J. Digit. Content Technol. its Appl.* **2011**, 5, 201–206.
58. Chou, J.-S.; Pham, A.-D.; Wang, H. Bidding strategy to support decision-making by integrating Fuzzy AHP and regression-based simulation. *Autom. Constr.* **2013**, 35, 517–527.
59. Mousavi, S. M.; Gitinavard, H.; Siadat, A. A new hesitant fuzzy Analytical Hierarchy Process method for decision-making problems under uncertainty. In *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*; 2014; pp. 622–626.
60. Chen, Y.; Okudan, G. E.; Riley, D. R. Decision support for construction method selection in concrete buildings: Prefabrication adoption and optimization. *Autom.*

*Constr.* **2010**, *19*, 665–675.

61. Sobanjo, J. O.; Stukhart, G.; James, R. W. Evaluation of projects for rehabilitation of highway bridges. *J. Struct. Eng.* **1994**, *120*, 81–99.

62. Ei-Mikawi, M.; Mosallam, A. S. A methodology for evaluation of the use of advanced composites in structural civil engineering applications. *Compos. Part B Eng.* **1996**, *27*, 203–215.

63. Abu Dabous, S.; Alkass, S. A multi-attribute ranking method for bridge management. *Eng. Constr. Archit. Manag.* **2010**, *17*, 282–291.

64. Abu Dabous, S.; Alkass, S. Decision support method for multi-criteria selection of bridge rehabilitation strategy. *Constr. Manag. Econ.* **2008**, *26*, 883–893.

65. Chen, Z.; Abdullah, A. B.; Anumba, C. J.; Li, H. ANP experiment for demolition plan evaluation. *J. Constr. Eng. Manag.* **2013**, *140*, 51–60.

66. Gervásio, H.; da Silva, L. S. Comparative life-cycle analysis of steel-concrete composite bridges. *Struct. Infrastruct. Eng.* **2008**, *4*, 251–269.

67. García-Segura, T.; Yepes, V.; Frangopol, D. M.; Yang, D. Y. Lifetime reliability-based optimization of post-tensioned box-girder bridges (in press). *Eng. Struct.* **2017**, *1*.

68. Martí, J. V.; Gonzalez-Vidoso, F.; Yepes, V.; Alcalá, J. Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing. *Eng. Struct.* **2013**, *48*, 342–352.

69. García-Segura, T.; Yepes, V.; Alcalá, J. Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2014**, *19*, 3–12.

70. International Organization for Standardization *ISO: 14040. Environmental management - life cycle assessment - principles and framework*; 2006.

71. Ecoinvent Center Ecoinvent v3.3 [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org).

72. Catalonia Institute of Construction Technology BEDEC PR/PCT ITEC material database 2016.