

## Investigación

Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte

# Application of Multicriteria Decision Methods in Evaluating Alternative Solutions for Transportation Facilities

Belén Muñoz y Manuel G. Romana

Revista de Investigación



Volumen VI, Número 2, pp. 027-046, ISSN 2174-0410

Recepción: 23 May'16; Aceptación: 1 Jun'16

1 de octubre de 2016

### Resumen

En este artículo se realiza una revisión de los métodos de decisión multicriterio discretos y de la formulación matemática de los mismos. De igual forma, se desarrolla una metodología de decisión basada en la aplicación secuencial en cascada de varios métodos de decisión, la cual, a modo de ejemplo, es aplicada al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras.

**Palabras Clave:** Método de decisión multicriterio discreto, estudio informativo, método AHP, método VIKOR.

### Abstract

This paper presents a review of multicriteria decision making methods and their mathematical formulation. Similarly, a methodology based on the sequential application of several decision methods is developed. As a specific example, it is applied to analysis of alternatives in planning stage design of facilities and infrastructures.

**Keywords:** multicriteria decision methods, AHP method, VIKOR method, facilities, planning, infrastructures.

## 1. Introducción

En una sociedad como la actual, el diseño y proyecto de las infraestructuras debe realizarse en términos de sostenibilidad, entendida ésta, no solo como la optimización de

recursos y mayor integración paisajística, sino también considerando como solución sostenible aquella que produce menores costes sociales, menores molestias a los usuarios de las infraestructuras, permite la dualidad de usos, etc. Pero en Ingeniería, para resolver un problema en ocasiones son varias las soluciones posibles que dan cumplimiento a las especificaciones estructurales, funcionales o de sostenibilidad, quedando en manos del proyectista la decisión de elegir aquella solución que, a su juicio, cumple mejor las especificaciones o factores que intervienen en el proceso de diseño.

Por lo anterior, los proyectistas deben seleccionar aquellas soluciones constructivas que mejor se adapten a los requerimientos de proyecto, de forma que la solución elegida sea la óptima entre todas las posibles. Este objetivo solo se consigue si se consideran todas las soluciones posibles y se evalúan todos los criterios que pueden afectar a la selección, ponderando de forma adecuada la importancia relativa de los mismos en cada proyecto.

Llegados a este punto del planteamiento del problema, hay que recordar una frase muy comentada en Ingeniería, y obviada en muchas ocasiones, y es que cada proyecto es diferente. Por lo cual, los requerimientos de proyecto serán diferentes, pero también los mismos requerimientos, criterios o factores tendrán una importancia relativa distinta en cada proyecto.

Esto implica que es necesario contar con una metodología que ayude en el proceso de decisión pero también que permita sistematizar todo el proceso, desde la determinación de alternativas posibles y la ponderación de criterios hasta la jerarquización y selección de las alternativas más adecuadas.

De esta forma, los proyectos de infraestructuras incluyen, como así determinan las Recomendaciones del Ministerio de Fomento del Gobierno de España, un estudio informativo en el cual se definen, valoran y comparan y las alternativas estudiadas, seleccionando la más adecuada en cada caso.

El proceso de decisión es el estudio de la identificación y elección de alternativas basadas en los valores y preferencias de la persona o equipo de personas que toma la decisión. Los métodos de decisión son una herramienta que reduce la subjetividad en la toma de decisiones mediante la creación de una serie de filtros de selección y ayuda a la elección entre alternativas complejas. Pueden servir para un propósito diferente en cada etapa, en primer lugar puede ayudar a analizar el problema, tarea u objetivo al descomponerlo en un número finito de requisitos, y una vez establecido los requisitos ayuda a su ordenación por la importancia relativa o peso de cada criterio para cada alternativa.

Son numerosos los ejemplos que existen en la bibliografía de métodos de decisión multicriterio, varios de los cuales son analizados en este artículo, pero antes de ello, hay que indicar que todos ellos parten de una matriz de decisión y que no se puede olvidar que en todos ellos, en mayor o menor medida, interviene la subjetividad del decisor.

## 2. Métodos de decisión multicriterio discretos

La aparición hacia 1943 de los trabajos de V. Neumann-Morgenstern representa el punto de partida del tratamiento científico de los problemas de decisión individual y también de las decisiones de concurrencia: juegos de estrategia, negociaciones, etc. Las investigaciones de Arrow son paralelamente, a partir de 1951, el origen del estudio de los problemas de las decisiones colectivas, fundamentales en la vida política de las sociedades modernas, [1]. Como

indica Ríos (1998), una percepción de la magnitud de la importancia del tema se tiene al considerar que al menos doce Premios Nobel: Arrow, Debreu, Koopmans, Allais, Simon, Markowitz, Frisch, Nash, Selten, Harsanyi, Kantorovich, Lucas, ... han dedicado buena parte de sus investigaciones a la matematización de los problemas de las decisiones humanas, los cuales requieren aplicaciones de matemáticas, estadísticas, informáticas, y el apoyo de psicólogos, economistas, ingenieros, militares, médicos, abogados, politólogos, etc., para de esta forma poder desarrollar metodologías que cada vez son más ambiciosas, pero siempre insuficientes y abiertas a nuevos progresos científicos, [1].

El problema de tomar decisiones en ambiente de riesgo o de incertidumbre está asociado a juegos de azar, que se estudiaron científicamente a partir de Pascal y Fermat (1654), pero es Huygens (1657) quien introduce la noción de esperanza matemática del valor monetario sobre la que se basa una regla de decisión practicada, más o menos conscientemente, por los jugadores de azar durante siglos, a saber: maximizar el valor monetario esperado, es decir, la suma de los productos de las probabilidades de los sucesos posibles por las ganancias correspondientes. Esta regla permanece como una evidencia indiscutible, asociada a la interpretación frecuencial de la probabilidad, hasta Daniel Bernoulli que, en 1738, resuelve la paradoja de San Petesburgo y publicó un importante trabajo, en el que aportó ideas importantes para el tratamiento de las decisiones en riesgo o juegos, que él llamaba brevemente riesgos. Refiriéndose a la regla del valor esperado dice Bernoulli [1]:

*“En esta regla no se toma en consideración ninguna característica de las personas, sólo las características del juego. Realmente se trataría de establecer reglas mediante las que cada uno pudiera estimar sus perspectivas al tomar riesgos teniendo en cuenta sus circunstancias financieras.”*

Por lo cual, ya Bernoulli en 1738, indicó que el proceso de decisión depende de los valores, circunstancias y preferencias del decisor. Durante la década de los 90, y en especial a finales de la misma, los métodos de toma de decisión multicriterio (MCDM, del inglés Multi-Criteria Decision Making) han comenzado a trascender del ámbito académico y se han extendido al ámbito público y empresarial. Hoy en día estas técnicas se emplean con múltiples y diversas finalidades: localización de empresas, selección de maquinaria o contratistas, predicciones financieras, definición de estrategias empresariales, análisis y selección de inversiones, análisis y selección de alternativas en infraestructuras, como es el caso de este artículo, etc. Los métodos de decisión multicriterio son poderosas herramientas que ayudan a generar consenso en contextos complejos de decisión [2].

Es muy importante hacer una distinción entre casos, si tenemos un simple o múltiple criterio. Dentro de los problemas multicriterio podemos distinguir dos grupos diferenciados, por un lado aquellos problemas de decisión en los que el conjunto de alternativas a considerar por parte del centro decisor es infinito, tanto en el caso monocriterio como en el multicriterio, suelen denominarse problemas continuos dado el carácter matemáticamente continuo del conjunto de soluciones factibles. Por otra parte se encuentran los problemas de decisión de tipo discreto en los que el conjunto de alternativas a considerar por parte del decisor es finito y normalmente no muy elevado. El interés práctico de los problemas multicriterio discretos resulta evidente. Así pues existen multitud de contextos de decisión en los que un número reducido de alternativas o elecciones posibles deben evaluarse en base a varios criterios.

Como se ha indicado, un problema de decisión puede tener un simple criterio o un criterio agregado en uno único como por ejemplo el coste. Entonces la decisión puede ser tomada implícitamente mediante la determinación de la alternativa que mejor valor obtengamos para este único criterio. En este caso nosotros tenemos una clásica forma de un problema de optimización. Si tenemos un número finito de criterios pero tenemos un número ilimitado de posibles alternativas (las cuales cumplen los requerimientos) nos encontraríamos en el campo de optimización de múltiple criterio [3].

Los métodos que se describen en los siguientes epígrafes, se centran en problemas de decisión cuando el número de criterios y alternativas es finito, y las alternativas son dadas o conocidas de forma explícita.

Dentro de los Métodos de Decisión Multicriterio (MCDM) se pueden distinguir dos grupos o familias principales, por una parte los métodos basados en la llamada Teoría de la Utilidad Multi-atributo (MAUT – Multi-attribute Utility Theory), propios de la Escuela Americana y por otro los métodos llamados de Superación o Sobreclasificación o Outranking, propios de la Escuela Europea, conocida hasta hace poco como Escuela Franco-Belga.

La familia de los métodos de MAUT consiste en agregar los diferentes criterios a una función, la cual tiene que ser maximizada. El concepto de superación o sobreclasificación fue propuesto por Roy (1968). La idea básica es como sigue: la alternativa  $A_i$  supera a la alternativa  $A_j$  si para la mayor parte de los criterios  $A_i$  es al menos igual de buena que  $A_j$  (condición de concordancia), mientras que no hay ningún criterio para el cual sea notoriamente inferior (condición de discordancia). Después de determinar para cada par de alternativas si una supera a otra, esta pareja debe ser combinada en un ranking parcial o completo, [3]. Contrariamente a los métodos MAUT, donde la alternativa con el mejor valor de la función agregada puede ser obtenida y considerada como la mejor alternativa, en un ranking parcial de un método de superación la mejor alternativa no se puede estimar como mejor alternativa directamente.

## 2.1. Elementos del problema de decisión

En primer lugar, antes de profundizar en el estudio de los métodos de decisión que se desarrollan y aplican en este artículo, es necesario conocer y definir los elementos que componen un problema de decisión [4]:

1. Criterios de decisión: Los criterios de decisión  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  pueden definirse como las condiciones o parámetros que permiten discriminar alternativas y establecer preferencias del decisor, son elementos de referencia en base a los cuales se realiza la decisión. En la mayoría de problemas de decisión multicriterio resulta complicado establecer los criterios, no obstante, su determinación resulta un paso esencial en el proceso y deben cumplir una serie de requisitos para ser adecuados.

2. Pesos: Los pesos o ponderaciones son las medidas de la importancia relativa que los criterios tienen para el decisor. Asociado con los criterios, se asigna un vector de pesos  $[w] = [w_1, \dots, w_n]$ , siendo  $n$  el número de criterios. El peso  $w_i$  refleja la relativa importancia del criterio  $C_i$  en la decisión, y es asumido que es positivo. En los problemas de toma de decisiones multicriterio es muy frecuente que los criterios tengan distinta relevancia para el

decisor, aunque esto no significa que los criterios menos importantes no deban ser considerados. Existen en la bibliografía diferentes formas de asignación de pesos. Las más habituales son:

Método de asignación directa: Aquel en el que el decisor asigna directamente valores a los pesos. Se pueden asignar de diferentes formas: por ordenación simple, por tasación simple o por comparaciones sucesivas. El método de tasación simple, por ejemplo, consiste en pedir al decisor que dé una valoración de cada peso en una cierta escala (0 a 5, 0 a 10, etc.); una vez obtenidas las valoraciones, éstas se normalizan dividiendo cada valor por la suma de todos ellos.

Método del autovector: en este método los pesos asociados a cada criterio son las componentes del autovector asociado al autovalor dominante de una matriz de comparaciones pareadas entre los criterios. Este método de asignación de pesos es el utilizado en la metodología desarrollada en este artículo a través del método AHP, Proceso Jerárquico de Análisis.

3. Alternativas: Las alternativas son los diferentes enfoques para la resolución del problema. En el caso de problemas de decisión multicriterio discretos, las alternativas se definen como el conjunto finito de soluciones, estrategias, acciones, decisiones, etc. posibles que hay que analizar durante el proceso de resolución del problema de decisión que se considere. La descripción de cada alternativa deber mostrar de manera clara cómo se resuelve el problema definido y en qué difiere de otras alternativas.

El conjunto de alternativas se designa por  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ , donde  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) son cada una de las alternativas posibles. Cada conjunto de alternativas  $A$  son alternativas diferentes, excluyentes y exhaustivas.

Tabla 1: Matriz de decisión. Fuente: propia.

		Criterios y pesos asociados					
		$C_1$	$C_2$	...	$C_j$	...	$C_n$
		$w_1$	$w_2$	...	$w_j$	...	$w_n$
Alternativas	$A_1$	$a_{11}$	$a_{12}$	...	$a_{1j}$	...	$a_{1n}$
	$A_2$	$a_{21}$	$a_{22}$	...	$a_{2j}$	...	$a_{2n}$
	...	...	...	Valoraciones	...	...	...
	$A_i$	$a_{i1}$	$a_{i2}$	...	$a_{ij}$	...	$a_{in}$
	...	...	...	...	...	...	...
	$A_m$	$a_{m1}$	$a_{m2}$	...	$a_{mj}$	...	$a_{mn}$

4. Matriz de valoración o decisión: Una vez establecidos los criterios y sus pesos asociados, el decisor es capaz de dar, para cada uno de los criterios considerados y para cada alternativa del conjunto de elección, un valor numérico o simbólico  $a_{ij}$  que expresa una evaluación o juicio de la alternativa  $A_i$  respecto al criterio  $C_j$ . Esta evaluación puede ser

numérica o verbal y se puede representar en forma de matriz, matriz de valoración o de decisión. Cada fila de la matriz expresa cualidades de la alternativa  $A_i$  respecto a los  $n$  criterios considerados. Cada columna de la matriz recoge las evaluaciones o juicios emitidos por el decisor de todas las alternativas respecto al criterio  $C_j$ .

## 2.2. Métodos MAUT y método AHP

La base de los métodos MAUT es el uso de la función de utilidad. Estos métodos parten del supuesto de que el decisor trata de maximizar una función de utilidad que agrega los distintos criterios que intervienen en el problema. Cuando el problema es discreto y no existe una situación de incertidumbre, esta función se denomina función valor. MAUT asume que un problema de decisión puede modelizarse mediante funciones valoradas reales que pueden ser maximizadas/minimizadas entre las alternativas, [3].

Los métodos basados en la función de valor consisten en construir una función ( $v$ ) que asocia un número real a cada una de las alternativas posibles. Este número refleja el valor o la utilidad que cada alternativa tiene para el decisor. La principal dificultad de estos métodos consiste precisamente en encontrar dicha función de valor, pero una vez obtenida, el problema de decidir la mejor de las alternativas se reduce a obtener el máximo/mínimo de todos los valores calculados.

Dentro de los métodos MAUT, se encuadra el método Proceso Jerárquico de Análisis o método AHP, por sus siglas en inglés. A continuación se detalla el método AHP, por su particularidad respecto al resto de métodos MAUT y por ser el método que se aplica en el caso que desarrolla en este artículo.

El Proceso Jerárquico de Análisis, fue desarrollado en la década de los 70, del pasado siglo XX, por el matemático Thomas L. Saaty para resolver el tratado de reducción de armamento estratégico entre los Estados Unidos y la antigua URSS. Este proceso es un sistema flexible de metodología de análisis de decisión multicriterio discreta (número finito de alternativas u opciones de elección).

El AHP es uno de los métodos de decisión multiatributo más ampliamente utilizado. Su metodología se basa en comparación por parejas de la siguiente forma: ¿Cómo de importante es el criterio  $C_i$  respecto al  $C_j$ ? Preguntas de este tipo se utilizan para establecer los pesos de los diferentes criterios y priorizar las alternativas. De esta forma, también permite no solo valorar las diferentes alternativas, sino también establecer por comparaciones pareadas la importancia relativa de cada criterio respecto al resto, y establecer un vector de pesos.

El AHP, mediante la construcción de un modelo jerárquico, permite de una manera eficiente y gráfica organizar la información respecto de un problema de decisión, descomponerla y analizarla por partes, visualizar los efectos de cambios en los niveles y sintetizar. En palabras de su propio autor [5]:

*“Trata de desmenuzar un problema y luego unir todas las soluciones de los subproblemas en una conclusión.”*

La primera parte del método AHP consiste en establecer la jerarquía del problema de decisión. Para ello, se define el objetivo del problema de decisión en un primer nivel

jerárquico, a continuación los criterios y en un último nivel se establecen las alternativas o diferentes soluciones del problema.

Una vez construida la estructura jerárquica del problema se da paso a la segunda etapa del proceso de AHP: la valoración de los elementos. Para lo cual, el decisor realiza la valoración de los criterios a través de comparaciones pareadas, y de igual forma, valora las diferentes alternativas respecto a cada criterio, es decir, el decisor tiene que emitir juicios de valor sobre la importancia relativa de los criterios y de las alternativas, de forma que quede reflejado la dominación relativa, en términos de importancia, preferencia o probabilidad, de un elemento frente a otro. El AHP permite realizar las comparaciones pareadas basándose tanto en factores cuantitativos como cualitativos, ya que para ellos se utiliza la escala propuesta por Saaty. El decisor puede expresar sus preferencias entre dos elementos verbalmente y representar estas preferencias descriptivas mediante valores numéricos. De esta forma cuando dos elementos sean igualmente preferidos o importantes el decisor asignará al par de elementos un "1"; "3" indica importancia moderada de un elemento sobre otro; "5", importancia fuerte de un elemento sobre otro; "7", importancia muy fuerte de un elemento sobre otro; y finalmente "9" indica extremadamente preferido o importancia de un elemento sobre otro. Los números pares se utilizan para expresar situaciones intermedias. La escala verbal utilizada en el AHP permite al decisor incorporar subjetividad, experiencia y conocimiento al proceso de decisión. Esta escala está justificada teóricamente y su efectividad ha sido validada empíricamente aplicándola a diferentes situaciones reales con aspectos tangibles para los que se ha comportado adecuadamente [4].

Por otra parte, el método AHP permite medir la inconsistencia global de los juicios emitidos, mediante la Proporción de Consistencia, que se expresa como el cociente entre el Índice de Consistencia y el Índice Aleatorio, y debe ser inferior al 10%. El Índice de Consistencia mide la consistencia de la matriz de comparaciones, [6].

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

Donde  $\lambda_{\max}$  es el mayor valor propio de la matriz traspuesta de la matriz de comparaciones pareadas, y  $n$  el rango de la matriz. Mientras que el Índice Aleatorio es un índice de consistencia de una matriz aleatoria:

Tabla 2: Índice aleatorio.

Tamaño de la matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio	0,00	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Por lo cual, esto permite tener un nivel aceptable de confianza sobre que el proceso de decisión mediante comparaciones pareadas se ha realizado de forma correcta.

### 2.3. Métodos de *Outranking* y método VIKOR

Los métodos de decisión multicriterio agrupables bajo la denominación común de Métodos de Superación son todos aquellos que giran en torno al concepto teórico de las relaciones de superación, propuesto por un grupo de investigadores franceses a mediados de los años sesenta y que hoy en día gozan de una amplia aceptación dentro del mundo de la

Decisión Multicriterio Discreta. Es frecuente encontrarse estos métodos con la denominación de “Escuela Europea de la Decisión Multicriterio”. Entre estos métodos los más conocidos son los métodos ELECTRE y PROMETHEE, pero hay otros más que pueden considerarse como métodos de *outranking*, ya que proporcionan un ranking de las alternativas mejor clasificadas, entre estos se encuentra el método VIKOR, que se expone a continuación al ser el método que se aplica en el caso que desarrolla en este artículo.

El método VIKOR proporciona para el conjunto de alternativas una o varias soluciones de compromiso. El método VIKOR es apropiado para resolver problemas de decisión con criterios en conflicto y no commensurables, es decir, con distintas unidades, o en el caso de que haya criterios cuantitativos y cualitativos. La solución de compromiso viene determinada como aquella que se encuentra a una distancia más corta de la solución ideal, [7].

Para obtener la solución (o las soluciones) de compromiso se siguen los siguientes pasos:

1. Se calculan los mejores,  $f_i^*$ , y los peores,  $f_i^-$ , valores de cada criterio:

$$\begin{aligned} f_i^* &= \max_i f_{ij} & f_i^- &= \min_i f_{ij} & \text{Si la función } i \text{ representa un beneficio} \\ f_j^* &= \min_j f_{ij} & f_j^- &= \max_j f_{ij} & \text{Si la función } i \text{ representa un coste} \end{aligned}$$

2. Se calculan los valores  $S_j$ ,  $R_j$  y  $Q_j$  para cada alternativa:

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \quad (2)$$

$$R_j = \max_i \left[ w_i \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right] \quad (3)$$

$$Q_j = \nu \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} + (1 - \nu) \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*} \quad (4)$$

Donde:

$S^* = \min_j S_j$ ,  $S^- = \max_j S_j$ ,  $R^* = \min_j R_j$ ,  $R^- = \max_j R_j$ , y  $\nu$  es introducido como un peso de la estrategia de máxima utilidad de grupo, mientras que  $(1 - \nu)$ , es el peso de la oposición individual. En el presente artículo, se toma el valor  $\nu = 0,5$ , que corresponde a una situación de “consenso”.

3. Ordenamos las alternativas, según los valores de  $S$ ,  $R$  y  $Q$  en orden decreciente. Los resultados son tres listas.
4. Determinamos como solución de compromiso la alternativa  $A^{(1)}$  que es la mejor clasificada según el valor de  $Q$ , es decir con valor de  $Q$  mínimo, si se satisfacen las dos condiciones siguientes:

- a. Condición 1: Ventaja aceptable.

$$Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq DQ,$$

donde,  $A^{(2)}$  es la segunda alternativa según la clasificación de los valores de  $Q$ , y  $DQ = \frac{1}{j-1}$ , siendo  $j$  el número de alternativas.

b. Condición 2: Estabilidad aceptable en el proceso de decisión.

La alternativa  $A^{(1)}$  debe ser también la mejor clasificada según el listado de valores de  $S$  y/o  $R$ . Esta solución de compromiso es estable dentro de un proceso de decisión.

Si una de las condiciones no es satisfecha, entonces se propone un conjunto de soluciones compromiso, el cual consiste en:

- Alternativas  $A^{(1)}$  y  $A^{(2)}$  si no es satisfecha la condición 2.
- Alternativas  $A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(M)}$ , si no es satisfecha la condición 1;  $A^{(M)}$  se determina teniendo en cuenta la relación  $Q(A^{(M)}) - Q(A^{(1)}) < DQ$ . Se considera que estas alternativas están dentro de la "ceranía" a la solución ideal.

El método VIKOR es una herramienta eficaz como método de decisión multicriterio en aquellos casos en los cuales el decisor no es capaz, o no sabe, expresar sus preferencias al inicio del proceso de diseño. La solución de compromiso obtenida podría ser aceptada por el decisor, ya que proporciona la máxima utilidad de grupo a la mayoría, representado por el mínimo " $S$ ", y una oposición mínima individual representada por el mínimo " $R$ ", [7].

### 3. Estudios informativos y análisis de alternativas de infraestructuras

El estudio informativo de una infraestructura es un estudio técnico a escala grande (normalmente 1:5.000) en el que se plantean diversas alternativas de trazado y otras soluciones constructivas. El objetivo del estudio, que incluye una fase de información pública en la que se pueden hacer alegaciones que tienen que ser consideradas y respondidas por la Administración, es la definición de la infraestructura lineal con el trazado elegido. Por ello cobra una especial importancia el proceso de decisión empleado, su estabilidad y su adecuación.

No debe confundirse un estudio informativo con un estudio de viabilidad. El estudio de viabilidad forma parte del informativo, y por lo tanto no coincide con él. El estudio de viabilidad es el estudio, investigación y análisis detallado que permite determinar la posibilidad y la conveniencia financiera, técnica o de sostenibilidad de un determinado proyecto. En el caso de que el estudio de viabilidad incluya un estudio de alternativas de cualquier tipo, este estudio de alternativas se denomina estudio funcional.

Una parte fundamental del estudio informativo es el estudio de alternativas, el cual consiste en la definición de las diferentes alternativas que existen para el trazado de una infraestructura, así como su valoración en términos económicos, medioambientales y de explotación, en función de las obras que implica cada alternativa. Es en este punto donde intervienen los métodos de decisión multicriterio para el análisis de alternativas, mediante los cuales se obtiene una valoración más o menos objetiva de las diferentes alternativas teniendo en cuenta los criterios o requerimientos de proyecto y la importancia relativa de los mismos, expresada en sus pesos.

Es justo destacar la importancia de los estudios informativos, los cuales en ocasiones son considerados como meros trámites administrativos, debido a que permiten el conocimiento exhaustivo de la ubicación concreta de una infraestructura lineal, así como todos los condicionamientos medioambientales, funcionales, geotécnicos, económicos-financieros, etc. que intervienen en el proyecto. Los errores que se cometen en esta fase del proyecto son arrastrados a lo largo de toda la vida útil de la infraestructura, de ahí la importancia de realizar un estudio informativo exhaustivo, correcto y completo, y contemplando todas las alternativas posibles.

Es por este motivo por el que el Ministerio de Fomento, en la Instrucción sobre las medidas específicas para la mejora de la eficiencia en la ejecución de las obras públicas de infraestructuras ferroviarias, carreteras y aeropuertos, dedica un epígrafe a los estudios informativos [8]. En dicha Instrucción se indica que para infraestructuras ferroviarias y de carreteras se optimizarán los trazados, de manera que se minimicen los costes de las alternativas que cumplan los requisitos funcionales y medioambientales prescritos. Además, indica que el Estudio Informativo de una línea ferroviaria contendrá un estudio funcional del tramo o línea que determine las características principales de la misma, fijando las distancias entre los apartaderos, estaciones y puntos de banalización, sus características y su equipamiento.

De igual forma se establecen condicionantes para los estudios informativos de carreteras y aeropuertos. En el primer caso se indica se prescribe que se pondrá un especial interés en desarrollar y optimizar los trazados minimizando los costes de las alternativas que cumplan los requisitos funcionales y medioambientales exigibles, y los parámetros de diseño deberán adaptarse al entorno en los tramos medioambientalmente sensibles o de difícil orografía.

Por otra parte, la Ley de Carreteras, en el artículo 11, define los estudios informativos como los estudios, en los que se definen y comparan, en líneas generales, diferentes alternativas de trazado, de conexión y de explotación de la actuación objeto de estudio, a efectos de que pueda servir de base al expediente de información pública y, en su caso, al trámite de evaluación de impacto ambiental, con objeto de poder seleccionar la más adecuada [9].

Para el caso de infraestructuras de carreteras, el Ministerio de Fomento establece que el estudio se desarrollará en tres fases denominadas A, B y C [10].

La Fase A del estudio informativo estará encaminada a la realización de un diagnóstico de la situación actual del área de estudio, con el fin de obtener los posibles corredores para acoger a la nueva infraestructura.

Este análisis se centrará fundamentalmente en cinco puntos diferentes:

- Análisis de estudios previos.
- Realización de un inventario de la situación actual del tramo objeto de estudio.
- Elaboración de un estudio de tráfico que permita valorar la funcionalidad de las diferentes soluciones propuestas.
- Estudio de los diversos factores ambientales, con el objeto de descartar aquellas zonas del área de estudio donde no sea viable la ejecución de la nueva infraestructura, debido a la existencia de zonas de alto valor ambiental.

- Elaboración de un estudio socioeconómico basado en el análisis de los planeamientos vigentes.

Con toda la información recopilada se procederá a realizar una caracterización del territorio, que permitirá, mediante la implementación del método de Impacto/Aptitud, identificar aquellas zonas o corredores del área de estudio más adecuadas o con las mejores aptitudes para acoger la infraestructura objeto del estudio.

La Fase B del estudio informativo se centrará en analizar las alternativas seleccionadas tras la Fase A del estudio. Se definirán con mayor precisión las alternativas seleccionadas con el fin de establecer su impacto ambiental residual, su funcionalidad y sus costes. En esta etapa se redactará el Estudio de Impacto Ambiental (EIA). Si se ha realizado el trámite de consultas previas, se tendrán en cuenta las respuestas a las consultas realizadas por el Órgano Medioambiental durante la Fase A. La Fase B del estudio concluirá con la realización de un análisis multicriterio, el cual propondrá la alternativa más favorable para los objetivos fijados.

En la Fase C del estudio informativo se estudiarán e informarán las alegaciones a la Información Pública y se incorporarán las prescripciones impuestas por la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) aprobada por el Órgano Medioambiental y por la aprobación provisional del estudio.

### **3.1. Criterios a incluir en el análisis de alternativas de los estudios informativos**

De forma general se puede afirmar que, dependiendo del método de análisis de alternativas a aplicar y del objetivo a alcanzar con la construcción y explotación de la infraestructura, son diferentes los criterios a incluir en el análisis de alternativas.

En este sentido, la Guía desarrollada para la evaluación de los proyectos de inversión FEDER distingue que el análisis a realizar es diferente según el tipo de infraestructura y que los objetivos son diferentes de un proyecto a otro, aunque sean proyectos del mismo sector. Por ello, y concretamente para las infraestructuras de transporte, indica que hay varios objetivos diferentes a alcanzar [11]:

- reducir la congestión, eliminando limitaciones de capacidad en redes o nudos únicos o construyendo nuevas conexiones o itinerarios alternativos;
- mejorar la eficacia de una conexión o un nudo, en particular aumentando la rapidez de desplazamiento y reduciendo los costes de explotación y la frecuencia de los accidentes mediante la adopción de medidas de seguridad;
- provocar un desplazamiento de la demanda hacia determinados sistemas de transporte;
- construir conexiones inexistentes o completar la construcción de redes mal interconectadas;
- mejorar la accesibilidad de las zonas o regiones periféricas

Una vez definido el tipo de análisis a realizar y los objetivos a lograr, se deben definir los criterios. Estos se pueden agrupar en cinco grandes grupos:

- Criterios funcionales

- Criterios técnicos
- Criterios de impacto sobre el medio natural o medioambientales
- Criterios sociales o de impacto sobre el medio humano
- Criterios económicos

Particularizando una vez más en el ámbito de las infraestructuras de transporte dentro de cada gran grupo podemos incluir otros subcriterios:

Tabla 3: Criterios a incluir en el análisis de alternativas de infraestructuras de transporte.

<i>Criterios funcionales</i>	<i>Criterios técnicos</i>	<i>Criterios medioambientales</i>	<i>Criterios sociales</i>	<i>Criterios económicos</i>
Captación de tráfico	Geotecnia	Integración paisajística	Mejora de la seguridad	Coste construcción
Integración con red actual	Accesos	Necesidad de préstamos y vertederos	Desarrollo económico y social de la región	Coste explotación
Intermodalidad	Estructuras	Residuos		
Longitud de recorrido		Ruidos y vibraciones		
Trazado en planta		Protección fauna		
Trazado en alzado		Espacios protegidos		
Tiempo de recorrido				

#### 4. Metodología de selección de alternativas propuesta

Se plantea una metodología para la resolución del problema, como combinación de dos métodos de decisión multicriterio, Proceso Jerárquico de Análisis (AHP) y método VIKOR, ya descritos en epígrafes anteriores.

- Mediante el Proceso Jerárquico de Análisis, AHP, se calcula el autovector de pesos para los criterios y subcriterios que se consideran determinantes en la solución más idónea, mediante comparación pareada de los mismos en cada proyecto. Hay que indicar que el autovector de pesos dependerá de cada proyecto, es decir, un criterio puede tener una mayor importancia relativa respecto al resto dependiendo de las características del proyecto.
- Finalmente, se aplica el método VIKOR para la selección de la alternativa más adecuada, a partir de un ranking de alternativas que nos proporcionan una o varias soluciones de compromiso.

## 5. Aplicación a un caso real

La metodología descrita en el epígrafe anterior se aplica al análisis multicriterio de la fase B del estudio informativo del proyecto “Acceso al Puerto Exterior de A Coruña”, de la Dirección General de Carreteras del Gobierno de España. Para ello se partirá de la valoración de cada alternativa según cada criterio y subcriterio y valores de cada alternativa obtenidos en dicho estudio informativo [12].

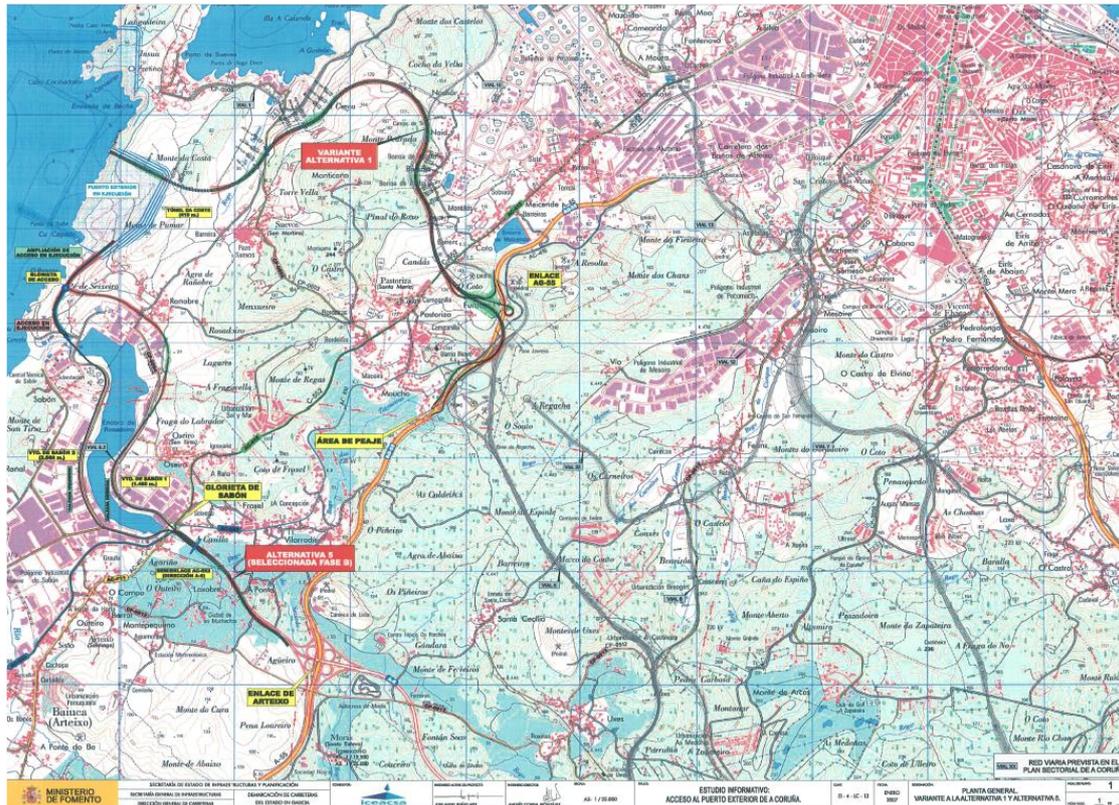


Figura 1. Plano de situación del Acceso al Puerto Exterior de A Coruña. Fuente: Estudio Informativo. ICEACSA.

En el estudio informativo se incluyen cuatro criterios principales que son: criterio funcional, impacto sobre el medio natural, impacto sobre el medio humano y coste económico. El criterio funcional a su vez se divide en cinco subcriterios: captación de tráfico, integración con la red actual, longitud de recorrido desde la A6 al Puerto, trazado en planta y trazado en alzado, para este último se considera por una parte la pendiente media ponderada y por otro lado, las longitudes de tramos con pendientes comprendidas en los intervalos: 0 – 2%, 2 – 4%, 4 – 5%, y >5%, y se parte de la hipótesis que se le asigna el mismo peso relativo a cada de estas valoraciones teniendo en cuenta que no apenas va a influir en la decisión final.

De esta forma los criterios y subcriterios quedan agrupados según se indica en la tabla 4.

Por otra parte, en la fase B del estudio informativo, para el análisis multicriterio, se consideraron seis alternativas, las cuales se denominaron: Alternativa 1B, Alternativa 2A, Alternativa 2B, Alternativa 3, Alternativa 4, Alternativa 5, las cuales se encuentran ampliamente definidas en la memoria y planos del estudio.

Tabla 4. Criterios y subcriterios considerados en el Estudio Informativo Acceso al Puerto Exterior de A Coruña. Fuente: Estudio Informativo. ICEACSA.

Criterios funcionales		Criterios medioambientales	Criterios sociales	Criterios económicos
Captación de tráfico		Impacto sobre el natural	Impacto sobre el medio humano	Coste de ejecución
Integración con red actual				
Longitud de recorrido				
Trazado en planta				
Trazado en alzado	Pendiente media ponderada			
	Tramos pendiente			

La metodología seguida en el estudio original es muy diferente de la expuesta, ya que la determinación de la importancia relativa de cada criterio y subcriterio se realiza por asignación directa de pesos.

### Desarrollo de la metodología expuesta

Para cada uno de los criterios y subcriterios se determinó en el estudio original la valoración de cada alternativa, y los resultados se incluyen a continuación, así como cuál es la alternativa más adecuada para cada uno de ellos.

Tabla 5. Valoración de cada alternativa según los criterios y subcriterios considerados en el Estudio Informativo Acceso al Puerto Exterior de A Coruña. Fuente: Estudio Informativo. ICEACSA.

		Alternativa 1B	Alternativa 2A	Alternativa 2B	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5
Criterio funcional	Captación de tráfico (mayor IMD)	4580	4449	3773	3773	4449	4449
	Integración red actual (mayor puntuación)	16	8	8,5	8	12	12
	Longitud de recorrido (menor longitud)	8,86	5,83	5,75	6,87	4,8	5,11
	Trazado en planta (mayor valor indicador)	7,81	7,84	7,72	8,76	8,82	7,86
	Trazado alzado	Pendiente media (menor pendiente media)	3,05	3,05	3	4	2,22
Tramos pendiente (menor valor indicador)		5,36	5,48	5,37	2,23	7,6	8,33
Criterio medioambiental	Impacto sobre el medio natural (índice: -600 (máximo impacto negativo, +600 máximo impacto positivo)	-100,5	-109,4	-162,13	-158,12	-104,3	-92,1
Criterio social	Impacto sobre el medio humano (índice: -400 (máximo impacto negativo, +400 máximo impacto positivo)	-39,02	-45,15	-53,6	-58,32	-128,6	-10,9
Criterio económico	Coste construcción miles € (menor presupuesto inversión)	57943	50486	53529	53165	51567	56964

En la metodología a aplicar en este artículo, para determinar la importancia relativa cada criterio y subcriterio se aplica el método AHP dos veces, en la primera de ellas se determina el vector de pesos para cada criterio, y en la segunda vez se determina la importancia relativa de cada subcriterio del criterio funcional. Todos los cálculos se realizan a través del software Matlab®, que permite la programación de todo el proceso.

Según esto, se obtiene la matriz de comparaciones pareadas para los cuatro criterios:

Tabla 6. Matriz de comparaciones pareadas de la importancia relativa de cada criterio. Fuente: Propia.

$$\begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{8} & \frac{1}{5} & 3 \\ 8 & 1 & 2 & 6 \\ 5 & \frac{1}{2} & 1 & 8 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & \frac{1}{8} & 1 \end{pmatrix}$$

Y se obtiene el vector de pesos, como un vector columna resultante de calcular el promedio de cada fila de la matriz de comparaciones una vez normalizada a uno, por lo cual en este caso  $[0,1273 \ 0,4251 \ 0,4044 \ 0,0432]$ , es el vector de pesos, con un CI, según la ecuación (1) igual 0,0793 , inferior a 0,1 , por lo cual son consistentes los juicios realizados en la matriz de comparaciones.

De igual forma, se determina el peso de cada subcriterio que conforman el criterio funcional la siguiente matriz de comparaciones:

Tabla 7. Matriz de comparaciones pareadas de la importancia relativa de cada subcriterio del criterio funcional. Fuente: Propia.

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & \frac{1}{5} & 7 & 4 \\ \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{8} & 3 & \frac{1}{2} \\ 5 & 8 & 1 & 8 & 8 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{8} & 1 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{4} & 2 & \frac{1}{8} & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

Obteniéndose el vector de pesos  $[0,2793 \ 0,0966 \ 0,4701 \ 0,0351 \ 0,1189]$ , con un CI, según la ecuación (1) igual 0,0748 , inferior a 0,1 , por lo cual son consistentes los juicios realizados en la matriz de comparaciones.

Una vez obtenida la valoración de cada alternativa para cada criterio y subcriterio y el vector de pesos, aplicamos el método VIKOR para obtener el ranking de alternativas, y así determinar la solución o soluciones de compromiso, que serán las alternativas más adecuadas.

Para ello se determinan los valores de  $f_i^*$  y  $f_i^-$ , como mejores o peores valores de las diferentes alternativas para cada criterio, de manera que a través del método VIKOR se establece que solución está más cerca de la solución. En este sentido, los valores  $f_i^*$  y  $f_i^-$  son aquellos valores de cada alternativa que para cada criterio estarían más cerca y más lejos, respectivamente, de la solución ideal, (tabla 8).

Tabla 8. Valores de  $f_i^+$ ,  $f_i^-$  y peso relativo. Fuente: Propia.

		Peso relativo	$f_i^+$	$f_i^-$
Criterio funcional	Captación de tráfico (mayor IMD)	0,0356	4580	3773
	Integración red actual (mayor puntuación)	0,0123	16	8
	Longitud de recorrido (menor longitud)	0,0598	4,8	8,86
	Trazado en planta (mayor valor indicador)	0,0045	8,82	7,72
	Trazado alzado	Pendiente media (menor pendiente media)	0,0076	3
Tramos pendiente (menor valor indicador)		0,0076	2,23	8,33
Criterio medioambiental	Impacto sobre el medio natural (índice: -600 (máximo impacto negativo, +600 máximo impacto positivo))	0,4251	-92,1	-162,13
Criterio social	Impacto sobre el medio humano (índice: -400 (máximo impacto negativo, +400 máximo impacto positivo))	0,4044	-10,9	-128,6
Criterio económico	Coste construcción miles € (menor presupuesto inversión)	0,0432	50486	57943

Se aplican las ecuaciones (2), (3) y (4) para obtener los valores de  $Q_j$ ,  $S_j$  y  $R_j$ :

Tabla 9. Valores de  $Q_j$ ,  $S_j$  y  $R_j$  método VIKOR. Fuente: Propia.

	$Q_j$	$S_j$	$R_j$
Alternativa 1B	0,2420	0,2590	0,0966
Alternativa 2A	0,2736	0,2644	0,1177
Alternativa 2B	0,9947	0,6590	0,4251
Alternativa 3	0,9686	0,6654	0,4008
Alternativa 4	0,8351	0,4974	0,4044
Alternativa 5	0,0000	0,0574	0,0375

Por lo cual, se obtienen los siguientes rankings según los valores de  $Q$ ,  $S$  y  $R$ :

Tabla 10. Ranking de alternativas según los valores de  $Q$ ,  $S$  y  $R$  método VIKOR. Fuente: Propia.

	Q	S	R
Alternativa 5	0,0000	0,0574	0,0375
Alternativa 1B	0,2420	0,2590	0,0966
Alternativa 2A	0,2736	0,2644	0,1177
Alternativa 4	0,8351	0,4974	0,4044
Alternativa 3	0,9686	0,6654	0,4008
Alternativa 2B	0,9947	0,6590	0,4251

Gráficamente:

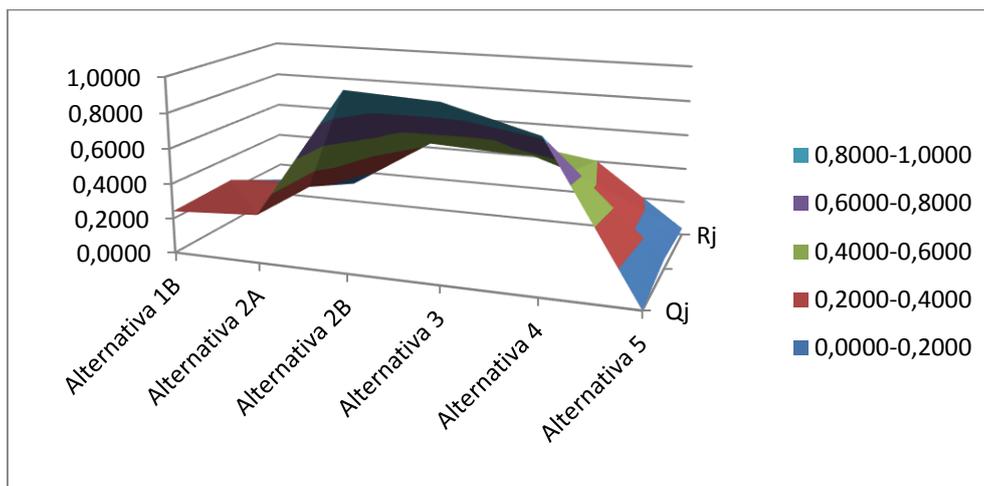


Figura 2. Representación gráfica valores  $Q_j$ ,  $S_j$  y  $R_j$  método VIKOR. Fuente: Propia.

En el gráfico observa un mínimo de los valores  $Q$ ,  $S$  y  $R$ , en el caso de alternativa 5, pero con valores muy próximos respecto a la alternativa 1B y 2A, de ello se deduce que no hay solución óptima clara, y sí un conjunto de soluciones de compromiso que pueden dar solución al problema de una forma más o menos adecuada. A continuación se comprueba esto de forma numérica al aplicar la condición 1, ventaja aceptable del método de VIKOR.

Hay que hacer notar que  $Q(A^{(1)}) - Q(A^{(2)})$ , es mayor que  $0,20$  ( $DQ$ ), por lo cual se cumple la condición 1, de ventaja aceptable, por ello se propone como solución al problema de decisión la alternativa 5, que además es la alternativa mejor clasificada según los ránquines  $S$  y  $R$ , condición 2 del método VIKOR. Hay que recordar que el método VIKOR propone un conjunto de soluciones de compromiso a aquellas alternativas,  $A^{(1)}$ ,  $A^{(2)}$ , ...,  $A^{(M)}$ , que cumplen que  $Q(A^{(M)}) - Q(A^{(1)}) < DQ$ .

Según el método VIKOR, esta solución es estable, por lo cual seguirá siendo adecuada para resolver el problema de decisión cuando haya leves modificaciones en la importancia relativa de los criterios.

Por otra parte, en el estudio original se obtuvo, por asignación directa de pesos y el método de la media ponderada, la alternativa 1B como la alternativa más adecuada que según la metodología desarrollada en este artículo es la segunda alternativa mejor clasificada. Esto se hizo así teniendo en cuenta que el equipo redactor del estudio conocía ampliamente el proyecto, las diferentes alternativas y los condicionantes locales, motivo por el cual se le dio una mayor importancia relativa al criterio funcional. Sin embargo, en el análisis de robustez realizado en el proyecto se obtuvo que la alternativa más robusta era la alternativa 5, lo cual valida la metodología aplicada al determinar la solución más estable ante variaciones en las condiciones de partida. En la metodología aplicada y desarrollada en este artículo se parte de un menor conocimiento del proyecto, y a pesar de esto, igualmente se obtiene la alternativa 1B como segunda alternativa mejor valorada, lo cual permite afirmar que la aplicación de la metodología sigue aportando resultados fiables sin tener un conocimiento detallado de las variables locales, y en cualquier caso proporciona soluciones estables ante pequeñas modificaciones.

## 6. Conclusiones

- La utilización de métodos de decisión para el análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras permite organizar la información y contemplar todas las posibles alternativas y criterios que determinan la solución adecuada.
- La utilización de una metodología basada en la aplicación de dos métodos de decisión de forma secuencial permite determinar la importancia relativa de los criterios de la forma más sistemática y objetiva posible.
- El método VIKOR proporciona una solución o conjunto de soluciones de compromiso que son estables ante pequeñas variaciones en los juicios realizados por el equipo decisor, además de proporcionar un catálogo de soluciones de las cuales hemos verificado su adecuación al proyecto.
- La aplicación y resolución del problema de decisión es sencillo aunque haya un número elevado de criterios y alternativas, al convertirse en un problema matemático relativamente sencillo que se puede programar con cualquier software comercial.

## Referencias

- [1] RÍOS, Sixto. *Algunos procesos y problemas en la Ciencia de la decisión*, Revista Matemática Complutense, Volumen 11, número 1, pp. 113–141, 1998.
- [2] GARCÍA-CASCALES, M. Socorro. *Tesis doctoral: Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y “Soft Computing”*. Universidad Politécnica de Cartagena, 2010.
- [3] FÜLÖP, János. *Introduction to Decision Making Methods*, Laboratory of Operations Research and Decision Systems, Computer and Automation Institute, Hungarian Academy of Sciences, 2005.
- [4] MUÑOZ, Belén, ROMANA, Manuel, y ORDÓÑEZ, Javier. Elección de Tipo de Muro en una Autopista Urbana en Servicio por Métodos de Decisión Multicriterio Discretos. Aplicación a la M-40 en Madrid. *Obras Urbanas*, pp. 34–44, 2014.
- [5] MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, Elena. *Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME*; Anuario Jurídico y Económico Escorialense, XL (2007) 523–542/ISSN: 1133–3677, 2007.
- [6] SAATY, Thomas L. *How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*. *Interfaces* 24, pp. 19–43, 1994.
- [7] OPRICOVIC, Serafim & TZENG, Gwo-Hshiung. *Extended VIKOR method in comparison with outranking methods*. *European Journal of Operational Research* 178, pp. 514–529, 2007.
- [8] MINISTERIO DE FOMENTO, GOBIERNO DE ESPAÑA. *Instrucción sobre las medidas específicas para la mejora de la eficiencia en la ejecución de las obras públicas de infraestructuras ferroviarias, carreteras y aeropuertos*. Orden FOM/3317/2010. 2010.

- [9] GOBIERNO DE ESPAÑA. *Ley 37/2015, de 29 de septiembre, de carreteras*. 2015
- [10] MINISTERIO DE FOMENTO, Gobierno de España. *Pliego de Prescripciones Técnicas para la redacción de Estudios Informativos de la Red de Carreteras del Estado*. Nota de servicio 1/2015. 2015.
- [11] DG POLÍTICA REGIONAL COMISIÓN EUROPEA, *Guía del análisis costes-beneficios de los proyectos de inversión, Fondos Estructurales – FEDER, Fondos de Cohesión e ISPA*. 2003.
- [12] ICEACSA, *Anejo nº2 Estudio Informativo: Acceso al Puerto Exterior de A Coruña*. DG de Carreteras. Ministerio de Fomento. Secretaria de Estado de Infraestructuras y Planificación. Secretaria General de Planificación. 2007.

**Sobre los autores:**

*Nombre:* Belén Muñoz Medina

*Correo Electrónico:* mariabelen.munoz@upm.es

*Institución:* ETSI Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, España.

*Nombre:* Manuel Romana García

*Correo Electrónico:* manuel.romana@upm.es

*Institución:* ETSI Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, España.

