



UNIVERSIDAD
DE GRANADA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

**Departamento de Ingeniería de la Construcción y
Proyectos de Ingeniería**

TESIS DOCTORAL

METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS Y SELECCIÓN SOSTENIBLE DE ALTERNATIVAS EN INFRAESTRUCTURAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO CON CRITERIOS EN CONFLICTO Y EN CONDICIONES DE INCERTIDUMBRE

Doctorando: María Belén Muñoz Medina

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL (B23.56.1)

Granada, noviembre de 2021

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: María Belén Muñoz Medina
ISBN: 978-84-1117-228-8
URI: <http://hdl.handle.net/10481/72876>

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer a mis directores de tesis, a Javier y a Manuel, su dedicación, orientación, apoyo y paciencia durante todo el desarrollo de la investigación. Y especialmente les quiero agradecer su confianza en mí para poder llevar a cabo el trabajo que supone el desarrollo de una tesis doctoral.

Igualmente quisiera agradecer a los miembros del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería, de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos, y a la Escuela de Doctorado de la Universidad de Granada por su apoyo para el desarrollo de esta investigación, tanto en medios técnicos o de como resolución de dudas que surgieron a lo largo del tiempo.

También quisiera agradecer el apoyo y ánimo constante de mis compañeros del Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, así como del equipo directivo y miembros de la Subdirección de Acreditación de Títulos y Calidad de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Gracias a mis padres porque durante toda mi vida académica me apoyaron, escucharon y, especialmente, por educarme en el esfuerzo y la responsabilidad. Mi padre se marchó antes de poder ver terminado este trabajo, espero que desde arriba esté orgulloso del trabajo realizado, gracias papá.

Y, por último, quiero dar las gracias a Ginés-Miguel y a Juan, por apoyarme siempre, y especialmente por animarme a emprender este camino, mucho antes de que lo iniciara, y que está resultando tan satisfactorio y enriquecedor.

Gracias a todos.



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	IX
ABSTRACT.....	XI
LISTADO DE TABLAS.....	XIII
LISTADO DE FIGURAS.....	XVI
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.2. OBJETIVOS.....	6
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	7
CAPÍTULO 2: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
CAPÍTULO 3: FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO	15
3.1. SOSTENIBILIDAD EN PROYECTOS DE INGENIERÍA	16
3.1.1. CONCEPTO DE SOSTENIBILIDAD. ORIGEN Y ANTECEDENTES.....	16
3.1.2. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD.....	19
3.1.3. INGENIERÍA E INFRAESTRUCTURAS SOSTENIBLES.....	22
3.2. MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO.....	27
3.2.1. MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO BASADOS EN EL CONCEPTO DE DISTANCIA MATEMÁTICA.....	49
3.2.2. MÉTODOS DE PONDERACIÓN DE CRITERIOS O VARIABLES DE DECISIÓN.....	56
3.2.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD E INCERTIDUMBRE	69
3.2.4. APLICACIÓN DE MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS EN INFRAESTRUCTURAS	76
3.3. APARCAMIENTOS DISUASORIOS.....	78
3.3.1. CARACTERÍSTICAS Y TIPOS DE APARCAMIENTOS DISUASORIOS.....	79
3.3.2. BENEFICIOS Y EFECTOS SOBRE EL TRÁFICO DE LOS APARCAMIENTOS DISUASORIOS	81
3.3.3. ELEMENTOS Y CRITERIOS A CONSIDERAR EN LA IMPLANTACIÓN DE APARCAMIENTOS DISUASORIOS.....	83
3.4. MUROS DE CONTENCIÓN.....	86
CAPÍTULO 4: MATERIALES Y MÉTODOS	93
4.1. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.....	94
4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO	102
4.2.1. SELECCIÓN DE TIPOLOGIAS DE MUROS DE CONTENCIÓN.....	102

4.2.2. SELECCIÓN DE APARCAMIENTOS DISUASORIOS.....	109
4.3. VERIFICACIÓN DE LA ESTABILIDAD Y ROBUSTEZ DE LAS SOLUCIONES.....	132
CAPÍTULO 5: RESULTADOS	135
5.1. RESULTADOS.....	136
5.1.1. MUROS DE CONTENCIÓN	136
5.1.1.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA SELECCIÓN TIPOLOGÍAS DE MUROS DE CONTENCIÓN.....	141
5.1.2. APARCAMIENTOS DISUASORIOS.....	146
5.1.2.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA SELECCIÓN DE APARCAMIENTOS DISUASORIOS.	153
5.1.2.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA SELECCIÓN DE APARCAMIENTOS DISUASORIOS, CASO PARTICULAR DE CRITERIOS DE SELECCIÓN.	160
CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	171
6.1. DISCUSIÓN.....	172
6.2. CONCLUSIONES	176
CAPÍTULO 7: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	179
7.1. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	180
CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA	182
REFERENCIAS.....	183
ANEXOS.....	200
ANEXO 1. ALGORITMO COMPUTACIONAL MÉTODO VIKOR MODIFICADO CON LA DISTANCIA DE MAHALANOBIS CÁLCULO VALORES S_i	201
ANEXO 2. ALGORITMO COMPUTACIONAL MÉTODO VIKOR MODIFICADO CON LA DISTANCIA DE MAHALANOBIS CÁLCULO VALORES R_i	202

RESUMEN

El desarrollo de los proyectos de infraestructuras requiere el análisis y selección de varias alternativas que pueden dar solución al problema planteado. Para llevar a cabo este proceso desde un punto de vista sostenible, en primer lugar, es necesario considerar todos los criterios o requerimientos de sostenibilidad que pueden intervenir en el proyecto, así como todas las alternativas que dan cumplimiento a dichos requerimientos. De igual forma, es necesario determinar la importancia relativa de los criterios de selección y valorar dicha importancia relativa a través de la ponderación de criterios. Por otra parte, la selección de alternativas suele producirse en un entorno de incertidumbre, la cual aumenta la complejidad de las decisiones a adoptar.

Los métodos de decisión multicriterio son herramientas que ayudan en el proceso de selección de alternativas, al proporcionar un proceso sistemático en la toma de decisión, lo cual, reduce la subjetividad del decisor y permite valorar de manera cuantitativa cada alternativa según los criterios de selección. Pero los métodos de decisión multicriterio tienen ciertas limitaciones e inconvenientes, entre éstas hay que destacar que la mayor parte de ellos no consideran la correlación entre las variables que intervienen en el proceso. Por ello, en el capítulo correspondiente se hace una revisión de los métodos de decisión multicriterio, indicando sus ventajas, inconvenientes y principales aplicaciones.

En la presente investigación se identifican, en un primer momento los criterios de sostenibilidad que intervienen en el proceso de selección de alternativas, y posteriormente se profundiza en el estudio, aplicación y desarrollo de una metodología de decisión basada en la determinación de cercanía o menor distancia a la denominada “solución ideal”, entendida ésta como una solución ficticia que es la que mejor se comporta para cada criterio de decisión. Se trata de determinar la alternativa cuya distancia matemática a la solución ideal sea la menor posible, y obtener una clasificación de alternativas en función de dicha distancia, ordenadas de la menor a mayor distancia a la solución ideal. Para considerar la correlación entre variables, se propone una metodología de decisión basada en el concepto de distancia a la “solución ideal” medida a través de la distancia de Mahalanobis, la cual tiene dos particularidades: considera la correlación entre variables y es invariante a la escala. La metodología desarrollada consiste en una modificación del método de decisión multicriterio VIKOR aplicando la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores S o R del método VIKOR tradicional.

Cualquier metodología basada en un método de decisión multicriterio debe ser verificada mediante un análisis de robustez y un análisis de sensibilidad, siendo el primero de ellos el que determina la validez del modelo para que la solución óptima lo sea realmente entre un conjunto de soluciones. Mientras que el análisis de sensibilidad tiene como objetivo estudiar y descubrir el grado de sensibilidad de la solución óptima ante cambios en los factores o criterios esenciales. Para analizar la estabilidad de las soluciones proporcionadas por la metodología desarrollada se realiza un análisis de sensibilidad consistente en modificar la

ponderación inicial de los criterios de selección y determinar el número de cambios que se producen en la clasificación de alternativas y, de esta forma determinar el criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad.

Por último, la metodología de selección desarrollada se aplica a la selección de alternativas de dos tipos de infraestructuras diferentes. En primer lugar, a la selección de alternativas de tipologías muros de contención en infraestructuras lineales, por el gran impacto medioambiental que tienen sobre el entorno, tanto visual como de barrera. Y, en segundo lugar, a la selección de la localización de aparcamientos disuasorios, al ser una infraestructura determinante en los planes de movilidad urbana y en el establecimiento de medidas de restricción del tráfico en el centro de las grandes ciudades para la reducción de emisiones de gases contaminantes.

ABSTRACT

Modern infrastructure projects require the analysis and selection of the best solution from several alternatives which are a valid solution to the problem posed. To carry out this process from a sustainable point of view, it is first of all essential to consider all the sustainability requirements that may be relevant in the project, in order to develop all the feasible alternatives that comply with these requirements. At the same time, it is crucial to determine the relative importance of the selection criteria and to assess this relative importance considering the weighting of criteria. On the other hand, the selection of alternatives usually takes place in an environment of uncertainty, which increases the complexity of the decisions to be taken.

Multicriteria decision methods are tools that help in the process of selecting alternatives by providing a systematic decision-making process. The use of these methods reduces the subjectivity of the decision-maker and allows each alternative to be evaluated quantitatively, according to the set of selection criteria. However, multicriteria decision methods have certain limitations and drawbacks, among which it should be noted that most of them do not consider specifically the correlation between the variables considered in the process. For this reason, all multi-criteria decision methods are studied in a specific chapter, stating their advantages, disadvantages and main applications.

This research starts by identifying the sustainability criteria involved in the process of selecting alternatives, and then continues with the study, application and development of a decision methodology based on the determination of proximity (shortest distance) to the so-called "ideal solution", understood as a fictitious solution which performs best for each decision criterion. The aim is to determine the alternative whose mathematical distance to the ideal solution is the smallest possible, and to obtain a ranking of alternatives according to this distance, ordered from the shortest to the longest distance to the ideal solution. To consider the correlation between variables- in the process, a decision methodology is proposed based on the concept of distance to the "ideal solution", measured through the Mahalanobis distance, which has the particularity that, in addition to considering the correlation between variables, it is invariant to scale. Thus, the proposed methodology consists of a modification of the VIKOR multi-criteria decision method by applying the Mahalanobis distance to calculate the values of S or R variables of the traditional VIKOR method.

Any methodology based on a multicriteria decision method must be verified using both a robustness and a sensitivity analysis, in which the former will determine the validity of the model so that the optimal solution is indeed optimal among a given set of solutions. The latter sensitivity analysis aims to study and discover the degree of sensitivity of the optimal solution to changes in the essential factors or criteria. To analyze the stability of the solutions provided by the methodology developed, a sensitivity analysis is carried out, consisting of modifying the

initial weighting of the selection criteria and determining the number of changes that occur in the ranking of alternatives and, in this way, determining the criterion with the highest relative sensitivity coefficient.

Finally, the original proposed methodology is applied to the selection of alternatives for two different infrastructure types. First, to the selection of best alternative for retaining wall typologies in linear infrastructures, due to the considerable environmental impact they have on the surroundings, both visually and as a barrier. Second, to the selection of the optimal location of park and ride infrastructures, as they are a key infrastructure in urban mobility plans and in the establishment of traffic restriction measures in city centers of large metropolitan areas, when seeking to reduce pollutant gas emissions.

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3.1. Listado de 22 indicadores de movilidad sostenible.....	22
Tabla 3.2. Construcción de la matriz de decisión	35
Tabla 3.3. Principales técnicas de normalización en procesos de decisión	36
Tabla 3.4. Índice Aleatorio método AHP	42
Tabla 3.5. Aplicación de métodos de decisión multicriterio en infraestructuras por áreas de actividad.....	76
Tabla 3.6. Evolución del desarrollo de aparcamientos disuasorios en Europa, 1970-1990.....	79
Tabla 3.7. Tipos de aparcamientos disuasorios según diferentes criterios.....	81
Tabla 3.8. Tipologías de muros de contención	90
Tabla 4.1. Criterios de selección de tipologías de muros de contención	103
Tabla 4.2. Estimación residuos de construcción y demolición por tipologías de muros de contención	106
Tabla 4.3. Estimación emisiones de kg CO ₂ eq para tipología de muro de hormigón armado	107
Tabla 4.4. Estimación emisiones de kg CO ₂ eq para tipología de muro jardinera.....	108
Tabla 4.5. Estimación emisiones de kg CO ₂ eq para tipología de muro vegetal.....	108
Tabla 4.6. Estimación emisiones de kg CO ₂ eq para tipología de muro de escollera	108
Tabla 4.7. Matriz de decisión tipologías de muros de contención	109
Tabla 4.8. Aparcamientos disuasorios en la ciudad de Madrid. Programa de Aparcamientos Disuasorios.....	112
Tabla 4.9. Criterios de selección para la evaluación sostenible de aparcamientos disuasorios	113
Tabla 4.10. Estimación reducción emisiones de GEI para cada alternativa de aparcamiento disuasorio.....	115
Tabla 4.11. Estimación consumo medio de combustible (gr equivalente de petróleo por kilómetro)	116
Tabla 4.12. Valoración de cada alternativa de aparcamiento disuasorio respecto al criterio de eficiencia energética	117
Tabla 4.13. Iluminancia media y uniformidad media para diferentes clases de alumbrado para situaciones tipo D.....	118
Tabla 4.14. Requisitos mínimos de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado vial ambiental.....	118
Tabla 4.15. Estimaciones de emisiones de GEI (tCO ₂) debidas a la explotación de aparcamientos disuasorios en superficie.....	119
Tabla 4.16. Estimaciones de emisiones de GEI (tCO ₂) debidas a la explotación de aparcamientos disuasorios en estructura y/o bajo rasante.	120
Tabla 4.17. Superficie de la parcela ocupada por cada alternativa	120
Tabla 4.18. Superficie de suelo no ocupado en el centro	121
Tabla 4.19. Coste de construcción de cada aparcamiento disuasorio.....	121
Tabla 4.20. Coste del suelo de cada aparcamiento disuasorio.....	122

Tabla 4.21. Costes anuales de explotación de cada aparcamiento disuasorio	123
Tabla 4.22. Dimensiones (número de plazas) de cada aparcamiento disuasorio	123
Tabla 4.24. Demanda prevista (ocupación) de cada aparcamiento disuasorio	125
Tabla 4.25. Intensidad de tráfico (IMD) corredor de entrada de cada aparcamiento disuasorio	126
Tabla 4.26. Pérdida de tiempo en min/día por congestión en el corredor de entrada.....	126
Tabla 4.27. Evaluación de la Intermodalidad de cada aparcamiento disuasorio	127
Tabla 4.28. Proximidad a la red ciclista de Madrid de cada aparcamiento disuasorio	128
Tabla 4.29. Índice de peligrosidad (accidentalidad) del corredor de entrada de cada aparcamiento disuasorio	128
Tabla 4.30. Mejora de calidad de vida (percepción del usuario), valoración económica por ahorro de tiempo	130
Tabla 4.31 Matriz decisión aparcamientos disuasorios.....	131
Tabla 5.1. Valores normalizados matriz decisión muros. Método objetivo de ponderación de entropía.....	136
Tabla 5.2. Vector de pesos de los criterios de selección de tipologías de muros. Método objetivo de ponderación de entropía	136
Tabla 5.3. Coeficientes de correlación matriz decisión tipologías de muros	137
Tabla 5.4. Resultados método VIKOR modificado, S_i distancia de Mahalanobis, selección tipologías muros de contención	139
Tabla 5.5. Resultados método VIKOR modificado, R_i distancia de Mahalanobis, selección tipologías muros de contención	140
Tabla 5.6. Resultados método VIKOR tradicional, selección tipologías muros de contención	141
Tabla 5.7. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR modificado S-Mahalanobis, selección tipologías muros de contención	142
Tabla 5.8. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR modificado R-Mahalanobis, selección tipologías muros de contención	143
Tabla 5.9. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR tradicional, selección tipologías muros de contención.....	144
Tabla 5.10. Vector de pesos criterios de decisión de aparcamientos disuasorios, método de entropía.....	146
Tabla 5.11. Coeficientes de correlación matriz decisión aparcamientos disuasorios.....	148
Tabla 5.12. Nivel de significancia de correlación entre variables, matriz decisión aparcamientos disuasorios	149
Tabla 5.13. Resultados método VIKOR modificado, S_i distancia de Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios	151
Tabla 5.14. Resultados método VIKOR modificado, R_i distancia de Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios	152
Tabla 5.15. Resultados método VIKOR tradicional, selección aparcamientos disuasorios.....	153
Tabla 5.16. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR modificado S_i -Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios.....	154
Tabla 5.17. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR modificado R_i -Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios.....	156

Tabla 5.18. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR tradicional, selección aparcamientos disuasorios	158
Tabla 5.19. Vector de pesos criterios de decisión de aparcamientos disuasorios, método de entropía, caso particular 16 criterios selección	160
Tabla 5.20. Resultados método VIKOR modificado, S_i distancia de Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección.....	161
Tabla 5.21. Resultados método VIKOR modificado, R_i distancia de Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección.....	162
Tabla 5.22. Resultados método VIKOR tradicional, selección aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección	162
Tabla 5.23. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR modificado S_i -Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección.....	163
Tabla 5.24. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR modificado R_i -Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección.....	165
Tabla 5.25. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR tradicional, selección aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección.....	167

LISTADO DE FIGURAS

Figura 3.1. Etapas o fases del proceso de decisión.....	31
Figura 3.2. Muro de escollera en una carretera. Jaén (España)	88
Figura 3.3. Muro de tablestacas arriostradas con anclajes al terreno.	89
Figura 3.4. Muro jardinera de bloques de hormigón.....	91
Figura 4.1. Esquema de metodología de decisión.....	95
Figura 4.2. Localización de aparcamientos disuasorios.....	113
Figura 4.3. Aparcamiento informal en un solar próximo a la alternativa 11, “Aviación Española”	124
Figura 4.4. Gráfico de distribución de viajes según el motivo del desplazamiento.....	129
Figura 5.1. Correlación lineal entre los criterios C_1 y C_3 , en selección de tipologías de muros .	137
Figura 5.2. Correlación lineal entre los criterios C_1 y C_4 , en selección de tipologías de muros .	137
Figura 5.3. Correlación lineal entre los criterios C_2 y C_4 , en selección de tipologías de muros .	138
Figura 5.4. Correlación lineal entre los criterios C_2 y C_6 , en selección de tipologías de muros.	138
Figura 5.5. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR modificado S-Mahalanobis, en selección de tipologías de muros	143
Figura 5.6. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR modificado R-Mahalanobis, en selección de tipologías de muros.....	144
Figura 5.7. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR tradicional, en selección de tipologías de muros	145
Figura 5.8. Correlación lineal entre los criterios C_4 y C_7 , en selección de aparcamientos disuasorios	150
Figura 5.9. Correlación lineal entre los criterios C_7 y C_9 , en selección de aparcamientos disuasorios	150
Figura 5.10. Correlación lineal entre los criterios C_7 y C_9 , en selección de aparcamientos disuasorios	151
Figura 5.11. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR modificado S-Mahalanobis, en selección de aparcamientos disuasorios.....	155
Figura 5.12. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR modificado R-Mahalanobis, en selección de aparcamientos disuasorios.....	157
Figura 5.13. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR tradicional, en selección de aparcamientos disuasorios	159
Figura 5.14. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR modificado S-Mahalanobis, en selección de aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección.....	164
Figura 5.15. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR modificado R-Mahalanobis, en selección de aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección.....	166
Figura 5.16. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR tradicional, en selección de aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección.....	168



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN.

En Ingeniería y Arquitectura, para resolver un problema en ocasiones son varias las soluciones constructivas que dan cumplimiento a las especificaciones estructurales. Suele quedar en manos del proyectista la decisión de elegir aquella solución que cumple las especificaciones o factores que intervienen en el proceso de diseño, aportando otras cualidades y, siendo el entorno en el cual se va a construir la estructura el factor más importante a considerar de todos ellos.

De esta forma, los proyectos de infraestructuras incluyen, entre los anejos de la memoria, 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. Tomar una decisión implica que hay varias alternativas posibles que deben ser consideradas y, en cada situación, no sólo debemos identificar todas o gran parte de las alternativas posibles, sino que lo ideal es elegir la alternativa que mejor se ajusta a los objetivos planteados y que mejor cumple las especificaciones de proyecto.

Durante el desarrollo de un proyecto se toman decisiones complejas; esta complejidad viene marcada por el entorno de incertidumbre en el que se desarrollan. Son muchos los factores y especificaciones de proyecto que aumentan la complejidad de la decisión, así como la trascendencia que muchas de estas decisiones tienen para el proyecto, lo que incide en las responsabilidades que ello implica para proyectistas, para los agentes implicados o afectados por la decisión adoptada, así como por el número y tipología de soluciones que pueden resolver el problema.

La teoría y práctica de la Arquitectura, Ingeniería y la Construcción requiere métodos para estructurar la información de forma racional y poder exponerla de forma clara. Se trata de poder identificar de forma precisa y clara todos los elementos que determinan que un diseño sea el idóneo. Cada decisión que se tome durante el proceso de diseño debe asegurar que el diseño final sea el adecuado.

El proceso descrito no es completo ni cuenta con el rigor necesario si no se consideran todos los criterios, variables o requisitos de proyecto que intervienen en la selección de la tipología adecuada. Para la selección sostenible de alternativas, estos criterios deben ser identificados con requerimientos de sostenibilidad. En ocasiones, durante la fase de diseño se obvian criterios que a priori pueden ser menos relevantes pero que si no se consideran durante esta fase pueden producir un sobrecoste durante la fase de construcción o puesta en servicio de la infraestructura, o incluso puede llegar producir la ruina de la misma. Un ejemplo claro de lo comentado es el drenaje. Pero otro aspecto a tener en cuenta en el proceso, es que

a menudo estos criterios de selección están correlacionados, lo que puede influir en la metodología de decisión.

Según el diccionario de la RAE, decisión se define como: “*Determinación, resolución que se toma o se da en una cosa dudosa*”, de esta definición podemos sacar dos conclusiones: la primera, se trata de buscar una solución a un problema, y la segunda es que se realiza en un ambiente de incertidumbre.

Durante la vida cotidiana, tanto de manera individual como parte de una organización, el ser humano está continuamente tomando decisiones más o menos complejas. La toma de decisiones resulta por lo tanto un proceso habitual. La complejidad de las mismas está directamente relacionada con el nivel de incertidumbre del entorno y de la trascendencia de las acciones que conlleven la decisión adoptada.

El proceso de decisión es el estudio de la identificación y elección de alternativas basadas en los valores y preferencias de la persona que toma la decisión. Tomar una decisión implica que hay varias alternativas posibles que deben ser consideradas, y en cada caso, no sólo debemos identificar todas, o al menos, gran parte de las alternativas posibles, sino que queremos elegir la alternativa que mejor se ajusta a nuestros objetivos y que mejor cumple las especificaciones de proyecto.

Durante el desarrollo de un proyecto se toman decisiones complejas; esta complejidad viene marcada por el entorno de incertidumbre en el que se desarrollan. Son muchos los factores y especificaciones de proyecto que aumentan la complejidad de la decisión, así como la trascendencia que muchas de estas decisiones tienen para el proyecto, debido a las responsabilidades que ello implica para proyectistas, para los agentes implicados o afectados por la decisión adoptada y así como por el número y tipología de soluciones que pueden resolver el problema.

Son numerosos los ejemplos que existen en la bibliografía sobre los métodos de decisión multicriterio, y su aplicación a la selección de infraestructuras y los cuales son analizados en el apartado correspondiente de esta tesis, pero antes de ello, hay que indicar que todos ellos incluyen la definición de la matriz de decisión, construida por la valoración de cada alternativa respecto a cada criterio. Por otra parte, no se puede olvidar que en todos ellos, en mayor o menor medida, interviene la subjetividad del decisor.

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.

La principal ventaja del uso de los métodos multicriterio de decisión es la sencillez de aplicación y la versatilidad que ofrece para resolver cualquier problema en el que hay un número limitado y conocido de alternativas. Del mismo modo, la propia construcción del modelo de decisión ayuda al análisis del problema y sintetizar las posibles soluciones, así como la importancia relativa de los diferentes requisitos.

Pero, de igual forma tiene dos inconvenientes principales. El primero de ellos es que, alternativas que pueden ser potencialmente óptimas pueden ser descartadas porque nunca reciben la mayor valoración, sin embargo, son las alternativas que mejor cumplen los requisitos principales. Para evitar esto, en el análisis de alternativas y criterios, habrá que estudiarse con profundidad las ratios de importancia relativa entre criterios y si algún criterio puede ser determinante para la elección o descarte de una alternativa. En relación con esto, el segundo de los inconvenientes, es la determinación de la ponderación de los diferentes criterios. Hay diferentes métodos de asignación de pesos, que en mayor o menor medida evitan la subjetividad de este proceso y la influencia de las preferencias del decisor.

Otra cuestión a tener en cuenta en el estudio de métodos de decisión para la selección sostenible de alternativas en infraestructuras es la correlación entre variables. La mayor parte de los métodos de decisión, y que se estudian en el capítulo 3, no consideran la correlación entre variables, aspectos que son destacados por algunos autores en la bibliografía. Por ello, esta investigación, como parte del proceso de decisión, estudia cómo influye la correlación entre variables en las soluciones que proporciona el método de decisión aplicado.

En la tesis se profundiza en el estudio, aplicación y desarrollo de una metodología de decisión basada en el estudio de proximidad o menor distancia a la denominada “solución ideal”, entendida esta como una solución ficticia que es la que mejor se comporta para cada criterio de decisión. En el capítulo 3 se incluyen las expresiones matemáticas de la definición de distintas distancias métricas. Se propone una metodología de decisión basada en el concepto de distancia a la “solución ideal” que, en el caso de que exista correlación entre variables, esta medida de distancia tenga en cuenta dicha correlación.

La aplicación de cualquier metodología basada en un método de decisión multicriterio debe ser verificada mediante un análisis de robustez y un análisis de sensibilidad, siendo el primero de ellos el que determina la validez del modelo para que la solución óptima lo sea realmente entre un conjunto de soluciones. Por otra parte, el análisis de sensibilidad tiene como objetivo estudiar y descubrir el grado de sensibilidad de la solución óptima ante cambios en los factores o criterios esenciales.

La metodología desarrollada, como fruto de la investigación e incluida en el capítulo 4, y con el objeto de verificar su utilidad, se aplica a dos tipos de infraestructuras diferentes. Por un lado, a la selección de tipologías de estructuras de tierra o muros de contención en infraestructuras lineales, por el gran impacto medioambiental que tienen sobre el entorno, tanto visual como de barrera. Por otro lado, a la selección de la localización de aparcamientos

disuasorios, al ser una infraestructura determinante en los planes de movilidad urbana y en el establecimiento de medidas de restricción del tráfico en el centro de las grandes ciudades para la reducción de emisiones de gases contaminantes.

1.2. OBJETIVOS.

Objetivo general

El objetivo general de la presente investigación es diseñar, aplicar y validar una nueva metodología para la selección de la alternativa más adecuada y sostenible en proyectos de ingeniería e infraestructuras con diferentes criterios de selección: económicos, medioambientales, funcionales y sociales, y bajo condiciones de incertidumbre. Esta metodología constituirá una herramienta de apoyo en los procesos de decisión para analistas de inversiones, administraciones públicas, promotores privados, proyectistas y docentes.

Ventajas obtenidas al cumplir el objetivo general:

- La metodología desarrollada supondría una aplicación directa en la mejora de la selección de soluciones más sostenibles en el proyecto de infraestructuras.

Objetivos Específicos:

- Identificar todos los factores y criterios que influyen y pueden determinar la elección de la alternativa más adecuada y sostenible.
- Establecer la jerarquía entre las alternativas evaluadas a través de la utilización de varios métodos de decisión y comparación de resultados de dichas aplicaciones y las soluciones adoptadas en la práctica.
- Tener la certeza de que la solución, facilitada por la metodología desarrollada como idónea, es robusta y estable.

Ventajas obtenidas al cumplir los objetivos parciales:

- Mejoras y reducción de plazos durante la fase de diseño y en el análisis de alternativas.
- Sistematizar el proceso de selección de alternativas y especialmente el proceso de ponderación de criterios.
- Identificar los criterios de selección para el desarrollo sostenible de infraestructuras.

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.

La presente tesis desarrolla el análisis de los métodos de decisión multicriterio para la selección de alternativas en infraestructuras y la propuesta de una metodología de decisión con la aplicación de la distancia matemática de Mahalanobis para considerar la correlación entre variables. Una vez determinada la motivación de la investigación, así como los objetivos que se alcanzarán con el desarrollo de la misma, en este epígrafe se detalla el alcance y el contenido de cada uno de los capítulos que forman parte del presente documento de tesis.

De esta forma, en el capítulo 2 se realiza el planteamiento del problema y así como las preguntas a las que dará respuesta la investigación una vez finalizada.

En el capítulo 3 se recogen los fundamentos de la investigación y el estado del conocimiento sobre los aspectos básicos que conforman la investigación. De esta forma, el capítulo se configura con diferentes subcapítulos según el aspecto que se estudie.

En el subcapítulo 3.1 se estudia el concepto de sostenibilidad y aquellos indicadores de sostenibilidad que deben ser considerados como criterios de selección en cualquier selección de alternativas en proyectos de infraestructuras, si lo que se pretende es que ésta se realice desde el punto de vista de la sostenibilidad.

En el subcapítulo 3.2 se describen los diferentes métodos de decisión multicriterio, haciéndose un estudio más detallado de aquellos métodos de decisión que se basan en el concepto de distancia matemática, al ser éstos el punto de partida de la metodología que se desarrolla en la presente investigación. Por ello, se revisan las diferentes definiciones de distancia matemática, así como su formulación matemática. De igual forma, se analizan los métodos objetivos y subjetivos de ponderación de criterios de selección, los cuales permiten establecer la importancia relativa entre criterios de selección. Por último, en este subcapítulo se estudian los métodos de análisis de robustez y de sensibilidad que permiten determinar cómo se comportan las soluciones proporcionadas por los métodos de decisión multicriterio ante situaciones de incertidumbre.

En el subcapítulo 3.3. se estudian la bibliografía sobre aparcamientos disuasorios, especialmente estudiando aquellos aspectos que deben ser considerados en su planificación, así como sus implicaciones para lograr una movilidad urbana sostenible. De igual forma, en el subcapítulo 3.4. se estudian las diferentes tipologías de muros de contención que deben ser consideradas a la selección de alternativas.

En el capítulo 4, se establece la metodología de decisión desarrollada para considerar la correlación entre variables, para ello se propone una metodología de decisión consistente en un método VIKOR modificado con la aplicación de la distancia de Mahalanobis para el cálculo de la distancia de cada alternativa a la denominada "solución ideal". En este capítulo, en el subcapítulo 4.2. también se describen los casos de estudio de selección de muros de

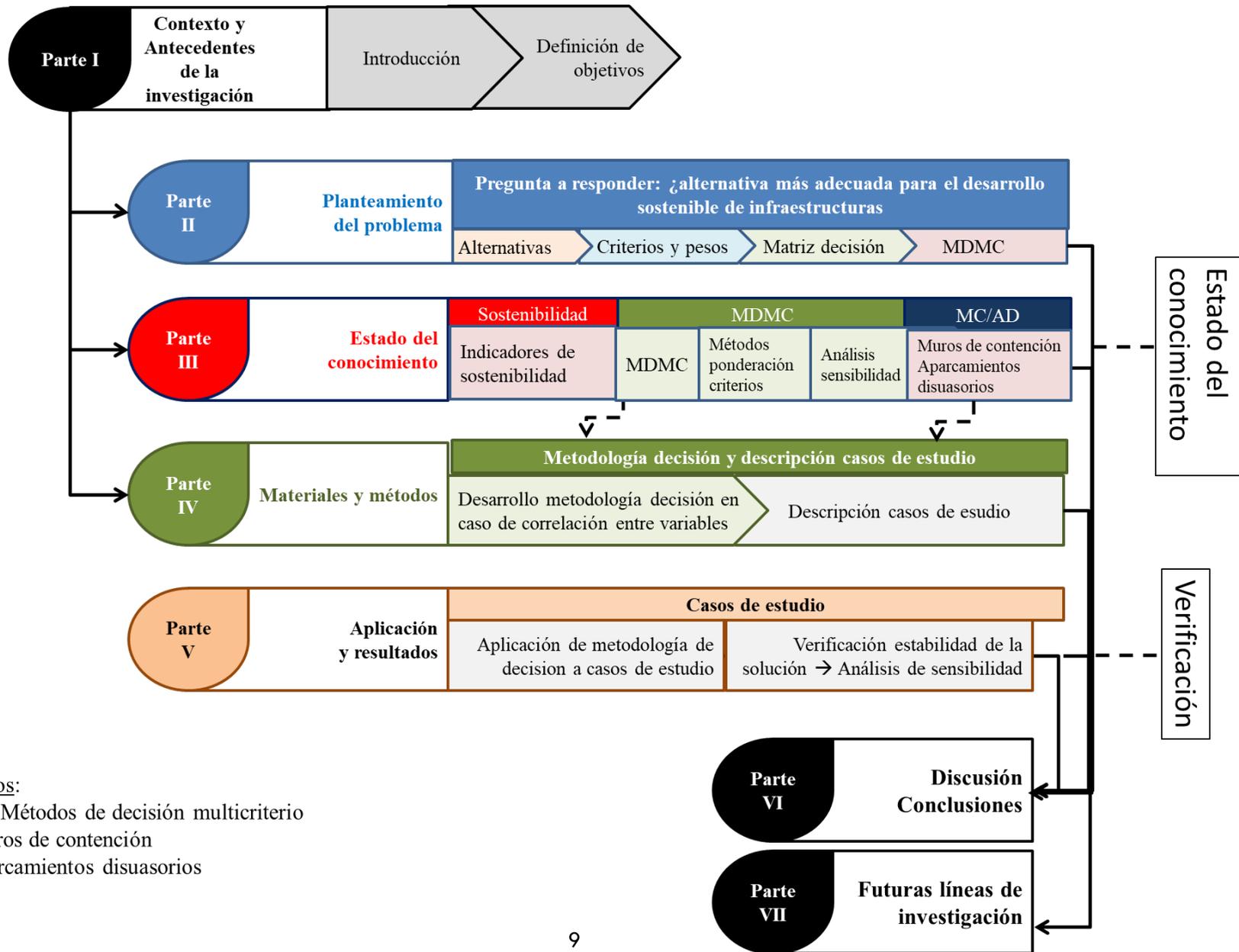
contención y de planificación de aparcamientos disuasorios. En este subcapítulo, se identifican las alternativas y criterios de selección, determinándose también la valoración de cada alternativa respecto a cada criterio de selección, obteniéndose de esta forma la matriz de decisión. Para la valoración de las alternativas respecto a criterios cualitativos, se han aplicado métodos de decisión multicriterio, en concreto, el método AHP, que permite, a través de comparaciones pareadas establecer la valoración de cada alternativa respecto a un criterio de selección cualitativo, como el de integración paisajística.

En el subcapítulo 4.3. se establece como se llevará a cabo el análisis de sensibilidad de la metodología de decisión desarrollada para verificar la estabilidad de las soluciones obtenidas, así como el criterio de selección que presenta un mayor coeficiente relativo de sensibilidad.

En el capítulo 5 se incluyen los resultados de la aplicación de la metodología desarrollada a los casos de estudio y los resultados del análisis de sensibilidad realizado en cada uno de los casos. Por último, este capítulo se incluye un caso particular del caso de estudio de selección de aparcamientos disuasorios el reducir el número de criterios de selección entre los que existe una correlación perfecta.

En el capítulo 6 se realiza una discusión de los resultados obtenidos y se recogen las conclusiones obtenidas con el desarrollo de la investigación realizada.

Por último, en el capítulo 7 se exponen aquellos aspectos que han quedado abiertos durante la investigación y que podrían ser objeto de futuras líneas de investigación.



Acrónimos:

MDMC: Métodos de decisión multicriterio

MC: Muros de contención

AD: Aparcamientos disuasorios



CAPÍTULO 2: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

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 y/o mejora la calidad de vida de los ciudadanos, menores molestias a los usuarios de las infraestructuras, permite la dualidad de usos, permite reducir la contaminación del aire, etc. Y siempre se debe asociar este concepto a la perduración en el tiempo de los recursos.

Por lo anterior, los proyectistas deben seleccionar aquellas soluciones constructivas que mejor se adapten a los requisitos 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 alternativas posibles y se evalúan todos los criterios que pueden afectar a la selección, incluyendo criterios económicos, medioambientales, funcionales y sociales, y ponderando de forma adecuada la importancia relativa de los mismos en cada proyecto, y sistematizando el proceso de decisión para reducir la subjetividad del decisor.

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 requisitos de proyecto serán diferentes, pero también los mismos requisitos, criterios o factores tendrán una importancia relativa distinta en cada proyecto o infraestructura.

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.

El planteamiento del problema es el siguiente:

- Pregunta a responder, ¿cuál es la alternativa más adecuada para el desarrollo sostenible de infraestructuras?
- Para la resolución, contamos con varias alternativas (A_i), que son las diferentes alternativas.
- La solución a adoptar está condicionada por una serie de criterios, factores o requerimiento de proyecto (C_i). Pero no todos los criterios tienen la misma importancia en la decisión adoptada, por lo cual, los mismos deben ser ponderados en cada caso particular según unos pesos (w_i)
- Si representamos el problema en una matriz, obtendríamos una matriz A en la cual, a_{ij} , son las valoraciones obtenidas para cada alternativa (A_i), según el criterio (C_j).

- Identificar a través del coeficiente de correlación de Pearson, que determina si hay correlación lineal entre variables, si existe correlación entre variables.
- Aplicar la metodología de selección adecuada para determinar la alternativa que, con los criterios de sostenibilidad seleccionados y ponderados, más se acerca a la “solución ideal” y la clasificación de las alternativas en función de esta distancia de cada alternativa a la indicada “solución ideal”.
- Por último, es necesario saber cómo se comporta la solución (o conjunto de soluciones), si se producen en las condiciones de partida tanto en la valoración de las alternativas como en las preferencias del decisor.



CAPÍTULO 3: FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO

3.1. SOSTENIBILIDAD EN PROYECTOS DE INGENIERÍA

3.1.1. CONCEPTO DE SOSTENIBILIDAD. ORIGEN Y ANTECEDENTES.

El concepto de desarrollo sostenible surgió como consecuencia de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano que se celebró en 1972 en Estocolmo (Suecia), (Conte and D'elia 2018), pero su definición y utilización de forma generalizada se produjo a partir del Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de Naciones Unidas, "Nuestro Futuro Común", también conocido como "Informe Brundtland", (Brundtland 1987). Es en este informe, donde el término se asocia al concepto de continuidad de los recursos para futuras generaciones, de esta forma se determina que *"...El desarrollo duradero trata de satisfacer las necesidades y las aspiraciones del presente sin comprometer la facultad de continuar haciéndolo en el futuro ..."*. A partir de este momento, se celebran varias conferencias en diferentes países en las que participan los gobiernos de la mayor parte de las naciones del mundo y en las cuales se adquieren diferentes compromisos de sostenibilidad y se introducen nuevos términos relacionados con la preservación de los recursos, (Conte and D'elia 2018).

Posteriormente, la Asamblea de las Naciones Unidas convoca la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, celebrada en junio de 1992 en Río de Janeiro en Brasil, conocida como Cumbre para la Tierra. Los objetivos de la Cumbre eran *"... lograr un equilibrio justo entre las necesidades económicas, sociales y ambientales de las generaciones presentes y de las generaciones futuras y sentar las bases para una asociación mundial entre los países desarrollados y los países en desarrollo, así como entre los gobiernos y los sectores de la sociedad civil, sobre la base de la comprensión de las necesidades y los intereses comunes"*. (Naciones Unidas 1997). La propia definición de los objetivos fundamentales de la Cumbre refleja las tres variables (o campos) de la sostenibilidad: necesidades económicas, sociales y ambientales.

El concepto de sostenibilidad ha sido un concepto en evolución a lo largo de los años. En una primera etapa, el significado del término se centraba en el medio físico-natural como consecuencia de la preocupación del aumento de la contaminación y la degradación de los océanos. En este sentido se firmaron importantes acuerdos entre países de todo el mundo, durante los años 60 y 70, como el Acuerdo de Londres firmado en 1972 para proteger el medio ambiente marino, (IMO 1972). En una segunda etapa, los esfuerzos de los diferentes países evolucionaron hacia la preservación de los recursos naturales, la flora y la fauna, (Saura-Calixto and Hernández-Prados 2008). En una última etapa, el concepto de sostenibilidad se ha ligado al de desarrollo sostenible (Informe Brundtland), y ambos términos vinculados a las tres dimensiones mencionadas: ambiental, económica y social. También es necesario recordar, para evitar caer en errores, que ambos conceptos se utilizan en ocasiones de forma arbitraria y como términos de "que están de moda", (Ebel and Kissmann 2011).

Con los antecedentes descritos, en 2015 se producen tres acuerdos en favor del desarrollo sostenible: la firma del acuerdo de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, (Naciones Unidas 2015b), el acuerdo de París (UNFCCC. Conference of the Parties (COP) 2015) y el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, (Naciones Unidas 2015a). Con la firma de estos tres acuerdos, los países de Naciones Unidas ponen de manifiesto la necesidad de aunar esfuerzos para la lucha contra el cambio climático en aras a lograr un desarrollo sostenible y resiliente ante unas condiciones climáticas cambiantes. El Acuerdo de París ha supuesto la implicación de los gobiernos, del sector privado o de la sociedad civil para que la acción climática y el desarrollo sostenible sean objetivos comunes en todos los ámbitos.

La firma de la Agenda 2030 y con ello los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) han supuesto la supuesto uno de los mayores logros en el ámbito de la sostenibilidad. Por otra parte, hay que indicar que la ingeniería y el desarrollo de infraestructuras tienen una gran relevancia e importancia para lograr un desarrollo sostenible, luchar contra el cambio climático y los efectos nocivos de los desastres naturales. En este sentido, varios de los ODS tienen relación directa con la ingeniería y el desarrollo de infraestructuras, (Naciones Unidas n.d.):

- Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento
- Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante
- Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructuras
- Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles.

En relación con la presente tesis, cobran especial importancia los objetivos 9 y 11. En este sentido, el ODS nº9, establece que para conseguir una economía robusta se necesitan inversiones en infraestructuras de transporte, las cuales permitirán un desarrollo sostenible, fomentar una mayor estabilidad social y conseguir ciudades más resistentes al cambio climático. De igual forma, la meta 1 del ODS nº9 indica que hay que desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo especial hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos, (Naciones Unidas n.d.). Esto obliga a establecer una serie de criterios para la selección de alternativas que cumplan estos objetivos de sostenibilidad.

El ODS nº11, establece la necesidad de lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. El logro de este objetivo unido a las medidas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero establecidos en el Acuerdo de París, obliga a las autoridades municipales a implementar medidas de regulación y planificación urbanística que permitan la movilidad de los ciudadanos de forma segura y sostenible. Este aspecto queda detallado en la meta 11.2 de los ODS, *“De aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de edad”*, (Naciones Unidas n.d.). En el informe del año 2019 de seguimiento de ODS realizado por Naciones Unidas para

comprobar el balance del progreso mundial del cumplimiento de los mismos, respecto al objetivo 11, se constata que *“el transporte público es un servicio esencial para la población urbana y un catalizador para el crecimiento económico y la inclusión social”*, (Naciones Unidas 2019). Además, se ha comprobado que ha aumentado el número de desplazamiento a las zonas urbanas, así como el uso del transporte público para reducir los niveles de contaminación y la emisión de gases contaminantes. En definitiva, en la mayoría de los países, el número de personas que utilizan el transporte público aumentó en casi un 20% entre los años 2001 y 2014, esto es posible gracias a una adecuada planificación de la movilidad urbana.

Recientemente, los efectos de la pandemia del COVID han provocado cambios en la movilidad urbana. Por una parte, los ciudadanos demandan sistemas de transporte públicos seguros y que permitan garantizar la distancia interpersonal de seguridad. Por otra parte, ha conllevado un aumento del teletrabajo, que una vez pasado el confinamiento general, se ha mantenido en gran medida. El aumento del teletrabajo ha desencadenado un aumento de las mudanzas residenciales hacia ubicaciones suburbanas, donde los precios de la vivienda por metro cuadrado son más bajos y permiten una calidad de vida mayor y un entorno más saludable. Ambas cuestiones pueden provocar que aumenten las distancias de viaje para acceder a los centros de las ciudades lo que puede conllevar un mayor uso del vehículo privado y como consecuencia, un mayor daño ambiental, (Abdullah et al. 2021). Sin embargo, la pandemia también ha provocado el fomento de otros medios de transporte urbano como es el uso de la bicicleta. En este sentido, algunos autores consideran que la crisis del COVID-19 tiene el potencial de tener un papel catalizador para llegar a un sistema de movilidad más sostenible, (Macharis et al. 2021). Respecto a estos aspectos, hay que indicar que el uso de medios de transporte como la bicicleta, tiene que apoyarse en un sistema adecuado de intermodalidad de transporte, especialmente, si se produce un aumento de movimientos poblacionales hacia el exterior de las grandes ciudades.

Otro concepto similar al de desarrollo sostenible, y más idóneo al ámbito de la presente tesis, es evaluación de la sostenibilidad, *sustainability assessment*. Este término se refiere a una metodología que puede ayudar a los responsables de la toma de decisiones y de formular políticas a decidir qué acciones deben tomar en un intento de hacer que la sociedad sea más sostenible, (Suprayoga et al. 2020). En este sentido, los proyectos de infraestructuras deben ser evaluados para conocer el alcance e impacto del desarrollo de los mismos en la sociedad, desde un punto de vista ambiental, social, económico y funcional. Por ejemplo, un proyecto de transportes es valorado según la evaluación de la sostenibilidad para verificar si contribuye a favorecer el desarrollo económico y satisfacer las necesidades de transporte de la sociedad de una manera consistente con los valores ecológicos y humanos, (Bueno Cadena and Vassallo Magro 2015).

3.1.2. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD

Para la presente investigación, se ha realizado una revisión de los indicadores de sostenibilidad establecidos por diferentes organizaciones y estudiados por otros investigadores. Se ha estimado que es necesario esta revisión de indicadores porque serán los que determinen la selección de criterios que permitan realizar una evaluación de la sostenibilidad de cada alternativa en la aplicación de métodos de decisión multicriterio para la selección de soluciones sostenibles de las diferentes alternativas de infraestructuras.

Los indicadores son una herramienta necesaria para el desarrollo y control de la sostenibilidad y para medir sus avances, los cuales son definidos para obtener información y datos, (Arce Ruiz, Palomino Monzón, and García Durango 2006). Los indicadores son una variable o valor resultante de un conjunto de ellas que permiten medir el resultado de un fenómeno. Por lo cual, son herramienta que permiten medir el desarrollo y control de la sostenibilidad, (Iturbe et al. 2010). Otros autores, consideran los indicadores como herramienta que proporcionan información de forma sintética sobre una realidad compleja que facilitan su descripción y análisis, (Arce Ruiz et al. 2006). Para la presente investigación, el estudio de indicadores de sostenibilidad permite identificar aquellos aspectos (variables o criterios) que deben ser considerados en el análisis de alternativas en infraestructuras si el objetivo que se persigue es identificar aquellas soluciones más sostenibles.

En primer lugar, y tras una primera reflexión fruto de la revisión bibliográfica, los indicadores de sostenibilidad, al igual que el propio concepto de sostenibilidad, se pueden agrupar en tres grupos principales: medioambientales, económicos y sociales. Por otra parte, a la hora de definir indicadores de sostenibilidad hay que tener en cuenta que no todos los indicadores sirven para todos los proyectos de infraestructuras y éstos están directamente relacionados con la funcionalidad de la propia infraestructura.

Por otra parte, las instituciones fijan, para su ámbito de competencia, indicadores de sostenibilidad, tanto a nivel local, regional y nacional. Centrándonos en el ámbito del desarrollo de las infraestructuras y la construcción, y a modo de ejemplo, en edificación hay más de 70 herramientas para la evaluar la sostenibilidad de los proyectos basadas en indicadores, (Fernández Sánchez 2010). En el caso de ingeniería civil, a priori, es difícil seleccionar un grupo de indicadores, porque en cada caso serán diferentes según la funcionalidad de la infraestructura, es obvio que no puede evaluarse de la misma forma la sostenibilidad de una infraestructura lineal que un proyecto de planificación urbana para establecer un conjunto de medidas para conseguir una movilidad más sostenible en entorno urbano. En este sentido, en la literatura y en la práctica, a la hora de definir criterios de sostenibilidad en ocasiones se recurre a opiniones de expertos, (Fernández Sánchez 2010), y en esto se basan muchos análisis de decisión multicriterio para definir criterios y para la ponderación de los mismos para reflejar la importancia relativa entre ellos.

Para el estudio de indicadores de sostenibilidad para infraestructuras, es conveniente comenzar el mismo en el ámbito internacional para luego ir bajando hasta un ámbito nacional, regional y/o local. En este sentido, si se centra la atención en los indicadores fijados por Organismos Internacionales, a modo de ejemplo, podemos citar la Organización Internacional de Normalización (*International Organization for Standardization*) en la norma ISO21929-1, (ISO 2011), describe y da directrices para la elaboración de indicadores de sostenibilidad relacionados con los edificios y define los aspectos de los edificios que deben considerarse al elaborar sistemas de indicadores de sostenibilidad. Estas directrices constituyen una base para el conjunto de normas ISO/TC 59 destinadas a abordar cuestiones y aspectos específicos de la sostenibilidad pertinentes a las obras de construcción. En la introducción de estas normas se incide en los tres aspectos básicos de la sostenibilidad: medioambientales, económicos y sociales y la importancia de la construcción (edificación e ingeniería civil) en la calidad de la vida de los ciudadanos y en la influencia que ejerce en la identidad y en el patrimonio cultural. En esta norma, se establecen trece indicadores principales que se clasifican según la localización de la construcción, la relación con el entorno y sobre la propia construcción, entre ellos podemos citar algunos como: cambios en los usos del suelo, costes de la infraestructura considerando todo el ciclo de vida, emisiones de gases de efecto invernadero, calidad estética, entre otros.

Otros organismos internacionales como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD) han establecido indicadores de sostenibilidad, (OECD Environment Directorate 2004). De hecho, la OECD fue pionera en el establecimiento de indicadores medioambientales, desde los primeros años de la década de los años 90. Actualmente, y después de varias revisiones, han establecido 10 indicadores clave (*key indicators*) (OECD Environment Directorate 2004). De los cuales, cinco son indicadores que miden la calidad del aire y la polución, y que son los siguientes: 1. Índice de emisiones de CO₂; 2. Intensidad de emisiones de sustancias que agotan la capa de ozono; 3. Intensidad de emisiones de SO_x y NO_x; 4. Índice de generación de residuos sólidos urbanos; 5. Ratio de tratamiento de aguas residuales. El resto miden la gestión de los recursos naturales: 6. Intensidad de uso de los recursos hídricos; 7. Intensidad de uso de los recursos forestales; 8. Intensidad de uso de los recursos pesqueros; 9. Índice de medición de recursos energéticos; 10. Indicador de biodiversidad por el número de especies amenazadas.

En el ámbito nacional, el Observatorio de Sostenibilidad de España, en su informe de 2005, utiliza los indicadores que forman parte de los siguientes sistemas: Indicadores de Sostenibilidad (en gran parte de sostenibilidad ambiental), Indicadores ambientales llamados troncales y los Indicadores Estructurales Comunitarios, que son: Producto Interior Bruto (PIB) per cápita, Productividad del trabajo, Tasa de empleo, Tasa de empleo de trabajadores por edad, Gasto en Recursos Humanos, Gasto en I+D, Gasto en TI, Integración de los mercados financieros, Tasa de riesgo de pobreza, Tasa de paro de larga duración, Tasa de dispersión regional del empleo, Emisiones de gases de efecto invernadero, Intensidad energética de la economía, Intensidad en transporte de la economía, (Iturbe et al. 2010).

En el ámbito nacional y en relación con las infraestructuras, en 2010, el Ministerio de Fomento publicó el Libro Blanco de la Sostenibilidad en el Planeamiento Urbanístico Español, en cuyo anexo I se incluyó el listado de criterios de sostenibilidad que deben ser tenidos en cuenta cualquier proyecto de planeamiento urbano, (Ministerio de Fomento 2010). Estos criterios de actuación e indicadores se agrupan en 7 ámbitos:

1. Criterios de actuación sobre el entorno de la ciudad
2. Criterios de actuación en suelo urbano
3. Criterios de actuación en temas de transporte: medidas para reducir distancias, potenciar los medios de transporte no motorizados, fomentar el transporte público frente al transporte motorizado privado,
4. Criterios de actuación en cuanto a recursos: energía (como fomentar el uso de energía renovables), agua, minimizar el impacto de los materiales de construcción.
5. Criterios de actuación en cuanto a residuos: reducir los residuos, gestionar los residuos para reducir su impacto,
6. Criterios de actuación en temas de cohesión social
7. Criterios de actuación en temas de gobernanza: transparencia administrativa, favorecer la formación de los ciudadanos, integrar la participación en el planeamiento.

De igual forma, el Ministerio de Medio Ambiente redactó en 2010, el documento “Sistema de Indicadores y Condicionantes para Ciudades Grandes y Medianas”. Desarrollado conjuntamente con el Observatorio de Sostenibilidad de España y la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, realiza una contribución determinante en la definición del modelo de ciudad sostenible e identificación de sus atributos, proponiendo un sistema de indicadores de aplicación al planeamiento para la transformación de los tejidos existentes así como al diseño de nuevos desarrollos urbanos bajo el concepto de urbanismo ecológico, y que es seguido para la realización del Informe de Sostenibilidad de los Planes Generales como es el caso de la ciudad de Madrid, (Ayuntamiento de Madrid 2013).

Para otros tipos de proyectos de infraestructuras como proyectos de carreteras, diferentes autores han establecido sistemas de indicadores para determinar qué criterios de sostenibilidad deben ser seleccionados para evaluar las diferentes alternativas, (Suprayoga et al. 2020).

Con el objetivo de alcanzar una movilidad sostenible, especialmente en el ámbito urbano, muchos investigadores han planteado conjuntos de indicadores que deben considerarse, incluyendo indicadores no solo ambientales, económicos y sociales, sino también indicadores de funcionalidad o de rendimiento del propio sistema de movilidad, (Gillis, Semanjski, and Lauwers 2016). Este hecho es fundamental para determinar y analizar a través de métodos de decisión multicriterio qué alternativas se comportan mejor. En este sentido, para un proyecto de infraestructuras que implica cambios o mejoras en la movilidad urbana, Gillis et al. (2016) consideran que es necesario considerar los siguientes 22 indicadores:

Tabla 3.1. Listado de 22 indicadores de movilidad sostenible.

criterio / indicador sostenibilidad	Ámbito
Emisiones de gases de efecto invernadero	Medioambiental
Eficiencia energética	Medioambiental
Financiación pública	Económico
Congestión y retrasos	Económico
Costes de oportunidad	Económico
Tiempo de viaje en los desplazamientos	Económico
Ocupación de suelo del sistema movilidad	Calidad de vida
Calidad del espacio público ocupado	Calidad de vida
Accesos al sistema de movilidad	Calidad de vida
Seguridad vial	Calidad de vida
Barreras acústicas	Calidad de vida
Emisiones de partículas contaminantes al aire	Calidad de vida
Comodidad y confort	Calidad de vida
Accesibilidad para grupos con movilidad reducida	Funcionamiento sistema movilidad
Asequibilidad del transporte público para el grupo más pobre	Funcionamiento sistema movilidad
Seguridad	Funcionamiento sistema movilidad
Diversidad funcional	Funcionamiento sistema movilidad
Conectividad intermodal	Funcionamiento sistema movilidad
Integración intermodal	Funcionamiento sistema movilidad
Resiliencia ante desastres y perturbaciones ecológicas / sociales	Funcionamiento sistema movilidad
Ratio de ocupación	Funcionamiento sistema movilidad
Oportunidad para una movilidad activa	Funcionamiento sistema movilidad

Fuente: How to monitor sustainable mobility in cities? Literature review in the frame of creating a set of sustainable mobility indicators. (Gillis et al. 2016).

3.1.3. INGENIERÍA E INFRAESTRUCTURAS SOSTENIBLES.

El concepto de construcción sostenible nació en el año 1994, a un nivel táctico tanto para edificación como para ingeniería civil, (Fernández-Sánchez and Rodríguez-López 2010). Y es a partir de este momento cuando empieza a surgir nuevos requisitos en los proyectos de construcción vinculados a los aspectos fundamentales de la sostenibilidad (medioambiental, social y económico). De manera que los proyectos comienzan a incorporar además de los requisitos propios de la construcción como precio, plazo y calidad, otros relacionados con la sostenibilidad, (Fernández Sánchez 2010). Pero al mismo tiempo, es necesario incorporar nuevas herramientas y métodos de evaluación de los proyectos para la toma de decisiones al tener que considerar todos los aspectos del proyecto desde el inicio, es decir, desde la fase de diseño, construcción, explotación y final de su vida (desmantelamiento), (Fernández Sánchez 2010). Es necesario, evaluar el proyecto y todas las alternativas posibles, desde el punto de vista del denominado análisis del ciclo de vida.

Hay pocos sectores productivos o de actividad que, como la ingeniería civil y la construcción, como parte de ella, incidan de una forma más directa en el medio ambiente y en la sociedad, por lo tanto, que influyan de una forma más directa en el desarrollo sostenible de un país o de una región. Si analizamos cualquier proyecto de infraestructuras, se pueden realizar las siguientes afirmaciones:

- Cualquier actividad de ingeniería civil produce un impacto directo y con carácter permanente sobre el medio ambiente.
- Las infraestructuras contribuyen al desarrollo económico y social de la región en la que se construyen.
- Las infraestructuras cambian el territorio.
- Para la construcción de infraestructura se utilizan recursos naturales y generan residuos durante toda la vida de la infraestructura
- Pero al mismo tiempo las infraestructuras resuelven directamente problemas ambientales como gestión del agua, gestión de residuos, construcción de equipamientos, obras de recuperación ambiental.

La industria de la construcción es uno de los sectores económicos más importantes de España y de Europa. A nivel europeo, esta industria (que incluye proyectistas, contratistas, fabricantes de productos de construcción y servicios profesionales de construcción) genera casi el 10% del producto interno bruto y proporciona 20 millones de empleos directos, (Pero et al. 2017). Al mismo tiempo, sin embargo, el progreso continuo y la expansión de las empresas de construcción están cada vez más asociados con una serie de desafíos de desarrollo sostenible, aunque el sector de la construcción siempre se ha asociado con causar graves problemas ambientales como: el consumo excesivo de energía y recursos naturales, la contaminación, e incluso la destrucción, del medio ambiente circundante, de generar un impacto sobre el cambio climático al afectar la calidad del aire y el agua en las ciudades y en zonas rurales, y la generación de vertederos para residuos. Según la Unión Europea, la industria de la construcción emplea aproximadamente un tercio de la energía total de Europa; ese valor aumenta hasta un 50% cuando se consideran otras actividades auxiliares como, por ejemplo, el transporte o la fabricación de materias primas. A nivel europeo, la industria de la construcción también es responsable de aproximadamente el 35% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas consideraciones son también válidas para los Estados Unidos, donde la industria de la construcción tiene impactos considerables en el medio ambiente, economía y sociedad: consume aproximadamente el 30% de las materias primas y el 25% de agua, y produce el 30% de los residuos del país, (Pero et al. 2017).

Ante esto, hay autores que realizan una serie de reflexiones y señalan que éstas deben ser hechas por todos aquellos con responsabilidades en el desarrollo de infraestructuras, (Fenner and Ainger 2020):

- ¿Cómo cree que su proyecto puede producir beneficios más amplios para el bienestar social, y no solo para cumplir objetivos económicos a corto plazo?
- Dada la larga vida de los activos en el entorno construido, ¿cómo responde su proyecto a la entrega justa de las necesidades a corto plazo sin exacerbar los riesgos vinculados a las tendencias ambientales aceptadas a largo plazo?
- ¿Cómo puede su proyecto satisfacer las necesidades con soluciones que supongan bajas o nulas emisiones netas de dióxido de carbono, sin pérdida de biodiversidad y mínimo agotamiento de recursos?

- Al buscar una integración más amplia del sistema, ¿cómo ha optimizado la economía circular de los materiales y ha brindado beneficios multifuncionales y operabilidad con otros servicios de la infraestructura?
- ¿Cómo permite la solución adoptada que la próxima generación se adapte o corrija aquellos que su generación no ha pensado?

Hay que recordar en este punto que la industria de la construcción y del desarrollo de infraestructuras es muy particular. Una frase que se repite mucho en el sector es que no hay dos proyectos iguales, y es cierto. Por lo cual, a la hora de valorar y evaluar un proyecto, y en especial desde el punto de la sostenibilidad hay que evaluar el proyecto de una forma integral, y durante toda la vida del mismo, como se ha comentado con anterioridad. Pero además de evaluar el proyecto en sí, es necesario evaluar la influencia del mismo en el entorno ambiental, la influencia que pueda tener el entorno socioeconómico de la región o comarca en la que se construye la infraestructura y, también la influencia de la misma, por ejemplo, en la calidad de vida de sus habitantes.

En la literatura no se encuentran muchos modelos que realicen una evaluación sostenible integral de los proyectos de infraestructuras, (Rodríguez and Fernández 2010). Sin embargo, sí hay muchos modelos de evaluación sostenible considerando el aspecto medioambiental, que es uno de los tres aspectos de la sostenibilidad, pero pocos consideran todos los aspectos de forma conjunta. En este sentido, la mayor parte de las autoridades ambientales de los diferentes gobiernos de los países desarrollados han legislado ampliamente la evaluación ambiental de los proyectos de infraestructuras. A modo de ejemplo, para el caso de España, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, publica en su página web la legislación aplicable en evaluación ambiental, (Miteco (Ministerio para la Transición Ecológica) 2013b). Dentro de las normas de aplicación para la evaluación ambiental de proyectos, planes y programas en el ámbito nacional destaca la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental, en cuyo preámbulo se define la evaluación ambiental como *“un instrumento plenamente consolidado que acompaña al desarrollo, asegurando que éste sea sostenible e integrador”*, (Miteco (Ministerio para la Transición Ecológica) 2013a). En el preámbulo de la Ley también se indica que la evaluación ambiental es indispensable para la protección del medio ambiente y facilita la incorporación de los criterios de sostenibilidad en la toma de decisiones estratégicas.

En el ámbito europeo, son de aplicación la Directiva 2001/42/CE, de 27 de junio, sobre evaluación de las repercusiones de determinados planes y programas en el medio ambiente, y por la Directiva 2011/92/UE, de 13 de diciembre, de evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente, (Miteco (Ministerio para la Transición Ecológica) 2013b). En el ámbito internacional, es de aplicación el Convenio sobre evaluación del impacto en el medio ambiente, en un contexto transfronterizo, de 25 de febrero de 1991, conocido como Convenio de Espoo y ratificado por nuestro país el 1 de septiembre de 1992 y su Protocolo sobre evaluación ambiental estratégica, ratificado el 24 de junio de 2009, (Naciones Unidas 1991). En este Convenio se define la evaluación del impacto

medioambiental como “un procedimiento nacional destinado a evaluar el probable impacto que una actividad propuesta tendrá en el medio ambiente” y de esta forma se entiende por impacto a “los efectos causados por una actividad propuesta en el medio ambiente, incluidos la salud y la seguridad de los seres humanos, la flora, la fauna, el suelo, la atmósfera, el agua, el clima, el paisaje y los monumentos históricos u otras estructuras materiales o la interacción entre esos factores; incluye asimismo las repercusiones sobre el patrimonio cultural o las condiciones socioeconómicas que se deriven de las alteraciones de esos factores”, (Naciones Unidas 1991).

Aunque las regulaciones nacionales, comunitarias e internacionales establecen la necesidad de realizar una evaluación ambiental de los proyectos considerando aspectos socioeconómicos como parte del aspecto ambiental de la sostenibilidad, sin embargo, como se ha comentado con anterioridad, en la literatura no se encuentran muchas metodologías que contemplen una evaluación integral de la sostenibilidad de los proyectos de infraestructuras. Varios autores han analizado la inclusión de criterios sociales sostenibles, *sostenibilidad social*, en proyectos de construcción públicos de diferentes países, (Montalbán-Domingo et al. 2019). Para ello se consideraron 451 proyectos de 10 países, tanto de edificación como de obra civil. Se valoró el procedimiento de adjudicación, la cuantía (tamaño) del proyecto y si el momento de entrega de la infraestructura se realiza a la finalización de la construcción, o por el contrario este momento está diferido por realizarse la explotación en forma de concesión. Entre los criterios sociales sostenibles considerados se citan los siguientes: efectos sobre el patrimonio cultural, empleabilidad, seguridad y salud, formación de los trabajadores en sostenibilidad, efectos en los usuarios, medidas para el desarrollo local y ética profesional en el desarrollo de los trabajos y en el reclutamiento de empleados. Si se analizan estos criterios, la mayoría de los mismos solo consideran el período de ejecución de la infraestructura objeto del proyecto. Además los resultados obtenidos indicaron que los criterios sociales que con mayor frecuencia aparecían eran: seguridad y salud, empleabilidad, la ética profesional y el efecto sobre los usuarios, (Montalbán-Domingo et al. 2019). Esto nos indica que en la mayor parte de los casos, la evaluación sostenible de los proyectos no contemplan criterios sociales durante toda la vida del proyecto.

En la práctica, para la evaluación de la sostenibilidad, los proyectistas a menudo se basan en su experiencias previas y en su intuición, esto se debe a la inexistencia de una metodología estructurada para la evaluación de la sostenibilidad de forma integrada en la gestión de proyectos, tanto en la fase de diseño y de construcción, (Ugwu et al. 2006). Y por otra parte, los métodos de evaluación de la sostenibilidad estudiados a través de la literatura, en general son métodos diseñados en su origen para ser utilizados con otros objetivos y que pueden ser aplicados para el caso de estudio. Estos métodos tienen dos deficiencias principales: el sesgo de la subjetividad y que no es fácil el automatismo en su aplicación.

Estos métodos de evaluación lo que pretenden es determinar qué alternativa se acerca más al concepto de *proyecto sostenible*, y podemos clasificarlos en dos grandes grupos, (Fernández Sánchez 2010):

1. **Análisis coste-beneficio:** El análisis coste-beneficio (ACB – *CBA -cost-benefit analysis*-) es una metodología que permite determinar si un proyecto es adecuado y, si lo es, en qué medida desde un punto de vista socioeconómico, para ello es necesario evaluar de forma exhaustiva los costes y beneficios del proyecto, (Aguaza Ortega 2012). Esta metodología se ha aplicado a la evaluación de la sostenibilidad de proyectos de infraestructuras y determinadas actividades de ingeniería, llamándose en este caso eco-eficiencia (Birch et al. 2010). La metodología determina los servicios y beneficios producidos por el proyecto en términos económicos respecto a las cargas negativas del proyecto en el entorno ambiental. Para la evaluación de la sostenibilidad en proyectos de edificación, la herramienta CASBEE de Japón, se basa en este concepto de ecoeficiencia, y define la Eficiencia Medioambiental del Edificio como indicador definido como una relación entre las características de rendimiento y calidad medioambiental del edificio con las cargas o costes medioambientales asociados, (Macías and Navarro 2010). La mayor dificultad de la aplicación de esta metodología es la ausencia de datos objetivos y de unidades financieras comparables que permita la valoración económica tanto de los beneficios como de los costes, (Fernández Sánchez 2010).
2. **Métodos de Decisión Multicriterio:** Los métodos de decisión multicriterio (MDMC) (*MCDM – Multicriteria Decision Making*) son estudiados en profundidad en el siguiente epígrafe de este documento. De manera general, los métodos de decisión multicriterio son los métodos más usados en problemas de toma de decisiones. Existe un amplio número de métodos que se incluyen en este grupo y cuya complejidad de aplicación y sofisticación varían mucho. Con la aplicación de los mismos se trata de evaluar la sostenibilidad a través de la obtención de una “puntuación” o bien, la obtención de un listado o “ranking” de alternativas, siendo las primeras de ellas más sostenibles según unos determinados criterios o indicadores. La principal dificultad de este tipo de métodos es la ponderación o determinación del peso de cada criterio (importancia relativa), proceso que se ve condicionado por la subjetividad del decisor. Aunque esta metodología es estudiada en profundidad en epígrafes siguientes, a modo de ejemplo, podemos citar varios trabajos realizados por otros autores para evaluar la sostenibilidad de diferentes proyectos. Los autores utilizaron métodos sencillos como el modelo de suma ponderada y el modelo de utilidad aditiva en el proceso jerárquico analítico (AHP) para la toma de decisiones con criterios múltiples, (Ugwu et al. 2006). Otros métodos aplicados para la evaluación de la sostenibilidad se basan en la comparación de alternativas, y analizando cómo se comporta una alternativa respecto a un criterio y su comparación con el comportamiento de las demás alternativas respecto a ese mismo criterio, obteniéndose lo que se llama en algunos métodos la matriz de dominación o de comparación, (Aragonés Beltrán 1997),(Fernández Sánchez 2010).

3.2. MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO.

Según el diccionario de la RAE, decisión se define como: “*Determinación, resolución que se toma o se da en una cosa dudosa*”, de esta definición podemos sacar dos conclusiones, primero se trata de buscar una solución a un problema, y la segunda es que se realiza en un ambiente de incertidumbre. En el ámbito de la gestión de empresas, el proceso de decisión consiste en la elección de una acción frente a otra, encontrando una solución adecuada a un nuevo problema planteado por un mundo cambiante o entorno, y comúnmente se afirma que es el corazón de la actividad ejecutiva en los negocios, (Cyert, Simon, and Trow 1956).

Durante la vida cotidiana, tanto de manera individual como parte de una organización, el ser humano está continuamente tomando decisiones más o menos complejas. La toma de decisiones resulta por lo tanto un proceso habitual. La complejidad de las mismas está directamente relacionada con el nivel de incertidumbre del entorno y de la trascendencia de las acciones que conlleven la decisión adoptada. Tomar una decisión implica que hay varias alternativas posibles que deben ser consideradas, y en cada caso, no sólo debemos identificar todas, o al menos, gran parte de las alternativas posibles, sino que queremos elegir la alternativa que mejor se ajusta a nuestros objetivos y que mejor cumple las especificaciones de proyecto.

Durante el desarrollo de un proyecto de infraestructuras se toman decisiones complejas. Esta complejidad viene marcada por el entorno de incertidumbre en el que se desarrolla. Son muchos los factores y especificaciones de proyecto que aumentan la complejidad de la decisión, así como la trascendencia que muchas de estas decisiones tienen para el proyecto, debido a las responsabilidades que ello implica para proyectistas, para los agentes implicados o afectados por la decisión adoptada y así como por el número y tipología de soluciones que pueden resolver el problema.

Por otra parte, en Ingeniería y Arquitectura, en ocasiones para resolver un problema son varias las soluciones constructivas que dan cumplimiento a las especificaciones o requisitos de diseño. Suele quedar en manos del proyectista la decisión de elegir aquella solución que estima que mejor cumple las especificaciones o factores que intervienen en el proceso de diseño. 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 (Muñoz-Medina, Romana, and Ordóñez 2015). Tomar una decisión implica que hay varias alternativas posibles que deben ser consideradas y, en cada situación, no sólo debemos identificar todas o gran parte de las alternativas posibles, sino que lo ideal es elegir la alternativa que mejor se ajusta a los objetivos planteados y que mejor cumple las especificaciones de proyecto.

La principal ventaja del uso de método de decisión es la sencillez de aplicación y la versatilidad que ofrece para resolver cualquier problema en el que hay un número limitado y conocido de alternativas. Del mismo modo, la propia construcción de la matriz de decisión

ayuda al análisis del problema y sintetizar las posibles soluciones, sí como la importancia relativa de los diferentes requisitos. Pero, de igual forma tiene dos inconvenientes principales, (Mullur, Mattson, and Messac 2003).

- Alternativas que pueden ser potencialmente óptimas pueden ser descartadas porque nunca reciben la mayor puntuación total, sin embargo, son las alternativas que mejor cumplen los requisitos principales. Para evitar esto, en el análisis de alternativas y criterios, habrá que estudiarse con profundidad los ratios de importancia relativa entre criterios y si algún criterio puede ser determinante para la elección o descarte de una alternativa, y completar el estudio realizando un análisis de sensibilidad.
- La construcción de una matriz de decisión implica que el decisor asigne pesos y valoraciones a los diferentes criterios, este proceso tiene una componente subjetiva y está influenciado por las preferencias del decisor (Mullur et al. 2003). Para intentar evitar este segundo inconveniente, es aconsejable no utilizar métodos de asignación directa de pesos, sino métodos que por ejemplo determinen la importancia relativa o peso de cada criterio por comparaciones pareadas o métodos objetivos, como el método de entropía.

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, (Ríos 1998). Una idea 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, cuya versatilidad inagotable ha hecho necesarios los esfuerzos de matemáticos, estadísticos, informáticos, psicólogos, economistas, ingenieros, militares, médicos, abogados, politólogos, etc., para ir construyendo año tras año una sucesión de metodologías cada vez más abarcativas, que incrementan el conocimiento de los procesos de decisión, pero que son siempre insuficientes y abiertas a nuevos progresos científicos, (Ríos 1998).

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 Fernet (1654), 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, publicó un notable 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 (1731): “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”, (Ríos 1998). Por la anterior, ya en 1731 Bernoulli indicó que las decisiones dependen del decisor y de las circunstancias particulares de cada situación, es decir, de las condiciones del entorno y de los criterios o especificaciones que tenga que cumplir la solución al problema planteado.

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, etc. Pero todavía son muchas las aplicaciones que quedan por explotar. Los métodos de decisión multicriterio son poderosas herramientas que ayudan a generar consenso en contextos complejos de decisión (García-Cascales 2009).

Simos et al. (1956) clasificaron los problemas de decisión en programables y no programables, dependiendo de si el proceso de decisión se repite de forma continuada en la organización o responden a la existencia de un problema puntual. Los problemas de decisión programables se caracterizan por: estar bien definidos, ser rutinarios, el proceso tiene información suficiente y adecuada y existen muchas herramientas para seleccionar las alternativas, (García-Cascales 2009). Por el contrario, los problemas de decisión no programables se caracterizan por: no estar bien definidos, ser puntuales, normalmente el proceso carece de información suficiente y adecuada, no hay casi opciones para la selección de alternativas, los criterios de selección se determinan a partir del sentido común del decisor.

Algunos autores también han clasificado los problemas de decisión según el entorno en el que se produce la decisión en decisiones bajo certeza, bajo incertidumbre y bajo riesgo, (García-Cascales 2009). En este sentido, los problemas de decisión bajo certeza son los llamados también determinísticos, debido a que son conocidos los estados de la naturaleza y por tanto, los resultados o consecuencias establecidos para cada alternativa y estado de la naturaleza. Los problemas de decisión bajo incertidumbre son aquellos en los cuales el decisor se enfrenta a situaciones que nunca han ocurrido y que tal vez no vuelvan a repetirse en el futuro de esta misma forma, no se conocen las probabilidades de ocurrencia de los criterios. La aplicación de los métodos de decisión multicriterio se realiza en un entorno de incertidumbre. Por último, los problemas de decisión bajo riesgo son aquellos en los que existe un factor probabilístico de ocurrencia ligado a los criterios, en este caso, se conocen las probabilidades objetivas o subjetivas de los estados de la naturaleza, es decir, de ocurrencia.

Por otra parte, es muy importante hacer una distinción entre casos, si tenemos un criterio simple o un criterio múltiple (multicriterio). De igual forma, dentro de los problemas multicriterio podemos distinguir dos grupos diferenciados: por un lado, aquellos problemas de

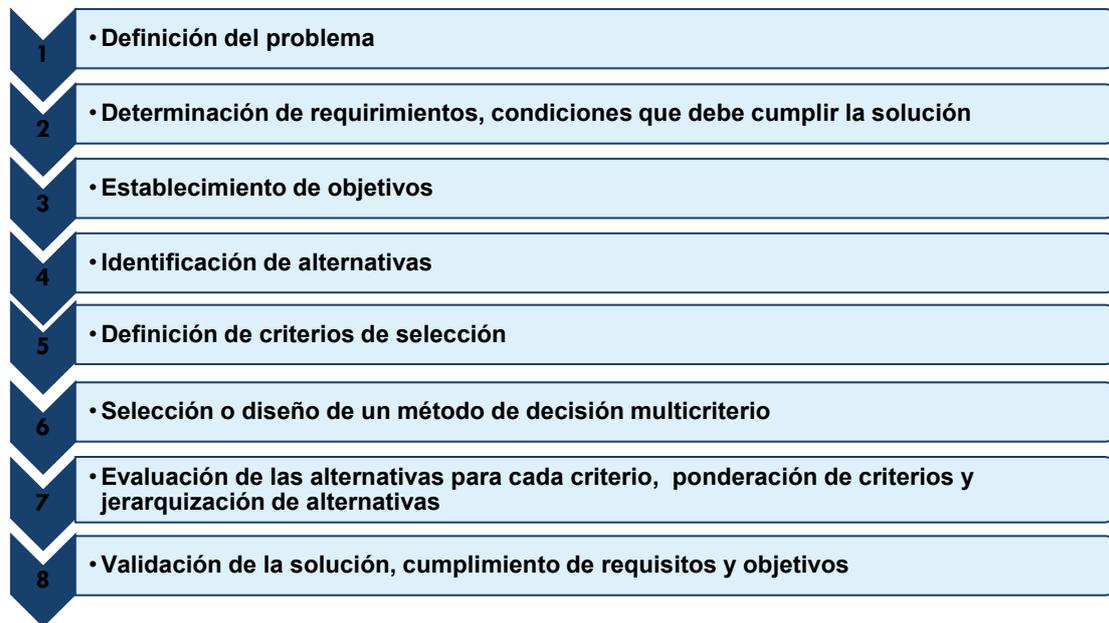
decisión en los que el conjunto de alternativas a considerar por parte del centro decisor es infinito, tanto en el caso monocriterio como en el multicriterio, suelen denominarse problemas continuos dado el carácter matemáticamente continuo del conjunto de soluciones factibles. Por otra parte, se encuentran 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. Por este motivo, los autores Hwang and Yoon (1981), clasificaron los métodos de decisión en métodos de toma de decisión multi-atributo (*Multi-attribute decision-making, MADM*) y métodos de toma de decisión multi-objetivo (*Multiobjective decision-making, MODM*). Siendo los primeros de aplicación para resolver problemas discretos, en los cuales el número de alternativas es finito y se pueden valorar las mismas en función de los diferentes criterios ponderados, mientras que los métodos de decisión multi-objetivo se aplican a problemas de decisión continuos y las alternativas no están predeterminadas (Hwang and Yoon 1981). Estos métodos se utilizan para diseñar la mejor alternativa considerando la interacción con las restricciones, la solución a estos problemas se abordan mediante técnicas clásicas de optimización, (Benítez Leyva 2015). El interés práctico de los problemas multicriterio discretos resulta evidente, al existir multitud de contextos de decisión en los que un número reducido de alternativas o elecciones posibles deben evaluarse en base a varios criterios. Los métodos que se describen en los siguientes epígrafes, al igual que el método propuesto en la siguiente investigación, 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.

Como se ha indicado, un problema de decisión puede tener un criterio simple 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, se puede hablar de un clásico problema de optimización. Si hay un número finito de criterios, pero con un número ilimitado de posibles alternativas (las cuales cumplen los requisitos) el problema se sitúa en el campo de optimización de múltiple criterio (Fülöp 2005). Lo más frecuente, y objeto del presente trabajo, es el estudio de los métodos de decisión con número finito de alternativas y un número finito de criterios, métodos de decisión multicriterio discretos, aunque por simplicidad se suelen llamar métodos de decisión multicriterio.

La primera prioridad en una decisión es conocer quiénes deben tomar la decisión y quiénes son los afectados (stakeholders). Esto permitirá reducir el desacuerdo sobre la definición del problema, requisitos, objetivos y criterios.

FASES EN EL PROCESO DE DECISIÓN:

Figura 3.1. Etapas o fases del proceso de decisión.



Fuente: *Guidebook to Decision-Making Methods, Department of Energy USA*. (Baker et al. 2001)

A continuación, se desarrolla cada una de las fases que se indican en la figura anterior:

Fase 1: Definición del problema

La definición del problema es el primer paso crucial en la toma de decisiones. Este proceso debe, como mínimo, identificar las posibles causas, limitar los supuestos o hipótesis, identificar los límites e interfaces del sistema u organizativas y cualquier cuestión de las partes interesadas. El objetivo es expresar en una única y clara sentencia el planteamiento del problema que describa tanto las condiciones iniciales como las condiciones deseables. A menudo limitar la definición del problema a una sola sentencia puede ser excesivo en la práctica en el caso de decisiones complejas. En cualquier caso, el planteamiento del problema debe ser conciso y nada ambiguo, (Fülöp 2005).

La clave para el desarrollo de un planteamiento del problema adecuado es realizar el mayor número de cuestiones posible sobre el mismo, y de esta forma, asegurar que la solución final cumple todas las especificaciones de partida del proyecto.

Fase 2: Determinar requisitos

Los requisitos son las condiciones que cualquier solución al problema debe cumplir, es decir, qué debe hacer la solución. En Ingeniería y Arquitectura los requisitos son las especificaciones de proyecto o factores que determinan la solución al problema.

Fase 3: Establecer objetivos

Los objetivos o metas son declaraciones generales de intenciones y valores programáticos deseables. Ejemplos de ellos podrían ser: menor coste, mejor integración paisajística, etc. Los objetivos van más allá del mínimo exigible a la solución, es decir, de las especificaciones o requisitos. Un ejemplo de estos últimos sería, en el caso de Ingeniería y Arquitectura, el cumplimiento de requisitos estructurales, y no deben ser incluidos como criterios de selección.

Los objetivos deben ser establecidos de forma positiva, es decir lo que algo debe hacer o tener, no como lo que algo no debe hacer o tener. Debido a que los objetivos son útiles para la identificación de alternativas, deben ser fijados de manera previa a la misma.

En ocasiones, los objetivos pueden entrar en conflicto, pero esto no es ni inusual, ni motivo de preocupación. Durante la definición de objetivos, no es necesario eliminar el conflicto entre las metas ni definir la importancia relativa de los objetivos. El proceso de establecimiento de objetivos puede sugerir requisitos nuevos o revisados que deben convertirse en objetivos. En cualquier caso, la comprensión de las necesidades y objetivos es importante para definir alternativas.

Fase 4: Identificación de alternativas

Las alternativas ofrecen diferentes enfoques para poder pasar de las condiciones iniciales a las condiciones deseables. El decisor, o el grupo de decisión, evalúa las necesidades y objetivos y sugiere alternativas que satisfagan los requisitos (o especificaciones) y tantos objetivos como sea posible. En general, las alternativas varían en su capacidad de cumplir con los requisitos y objetivos. Las alternativas que no cumplan con los requisitos deben ser descartadas para consideraciones adicionales. Si una alternativa no cumple con los requisitos, se pueden llevar a cabo tres acciones:

1. La alternativa se descarta.
2. Se cambia o se elimina el requisito.
3. El requisito se reafirma como un objetivo.

La descripción de cada alternativa deber mostrar de manera clara cómo se resuelve el problema definido y en qué difiere de otras alternativas. Puede resultar útil una descripción escrita y un diagrama de las funciones realizadas para resolver el problema.

Fase 5: Definición de criterios

Generalmente, una alternativa no será la mejor para todos los objetivos, requiriéndose varias alternativas que se comparan entre sí. La mejor alternativa será aquella que más cerca esté de alcanzar todos los objetivos. Para poder discriminar entre alternativas, los criterios de decisión, o variables, deben estar basados en los objetivos. Es necesario definir criterios discriminatorios como medidas objetivas de las metas para medir cómo de bien alcanza las metas cada alternativa. Cada criterio debería medir algún aspecto importante, y no depender de otros criterios. Cada criterio debe discriminar entre alternativas de manera significativa, por

ejemplo, si la localización o ubicación es el mismo criterio para todas las alternativas o es indiferente, entonces la localización no es un criterio. Un criterio debe ser:

- Capaz de discriminar entre alternativas
- Completo, debe incluir todos los objetivos
- Operacional, útil para hacer comprender a la persona que toma la decisión de las implicaciones de las alternativas.
- No redundante, evitar la doble contabilidad
- Los criterios deben ser pocos en número, para evitar que la dimensión del problema sea inmanejable.

Usar pocos criterios discriminatorios hará que el producto resultante del análisis de decisión sea más entendible. Sin embargo, todos los objetivos deben generar al menos un criterio. Si un objetivo no sugiere un criterio, este objetivo debe ser descartado.

Llegados a este punto hay que decir que, en ocasiones, entre los criterios de selección o variables existe correlación entre ellos, por este motivo, como se verá en el desarrollo de la presente investigación es aconsejable aplicar métodos de decisión multicriterio que tenga en cuenta este aspecto para evitar excluir como soluciones alternativas que sí son adecuadas.

Fase 6: Selección de un método o herramienta de decisión

Son varios y diferentes los métodos de decisión que existen y que se aplican dependiendo de la complejidad y naturaleza del problema a resolver. Estos métodos son analizados en apartados siguientes. En cualquier caso, y como indican Baker et al. (2001) algunos de estos métodos pueden ser complicados y difíciles de aplicar. La selección del método debe basarse en la complejidad del problema y en la experiencia del decisor. Algunos autores piensan que, en general, cuanto más simple es el método es mejor y que siempre es posible añadir más tarde análisis más complejos, si es necesario, (Baker et al. 2001). Esto no es totalmente cierto, porque el método elegido debe tener en cuenta otros aspectos como: la correlación entre variables, si el objetivo es aplicar el método para seleccionar una alternativa en función de la obtención de una valoración para cada alternativa o, por el contrario, se quiere obtener una lista de ordenación (*ranking*) de alternativas según éstas se adaptan más o menos a la solución del problema.

Un aspecto fundamental del proceso de modelización es la validación del modelo, (Ríos 1998), que nos llevará a aceptarlo para su uso posterior o a rechazarlo para reiniciar el proceso de modelización. Se dice que un modelo de un cierto sistema o fenómeno real es válido si su comportamiento representa adecuadamente el comportamiento del sistema real bajo todas las condiciones de interés, (Ríos 1998).

Fase 7: Evaluación de alternativas según los criterios

Las alternativas pueden ser evaluadas por métodos cuantitativos, cualitativos o una combinación de ambos. Los criterios deben ser ponderados y utilizados para jerarquizar las alternativas. Como se verá a continuación existen diferentes métodos de ponderación de los criterios y siempre que se pueda se debe reducir la subjetividad en este proceso. Por último,

los análisis de sensibilidad e incertidumbre pueden ser usados para mejorar la calidad del proceso de decisión, al evaluar cómo varía la selección según varían las condiciones de partida.

Fase 8: Validación de soluciones frente al planteamiento del problema.

Después de que el proceso de evaluación ha seleccionado una alternativa como más idónea, la solución se debe comprobar para asegurarse de que realmente resuelve el problema identificado, cumpliendo requisitos y objetivos. Una solución final debe cumplir con el estado deseado, cumplir con los requisitos, y la mejor forma de lograr los objetivos dentro de los valores de los tomadores de decisiones.

Independientemente del método de decisión que se aplique, todos los problemas de decisión tienen los siguientes componentes:

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 es difícil establecer los criterios de decisión, no obstante su determinación resulta un paso esencial en el proceso y como hemos comentado en epígrafes anteriores, 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_j refleja la relativa importancia del criterio C_j en la decisión, donde $j=1, 2, \dots, n$, y es asumido que es positivo (Fülöp 2005)

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. Estas diferencias justifican la existencia de los pesos asociados a los criterios. Hay varias formas de determinar el peso de cada criterio: método Delphi, Simos, por comparaciones pareadas (AHP), método el mejor-peor, método de Entropía, asignación directa, entre otras o como combinaciones de varios de ellos, (Qin et al. 2019), (Siskos and Tsotsolas 2015), (Salari et al. 2018), (Balaji and Senthil Kumar 2018), (Figueira and Roy 2002), (Tian, Wang, and Zhang 2018), (Wang, Li, and Zheng 2018). Estos métodos serán analizados en la descripción de los métodos de decisión multicriterio más importantes.

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. Constituyen el conjunto de posibles opciones definidas sobre las que la unidad decisora realiza una decisión.

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. Como se ha comentado al describir las etapas del proceso de decisión, la descripción de cada alternativa deber mostrar de manera clara cómo se resuelve el problema definido y en qué difiere de otras alternativas.

Cada conjunto de alternativas A son alternativas **diferentes, excluyentes y exhaustivas**. **Diferentes** porque cada alternativa está definida de tal forma que es claramente diferenciable del resto; **excluyentes** porque la elección de una de ellas imposibilita la elección de cualquier otra; y **exhaustivas** porque definido el conjunto, éste constituye el universo de decisión. Lo anterior, quiere decir que el decisor no puede escoger una alternativa mixta, es decir, intermedia entre dos alternativas A_i y A_j . También significa que si el decisor introduce una nueva alternativa es preciso volver a comenzar el análisis con el nuevo conjunto así definido.

4. Matriz de valoración o decisión

Una vez establecidos los criterios y sus pesos asociados, se supone que 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, denominada 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 .

Tabla 3.2. Construcción de la matriz de decisión

		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}

Fuente: Elaboración propia.

Hay que indicar en este punto que, de manera previa para la aplicación de algunos métodos de decisión multicriterio, es necesario **normalizar los elementos de la matriz de**

decisión para conseguir valores adimensionales en la evaluación de las diferentes alternativas respecto a cada uno de los criterios. Por lo cual, algunos métodos de decisión exigen la normalización como primer paso en el proceso de toma de decisiones para transformar datos expresados en diferentes unidades en una escala común y unidades comparables, (Vafaei, Ribeiro, and Camarinha-Matos 2016). Para la aplicación de algunos métodos de decisión se usa lo que se conoce como normalización horizontal de los valores de la matriz de decisión, como es el caso del método SWA (*Simple Additive Weighting*) método de la suma ponderada. En este caso, para obtener los valores normalizados se obtienen sumando los valores de cada fila de la matriz traspuesta de la matriz de decisión y posteriormente se divide cada elemento de esa fila por el valor obtenido en la suma. Pero esta normalización no se suele ser adecuada en la mayoría de los métodos de decisión y se debe tender a la normalización llamada vertical, es decir, convertir todos los valores de la alternativa considerada en cantidades adimensionales, sin tener en cuenta los valores de los criterios de otras alternativas, (Ginevičius 2008).

En la siguiente tabla se incluyen la principales técnicas de normalización que se emplean en problemas de decisión, (Vafaei et al. 2016), (Çelen 2014), (Jahan and Edwards 2015):

Tabla 3.3. Principales técnicas de normalización en procesos de decisión

TÉCNICA DE NORMALIZACIÓN	CONDICIÓN DE USO	FÓRMULA	MÉTODO DE DECISIÓN
Lineal (Máximo)	Criterio de Beneficio	$n_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_{max}}$	
	Criterio de Coste	$n_{ij} = 1 - \frac{a_{ij}}{a_{max}}$	
Lineal (Máximo - Mínimo)	Criterio de Beneficio	$n_{ij} = \frac{a_{ij} - a_{min}}{a_{max} - a_{min}}$	VIKOR PATTERN
	Criterio de Coste	$n_{ij} = \frac{a_{max} - a_{ij}}{a_{max} - a_{min}}$	VIKOR PATTERN
Lineal (suma)	Criterio de Beneficio	$n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}}$	SAW
	Criterio de Coste	$n_{ij} = \frac{1/a_{ij}}{\sum_{i=1}^m 1/a_{ij}}$	SAW
Vector de normalización	Criterio de Beneficio	$n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij})^2}}$	TOPSIS MOORA
	Criterio de Coste	$n_{ij} = 1 - \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij})^2}}$	TOPSIS MOORA
Normalización logarítmica	Criterio de Beneficio	$n_{ij} = \frac{\ln(a_{ij})}{\ln(\prod_{i=1}^m a_{ij})}$	
	Criterio de Coste	$n_{ij} = \frac{1 - \ln(a_{ij})}{m - 1}$	

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de los Métodos de Decisión Multicriterio (*Multicriteria Decision Making - 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), (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), y 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. Con base en esta relación de preferencia (o, más generalmente, en varias relaciones obtenidas después de un análisis de robustez) se elabora una recomendación que puedes ser por ejemplo, determinar un subconjunto que probablemente contenga las "mejores" alternativas", (Bouyssou 2008). 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.

Otros autores, a partir del gran desarrollo y especialización que han tenido los MCDM, han realizado otras clasificaciones más exhaustivas de los mismos. En este sentido, y según cómo se aplican los MCDM y se realiza el proceso de decisión, se pueden clasificar en los siguientes grupos, (Penadés-Plà et al. 2016), (Hajkowicz and Collins 2007), (de Brito and Evers 2016), (Ceballos Martín 2016):

- Métodos basados en una función de utilidad/valor. Son los métodos comúnmente conocidos como MAUT – *Multi-attribute Utility Theory* y MAVT - *Multi-attribute value theory*. El objetivo de estos métodos es encontrar una expresión a través de la cual se reflejen las preferencias del decisor mediante el uso de una función de utilidad/valor. 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, (Fülöp 2005). Mediante el uso de funciones de utilidad/valor, este método transforma diversos criterios (como costes, riesgos, beneficios, valores de las partes interesadas) en una escala común sin dimensiones (valor de utilidad), (Linkov et al. 2006). Esto implica que el bajo rendimiento de una alternativa respecto a un criterio (por ejemplo criterio de integración paisajística) puede ser compensado por un mejor rendimiento de esta alternativa respecto a otro criterio (por ejemplo criterio del coste financiero), (de Brito and Evers 2016). También se basa en los supuestos de que el tomador de decisiones es racional: se prefiere más a menos, las preferencias no cambian, el tomador de decisiones tiene un conocimiento perfecto y las preferencias son transitivas. El objetivo del decisor en este proceso es maximizar la utilidad/valor, que es un enfoque de optimización compensatoria. Por lo cual, los métodos MAUT asumen que un problema de decisión puede

modelizarse mediante funciones valoradas reales que pueden ser maximizadas/minimizadas entre las alternativas, de forma que cada alternativa puede ser asociada a un número real, 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 del grupo de los métodos *MAUT/MAVT* se pueden incluir los métodos:

- ✓ **SWA:** *Simple Additive Weighting*. Método de la suma ponderada, se trata de obtener un valor para cada alternativa como la suma ponderada de las calificaciones de desempeño en cada alternativa para todos los criterios, (Br Sembiring et al. 2019), (Wira Trise Putra and Agustian Punggara 2018). Este método también se dice que pertenece al grupo de los métodos de decisión de puntuación (*scoring methods*) que otorgan a cada alternativa una puntuación, (Penadés-Plà et al. 2016).
- ✓ **SMART:** *Simple Multi Attribute Rating Technique*. Usa modelos lineales adaptativos para predecir el valor de cada alternativa, (Br Sembiring et al. 2019).
- ✓ **Weighted Product:** Método del producto ponderado, usa el producto ponderado para determinar el valor de cada alternativa respecto a los diferentes criterios, (Wira Trise Putra and Agustian Punggara 2018).
- ✓ **COPRAS:** Evaluación compleja proporcional, *Complex Proportional Assessment*. A través de este método se evalúa cada alternativa en términos de su importancia y grado de utilidad, obteniendo una clasificación desde la solución ideal (mejor valorada) a aquella que es la anti-ideal o alternativa con peor valoración, (Martínez Gómez et al. 2018).
- ✓ **ARAS:** *Additive Ratio Assessment*. Según el método ARAS, se determina la eficiencia relativa compleja de una alternativa factible a partir del valor de una función de utilidad que es directamente proporcional al efecto relativo de los valores y pesos de los criterios principales considerados en un proyecto, (Zavadskas and Turskis 2010). En función del valor la eficiencia relativa compleja calculada para cada alternativa se determinan las opciones mejor posicionadas.
- ✓ **MOORA:** *Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis*. Fue desarrollado por Brauers y Zavadskas, (2006). El método desarrolla

un sistema de proporciones en el que cada respuesta de una alternativa respecto un criterio se compara con un denominador, que es el representante de todas las alternativas relativas a ese criterio. (Brauers and Zavadskas 2006). Parte de unos puntos de referencia, estas referencias serán el mayor del vector de radios de las alternativas respecto de cada criterio ya sea máximo o mínimo, (Martínez Gómez et al. 2018).

- ✓ **PATTERN:** *Planning Assistance through Technical Evaluation of Relevance Numbers.* Este método permite sintetizar, en los análisis de sensibilidad y preferencias, las puntuaciones obtenidas por las diferentes alternativas para cada criterio, mediante la aplicación de pesos o coeficientes de ponderación variables, en un solo parámetro llamado Índice de Pertinencia (IP), cuyos valores están comprendidos en el intervalo [0,1] 1 (siendo 0 el valor pésimo y 1 el valor óptimo). Es decir, realiza el análisis de la sensibilidad y robustez de cada una de las alternativas de forma analítica, (Suarez Galarza 2015). Se define el concepto de pertinencia como la medida relativa de la contribución de una alternativa a la consecución de un objetivo (variable o criterio), y el Índice de pertinencia (IP) como la suma de los productos de la ponderación de cada criterio por el índice o valoración de cada alternativa. Por ello, el índice de pertinencia (IP) puede decirse que es la probabilidad de que esa alternativa alcance todos los objetivos (criterios). Este método crea un modelo que permite la comparación directa de las alternativas. De esta forma, se obtiene una matriz de alternativas/criterios, de la que se deduce el IP de cada alternativa de la siguiente forma:

$$IP_i = \frac{MAX - \sum_j \beta_j * a_{ij}}{MAX - MIN} \quad (3.1)$$

Donde:

a_{ij} es la valoración obtenida por la alternativa i para el criterio j,
 β_j es el peso o coeficiente de ponderación del criterio j, $\sum \beta_j = 1$,
 MAX es el valor máximo de $\sum \beta_j * a_{ij}$ de entre los obtenidos por todas las alternativas,
 MIN es el valor mínimo de $\sum \beta_j * a_{ij}$ de entre los obtenidos por todas las alternativas.

- ✓ **Medias generalizadas:** En este método, y dado un problema de decisión, el vector $x=(x_1, \dots, x_n)$ juega un papel de agregación de los valores de la función para la calificación de cada criterio y según la asignación del peso que se considera. Esto significa que el vector x debe encajar en las filas de la matriz de decisión tanto como sea

posible. Mészáros y Rapcsák (1996) introdujeron la optimización de entropía para encontrar el vector x de mejor ajuste, (Mészáros and Rapcsák 1996). Señalaron que la óptima solución es un múltiplo positivo del vector de las medias geométricas ponderados de las columnas, (Fülöp 2005).

- ✓ **Método MIVES:** *Modelo de Valor Integrado Español para la Evaluación de la Sostenibilidad*. Para la evaluación de la sostenibilidad, a través de este método es necesario realizar los siguientes pasos: 1) definición del problema y de las decisiones a adoptar; 2) realizar un esquema del problema de decisión, a través de un modelo en forma de árbol de requisitos se establecen las variables cualitativas y cuantitativas; 3) establecer las funciones de valor para convertir las variables cualitativas y cuantitativas en un conjunto de variables con las mismas unidades y escala; 4) definir la importancia o peso relativo de cada uno de los aspectos a tener en cuenta en la evaluación; 5) definir las diversas alternativas de diseño que se podrían considerar para resolver el problema previamente identificado; 6) evaluar y valorar esas alternativas mediante el uso del modelo creado; y 7) tomar las decisiones correctas y elegir el más apropiado, (Pons, de la Fuente, and Aguado 2016). El árbol de requisitos definido en el paso 2) es un diagrama jerárquico en el que las diversas características de la alternativa o proyecto a evaluar están organizados, normalmente en tres niveles: requisitos, criterios e indicadores, ordenados éstos de menor a mayor detalle, (Pons et al. 2016).

De esta forma, se puede definir un Índice de Sostenibilidad, *Sustainability Index (SI)*, a partir de la ecuación:

$$SI = V(P_x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i * \beta_i * \gamma_i * V_i(P_{i,x}) \quad (3.2)$$

Donde, $V(P_x)$, es la medida de sostenibilidad de la alternativa x con respecto a varios criterios, $P_x = (P_{1,x}; P_{2,x}; \dots P_{n,x})$, considerado. α_i es el peso del requerimiento i , β_i es el peso del criterio i y γ_i es el peso del indicador i . $V_i(P_{i,x})$ son las funciones valor para medir la sostenibilidad de cada alternativa con respecto a cada criterio i , Por último, n es el número de criterios considerados en la evaluación, (Pons et al. 2016).

El método MIVES ha sido utilizado para medir la sostenibilidad de infraestructuras en nuestro país, (Alberti et al. 2018), (Abajo et al. 2020).

- Métodos de decisión por comparaciones pareadas. Estos métodos son muy utilizados por su facilidad de cálculo a la hora de seleccionar diferentes alternativas en el caso que haya criterios cuantitativos y cualitativos. Permite valorar las diferentes alternativas según criterios cualitativos al comparar éstas de dos en dos. También pueden ser usados para establecer la importancia relativa y la ponderación de criterios, por comparaciones pareadas de los mismos, es decir, se trata de responder a la pregunta de cuánto más importante es el criterio A respecto al criterio B. Dentro de este grupo se pueden incluir los siguientes métodos:
 - ✓ **Método AHP:** *Analytic Hierarchy Process*. Es el método más conocido de este grupo, ya que fue el primero que se desarrolló por el profesor y matemático Thomas Saaty a finales de los años 70, del pasado siglo XX, (Saaty 1990). Fue desarrollado como respuesta a problemas concretos de toma de decisiones en el Departamento de Defensa de los EEUU, para resolver el tratado de reducción de armamento estratégico entre los Estados Unidos y la antigua URSS. Actualmente es un método clásico en el mundo de la empresa donde se aplica en casi todos los ámbitos donde es necesario tomar una decisión de cierta complejidad, (Aznar Bellver and Guijarro Martinez 2013).

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. Saaty desarrolló esta metodología teniendo en cuenta las reflexiones de Arrow y Raynaud (1986) sobre las dificultades del ser humano para tomar decisiones multicriterio y con gran número de alternativas, (Arrow and Raynaud 1986). El método 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. Como estableció el propio Saaty: *“Trata de desmenuzar un problema y luego unir todas las soluciones de los subproblemas en una conclusión”*, (Martínez Rodríguez 2007).

En primer lugar, y una vez definidas las alternativas y los criterios de selección, el decisor puede expresar sus preferencias para ponderar los diferentes criterios. Para ello, se aplica la escala de Saaty y se compararan los criterios de dos en dos, estableciendo las diferencias entre estos dos elementos de forma verbal y se representan estas preferencias descriptivas mediante valores numéricos. De esta forma cuando dos elementos sean igualmente preferidos o importantes para

el decisor le asignará al par de elementos un “1”; le asignará “3” cuando hay una importancia moderada de un elemento sobre otro; “5”, indica 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, (Martínez Rodríguez 2007). Posteriormente, se valoran las diferentes alternativas para cada criterio, y como resultado se obtienen n matrices, siendo n el número de criterios, de manera que el vector propio de cada una estas matrices nos determina la valoración de las distintas alternativas respecto a cada criterio, (Aznar Bellver and Guijarro Martinez 2013).

Este método permite valorar de manera sencillas las alternativas respecto a criterios cualitativos. El método AHP permite al decisor incorporar su experiencia, preferencias y conocimiento de una forma sencilla. 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, (Martínez Rodríguez 2007).

El método AHP además tiene la ventaja de que permite medir la inconsistencia global de los juicios emitidos mediante la Proporción de Consistencia, también llamado Ratio 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, y se calcula por la siguiente expresión (Saaty, 1994):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{3.3}$$

Donde, λ_{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, y viene dado por la siguiente:

Tabla 3.4. Índice Aleatorio método AHP

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

Fuente: Libro *Nuevos Métodos de Valoración. Modelos Multicriterio*. (Aznar Bellver and Guijarro Martinez 2013)

- **Método ANP:** *Analytic Network Process*, es una generalización del método AHP y fue desarrollado también por Thomas Saaty, (Saaty 1996), (Saaty 2004). Al igual que el método AHP, es un método de decisión que depende de los valores y juicios emitidos por el decisor o grupo de decisores. El método ANP se diferencia del método AHP en que permite incluir relaciones de interdependencia y retroalimentación entre elementos del sistema, mientras que en el método AHP los elementos son linealmente independientes, (Faxas Gúzman and Guerrero Liquez 2015). Por otra parte, en lugar de representar el problema de decisión en forma jerárquica en el método ANP se representa en forma de red, (Baviera-Puig, García-Martínez, and Gómez-Navarro 2014).

La aplicación de la metodología se puede concretar en 11 pasos (Saaty 2016), (Baviera-Puig et al. 2014):

1. Describir el problema de decisión en detalle, incluyendo los objetivos, criterios y subcriterios, los actores y sus objetivos y los posibles resultados de esa decisión. Se deben incluir las influencias que determinan cómo se puede tomar esa decisión.
2. Se determina la red del problema de decisión, identificando los clústeres (agrupación de elementos con alguna característica en común) y sus elementos, y esto se aplica a todos los criterios de control.
3. Para cada criterio o subcriterio de control, y una vez determinados los grupos con sus elementos, se conectan de acuerdo con sus influencias de dependencia externas e internas.
4. Determinar los criterios y subcriterios de control en las cuatro jerarquías de control: beneficios, oportunidades, costos y riesgos de esa decisión y obtener sus prioridades a partir de matrices de comparaciones pareadas. Para ello se utiliza el concepto de dominancia, que significa mayor influencia con respecto a una cierta propiedad, en una escala de 1 a 9, similar al método AHP. Este concepto, según Saaty, se interpreta habitualmente como importancia cuando se comparan los criterios y como preferencia cuando se comparan las alternativas en base a los criterios. Si un criterio de control o subcriterio tiene una prioridad global del 3% o menos, se puede evaluar su eliminación para consideraciones posteriores. Existen tantas matrices de comparación pareada entre elementos asociadas a un elemento de la red como

- grupos de elementos pertenecientes a un mismo clúster que influyen sobre dicho elemento
5. Se construye la denominada supermatriz no ponderada con los vectores de pesos de importancia relativa de los elementos. Las entradas de la supermatriz recogen los pesos de la influencia relativa de los elementos situados en las filas de la matriz sobre los elementos situados en las columnas.
 6. Se calculan las prioridades relativas entre clústeres mediante el planteamiento de matrices de comparación pareada entre clústeres. Una matriz de comparación pareada entre clústeres asociada a un elemento de la red es aquella cuyas filas y columnas están formadas por todos los clústeres de la red que tienen influencia sobre dicho componente. Existen tantas matrices de comparación pareada entre clústeres en el modelo como grupos de clústeres influyen sobre algún elemento de la red.
 7. Se ponderan los bloques de la supermatriz no ponderada, mediante los pesos correspondientes de los componentes, para transformarla en la supermatriz ponderada.
 8. Se normaliza la supermatriz ponderada, utilizando la normalización líneal mediante la suma, para ello se divide cada valor por la suma de las columnas en la que se encuentra. De esta forma, se obtiene una matriz estocástica por columnas, es decir, cuyas columnas suman la unidad (supermatriz ponderada estocástica).
 9. Se calculan los límites de la supermatriz ponderada estocástica elevando ésta a potencias sucesivas hasta que las sucesiones converjan y se mantengan estables. La matriz obtenida se denomina límite y todas sus columnas son iguales, consecuencia de partir de una matriz estocástica. Sus valores indican la prioridad global de todos los elementos presentes en la red. Estos valores pueden ser normalizados a uno.
 10. Para conocer la prioridad global de las diferentes alternativas y de esta forma tomar una decisión y seleccionar las alternativas mejor posicionadas es necesario ver las entradas de una columna cualquiera de la matriz límite correspondientes a las filas asociadas a las alternativas.
 11. Con la realización del análisis de sensibilidad se comprueba cómo de estable es la solución obtenida. Para ello se deben cambiar las ponderaciones y comprobar las soluciones obtenidas, y de esta forma se comprueba si alguna otra solución cercana puede ser una buena solución.

- **Método MACBETH:** *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*, es un método similar al método AHP debido a que permite comparaciones respecto a juicios cualitativos para valorar las diferentes alternativas y ponderar los criterios (Costa et al. 2019). En ocasiones, es considerado como un método basado en una función de utilidad (MAUT), ya que finalmente se obtiene una función de valor para cada alternativa, (Giron and Madrid 2008). Sin embargo, hay diferencias respecto a un método MAUT clásico, debido a que la valoración de alternativas y el peso de cada criterio se determina a partir del resultado de juicios cualitativos de comparaciones pareadas de “diferencia de atractivo” (preferencia o valor) entre las alternativas respecto a cada criterio y de los criterios entre sí para determinar la importancia relativa de cada uno de ellos. Para ello, es necesario responder a la pregunta: ¿No hay diferencia (indiferencia), o la diferencia es muy débil, débil, moderada, fuerte, muy fuerte o extrema?, (Costa et al. 2019).

El procedimiento de valoración de alternativas y de ponderación de criterios se realiza de la siguiente forma: una vez determinada la diferencia que existe entre las alternativas a partir de comparaciones pareadas, el resultado de estas comparaciones se transforma en un conjunto de desigualdades. Este conjunto se somete a un test de programación lineal para determinar si es compatible con alguna función de valor marginal. Si existe alguna función de valor marginal compatible con el conjunto de desigualdades se realiza un análisis de postoptimalidad y se propone una función de valor. Si no existe una función de valor marginal compatible, los resultados del programa lineal son aprovechados para sugerir modificaciones en la información para que los resultados de las comparaciones pareadas sean consistentes. Para el cálculo del peso de cada criterio se procede de la misma forma, (Giron and Madrid 2008).

- Métodos de decisión basados en el concepto de distancia: Estos métodos serán estudiados con mayor profundidad en el siguiente epígrafe. Pero a modo de introducción, hay que indicar que entre estos métodos destacan el **método TOPSIS**, *Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution*, cuyo principio básico es que la alternativa elegida será aquella que se encuentra a la distancia más corta de la “solución ideal” y más alejada de la “solución antideal”, (Opricovic and Tzeng 2004).

El **método VIKOR**, *Vlekkriterijumsko KOMpromisno Rangiranje*, un término serbio que significa optimización de criterios múltiples para obtener una solución de compromiso, (Shumaiza et al. 2019). Fue desarrollado para resolver un problema

de decisión con un número limitado de alternativas (posibles soluciones) con criterios en conflicto y con diferentes unidades de medida, (Opricovic and Tzeng 2007). De esta forma, el método proporciona una solución, o un conjunto de soluciones, de compromiso que en el caso de criterios en conflicto puede ayudar a los decisores a tomar una decisión. La solución o soluciones de compromiso serán aquellas que están más cerca de la solución ideal, y el compromiso viene determinado por las concesiones mutuas, de manera que la solución de compromiso es la que está determinada como función de utilidad de la mayoría. La metodología desarrollada en la presente tesis se basa en el método VIKOR incluyendo una modificación sobre el mismo para considerar aquellos casos en los que hay correlación entre las variables.

El **método MOORA** descrito anteriormente, presenta una variante, en la cual, en lugar, de calcular el vector de radios, se calcula el “punto de referencia” que es un punto ideal de referencia y a continuación se miden las distancias de las alternativas a este punto ideal. Este método es conocido como MULTIMOORA, *MOORA plus Full Multiplicative Form* (Brauers and Zavadskas 2010). Al contrario que en el método MOORA que emplea la sumatoria como operador de agregación con los datos normalizados, el método MULTIMOORA usa como operador de agregación la multiplicación; se calcula el ranking de cada índice y finalmente se calcula el ranking MULTIMOORA por medio de la teoría de dominancia. Para ello, se usa la métrica de Chebyshev para calcular la distancia de cada alternativa al punto de referencia. Posteriormente, se ordenan de forma creciente según esta distancia y las mejores alternativas serán aquellas de menor valor, (Barrios Córdova et al. 2020).

Otro método basado en el concepto de medida de distancia es el **método CODAS**, *Combinative Distance-based Assessment*, en el cual la preferencia de las alternativas se determina a partir de dos medidas de distancia: la distancia euclídea y la distancia *Taxicab*, conocida como la distancia Manhattan o distancia ciudad. La principal y primera medida que se considera para la selección de alternativas es la distancia euclídea de las diferentes alternativas a la solución *no-ideal o solución ideal negativa*, y la segunda medida es la distancia Manhattan a la solución *no-ideal o solución ideal negativa*. Obviamente, la alternativa que tiene mayores distancias con la solución ideal negativa es la preferida, (Badi, Ballem, and Shetwan 2018), (Karaşan, Boltürk, and Kahraman 2019).

- Métodos de superación – Outranking. Bajo esta denominación se incluyen todos aquellos métodos de decisión multicriterio 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.

El primer representante de los métodos de superación ha sido el **método ELECTRE**, *ELimination Et Choix Traduisant la REalité*, nacido de la mano del investigador Bernard Roy en 1968 (Roy 1968), quien es considerado como uno de los principales autores de toda una generación de estudiosos de la decisión multicriterio y autoridad mundialmente reconocida en este campo. Desde entonces se han desarrollado diferentes versiones del método ELECTRE (ELECTRE I, ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE IS y ELECTRE TRI) que han ido mejorando la metodología inicial para permitir, de ese modo, ampliar notablemente el abanico de problemas a los que pudiera aplicarse y extendiéndose su aplicación por toda Europa, (Roy 1991).

En este sentido, según el problema de decisión a resolver, se utiliza un método ELECTRE u otro. Para la elección de un subconjunto de alternativas con las alternativas “mejores”, o “más satisfactorias” los métodos adecuados son ELECTRE I y ELECTRE IS. Para el reparto de las alternativas potenciales en categorías predefinidas, a partir de alternativas de referencia, el método adecuado es ELECTRE TRI. Para la ordenación o clasificación de las alternativas potenciales se pueden aplicar los métodos ELECTRE II, ELECTRE III y ELECTRE IV, (Gento Muncio and Redondo Castán 2005). Centrando el estudio en los primeros métodos ELECTRE, el método ELECTRE I es usado para construir un ranking parcial y elegir un grupo de posibles alternativas. Para ello compara todas las alternativas por pares, procedimiento que permite eliminar algunas y elegir las que respondan adecuadamente a la mayoría de los criterios, (Barros, Rendina, and Bargiela 2002). El método ELECTRE II es usado para ordenar las alternativas y en el método ELECTRE III se establece un grado de superación, que representa una “credibilidad de superación” entre dos alternativas que hace que este método sea más sofisticado (y por supuesto, más complicado y difícil de interpretar y aplicar), (Fülöp 2005).

Por otra parte, atendiendo a los criterios empleados para la sobreclasificación o superación, los métodos ELECTRE pueden clasificarse en dos grupos: según si se utiliza la lógica con sobreclasificación nítida (definición de criterios de forma clásica) o se utiliza la lógica con sobreclasificación difusa (pseudo-criterios, cuasi-criterios o pre-criterios). En este sentido, en el primer grupo se encuentran los métodos ELECTRE I y ELECTRE II, mientras que en el segundo grupo se encuentran los métodos ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE IS y ELECTRE TRI, (Gento Muncio and Redondo Castán 2005).

La metodología ELECTRE está basada en los índices de concordancia y discordancia que se definen como sigue: partimos de que los datos de la matriz de decisión, y asumimos aquí que la suma de los pesos es igual a 1. Para una pareja ordenada de alternativas (A_j, A_k) , el índice de concordancia c_{jk} es la suma de todos los pesos para

aquellos criterios donde el resultado de la alternativa A_j es al menos igual de buena que la alternativa A_k , (es decir, la supera).

$$C_{jk} = \sum_{i: a_{ij} \geq a_{ik}} w_i, \quad j, k = 1, \dots, n, j \neq k \quad (3.4)$$

Obviamente, el índice de concordancia está comprendido entre 0 y 1.

El cálculo del índice de discordancia es un poco más complicado, $d_{jk}=0$ si $a_{ij} > a_{ik}$, $i=1, \dots, m$, por lo cual, el índice de discordancia es cero si la alternativa A_j es mejor que A_k para todos los criterios, (Fülöp 2005). Por lo cual:

$$d_{jk} = \max_{i=1, \dots, m} \frac{a_{ik} - a_{ij}}{\max_{j=1, \dots, n} a_{ij} - \min_{j=1, \dots, n} a_{ij}} \quad j, k = 1, \dots, n, j \neq k \quad (3.5)$$

Para cada criterio donde A_k supera a A_j , el índice es calculado como la diferencia entre el nivel de rendimiento de A_k y A_j y la máxima diferencia de la puntuación de los criterios que afectan a cada par de alternativas. El máximo de estos índices, el cual estará comprendido entre 0 y 1, es el índice de discordancia.

Otro método englobado en el grupo de los métodos de superación que es muy conocido y ampliamente extendido es el **método PROMETHEE**, *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations*. Fue introducido por Brans y Vincke (1985). A partir de entonces empiezan a aparecer numerosas aplicaciones con un especial interés en los problemas de ubicación: plantas hidroeléctricas, instalaciones comerciales en un ambiente competitivo, depósitos de desechos, evaluación financiera, etc., (Brans and Smet 2016). En este método los valores a_{ij} de la matriz de decisión no tienen que ser necesariamente normalizados y convertidos en una escala adimensional común. Se asume, en aras de la simplicidad, que un valor de puntuación más alto significa un mejor rendimiento. También se asume que los pesos w_i de los criterios han sido determinados por un método apropiado (esto no forma parte de los métodos PROMETHEE, es decir, la ponderación de los criterios se realiza con otro método), (Fülöp 2005). Uno de los objetivos esenciales del método es el de ser fácilmente comprensible para el decisor, siendo en realidad uno de los más intuitivos de la decisión multicriterio.

Para tener en cuenta las desviaciones y las escalas de los criterios, se define una función de preferencia para cada criterio. Para este supuesto, se define una función $P_i(A_j, A_k)$, que representa el grado de preferencia de A_j sobre A_k para el criterio C_i . Se considera que esta función toma valores entre 0 y 1.

$P_i(A_j, A_k) = 0$ Significa que no hay preferencia o que es indiferente,

$P_i(A_j, A_k) \approx 0$ significa una débil preferencia,

$P_i(A_j, A_k) \approx 1$ significa una fuerte preferencia, y

$P_i(A_j, A_k) = 1$ significa una estricta o clara preferencia

En la mayoría de los casos, $P_i(A_j, A_k)$ es función de la desviación $d = a_{ij} - a_{ik}$, es decir, $P_i(A_j, A_k) = p_i(a_{ij} - a_{ik})$, donde p_i es una función no decreciente, $p_i(d) = 0$, si $d \leq 0$, $0 \leq p_i(d) \leq 1$ para $d > 0$. Brans y Vincke (1985) y Brans et al. (1986) propusieron un conjunto de seis funciones de preferencia típicas, (Fülöp 2005). La simplicidad es la principal ventaja de estas funciones de preferencias, al no intervenir más de dos parámetros en cada caso, cada uno con una clara importancia económica. Por lo tanto, el método PROMETHEE consiste, en la construcción de relaciones de superación valorizadas, incorporando conceptos y parámetros que poseen alguna interpretación física o económica fácilmente comprensibles por el decisor, (García-Cascales 2009).

PROMETHEE hace uso del concepto de pseudocriterio ya que construye el grado de superación entre cada par de alternativas ordenadas, tomando en cuenta la diferencia de puntuación que esas alternativas poseen respecto a cada criterio. Como se ha comentado, la evaluación de esas diferencias puede realizarse mediante funciones de valor, p_i , que son utilizadas de acuerdo a las preferencias del decisor, además deben proporcionar los umbrales de indiferencia y de preferencia asociados a estos pseudocriterios, (García-Cascales 2009).

Otras variantes del método plantean situaciones más sofisticadas de decisión, en particular problemas con un componente estocástico. Así se han desarrollado las versiones PROMETHEE II, PROMETHEE III, PROMETHEE IV y PROMETHEE V, éste en concreto incorpora técnicas de optimización para abordar problemas de selección de inversiones con restricciones presupuestarias, (García-Cascales 2009).

3.2.1. MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO BASADOS EN EL CONCEPTO DE DISTANCIA MATEMÁTICA.

En Matemáticas, una métrica o función distancia es una función que define una distancia entre cada par de elementos de un conjunto. Un conjunto en el que se ha definido una métrica se denomina espacio métrico. De forma que, sea X un conjunto, se dice que: $d: X \times X \rightarrow R$ define una distancia (o métrica) en X , si se cumplen las propiedades:

1. Propiedad de no negatividad:

$$d(x, y) \geq 0, \text{ siendo } d(x, y) = 0 \leftrightarrow x = y$$

2. Propiedad de simetría:

$$d(x, y) = d(y, x)$$

3. Propiedad de desigualdad triangular:

$$d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$$

En estas condiciones, se dice que el par $(X; d)$ es un espacio métrico. Así, la distancia más común en R es la definida por $d(x, y) = |x - y|$, y se llama distancia usual.

Cuando solo se cumplen las dos primeras propiedades, de las tres anteriores, se habla de disimilaridad, (Cuadras 1989). Así, el nombre de distancia o disimilaridad entre dos individuos i y j se da a una medida, indicada por $d(i,j)$, que mide el grado de semejanza, o a mejor decir de desemejanza, entre ambos objetos o individuos, en relación a un cierto número de características cuantitativa y/o cualitativas. El valor de $d(i,j)$ es siempre un valor no negativo, (propiedad 1) y cuanto mayor sea este valor mayor será la diferencia entre los individuos i y j .

Desde el punto de vista geométrico, la distancia euclídea entre dos puntos es la distancia más corta posible entre ellos, (Ghorbani 2019). Así, podemos definir que, para n variables, la distancia euclídea entre dos puntos $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ y $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, como el módulo del vector que une ambos puntos:

$$d_e(A, B) = \sqrt{(\sum_{i=1}^n (b_i - a_i)^2)} \quad (3.6)$$

Una distancia euclidiana también cumple la propiedad tres, de desigualdad triangular. Y, tal y como se ha comentado, una distancia que cumple las tres propiedades es una distancia métrica, por lo cual, las distancias euclidianas son un subconjunto de las distancias métricas.

Existe una gran cantidad de distancias e indicadores de disimilaridad y no se puede disponer de una regla general que nos permita definir una disimilaridad conveniente para todo tipo de análisis. Por ello, dependiendo del tipo de variables, de la correlación entre ellas y de la finalidad del análisis que se realice se debe elegir un tipo distancia u otra. En este sentido, se puede definir para n variables:

La distancia Manhattan o ciudad, dM , en esta métrica la distancia entre dos puntos es la suma de las diferencias absolutas entre sus coordenadas:

$$dM = \sum_{i=1}^n |b_i - a_i| \quad (3.7)$$

La distancia Chebyshev, dCh , también denominada métrica máxima o métrica L_∞ , como la mayor diferencia en cualquiera de las coordenadas del espacio:

$$dCh = \max_i (|a_i - b_i|) \quad (3.8)$$

Y, por último, la distancia Minkowski, dm , entre dos puntos como:

$$dm = (\sum_{i=1}^n (b_i - a_i)^p)^{1/p} \quad (3.9)$$

Esta distancia puede considerarse una generalización de las distancias euclídeas y Manhattan, para $p = 1$, la expresión anterior coincide con la distancia Manhattan, y para $p = 2$, coincide con la distancia euclídea.

Volviendo a la distancia euclídea, la principal ventaja de la misma es su facilidad de cálculo, pero tiene dos grandes inconvenientes:

- La distancia euclídea es una distancia sensible a las unidades de medida de las variables, por lo cual, no es invariante ante los cambios de escala. Una posible vía de solución de este problema es la tipificación previa de las variables, o la utilización de la distancia euclídea normalizada.
- La distancia euclídea no tiene en cuenta la correlación entre las variables, por lo cual, las variables correlacionadas nos darán un valor “redundante” de esa medida. Como consecuencia de ello la distancia euclídea aumentará la disimilaridad o divergencia entre elementos, dado que estas variables correlacionadas están midiendo la misma característica, (Ghorbani 2019).

Por tanto, la utilización de la distancia euclídea será recomendable cuando las variables sean homogéneas y estén medidas en unidades similares y/o cuando se desconozca la matriz de varianzas (para obtener la distancia euclídea normalizada). Para solucionar el segundo inconveniente mencionado, P.C. Mahalanobis (1936) desarrolló el concepto de distancia de Mahalanobis, (Mahalanobis 1936). La distancia de Mahalanobis mide la distancia de un conjunto de puntos a un punto común. Es un valor sin unidades. Esta distancia difiere de la distancia euclídea, Manhattan y otras en que tiene en cuenta las correlaciones del conjunto de datos, además ofrece la ventaja que es una distancia invariante de escala. La distancia de Mahalanobis se obtiene a partir de la expresión:

$$d_{Mahalanobis}(A, B) = \sqrt{(\vec{A} - \vec{B})' * S^{-1} * (\vec{A} - \vec{B})} \quad (3.10)$$

Donde S es la matriz de varianzas, es una matriz diagonal cuyos elementos de la diagonal principal $S_{ij} = \sigma_i$.

Las dos propiedades de la distancia de Mahalanobis permiten solventar los dos inconvenientes principales de la aplicación de la distancia euclídea. Por un lado, es invariante ante los cambios de escala y, por otro, no depende de las unidades de medida. Además, el hecho de utilizar la matriz S , permite considerar las correlaciones entre las variables y se corrige el efecto de la redundancia. Por último, es necesario realizar dos observaciones:

1. Si las variables no están correlacionadas, la distancia de Mahalanobis coincide con la distancia euclídea normalizada.
2. Para incorporar la dependencia entre las dos variables, se puede sustituir la matriz diagonal S por la matriz de covarianza Σ , en el caso de que la matriz S sea singular, siendo la matriz Σ , una matriz g-inversa.

A continuación, se desarrollan los métodos TOPSIS y VIKOR, al ser los métodos de decisión basados en el concepto de distancia más extendidos y utilizados en diferentes ámbitos para la selección de alternativas, y también en el ámbito de las infraestructuras, (Wu et al. 2019), (Lee, Kang, and Liou 2017), (Lee and Chang 2018).

3.2.1.1. MÉTODO TOPSIS

El método *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*, TOPSIS, fue desarrollado por Hwang y Yoon en el año 1981, (Hwang and Yoon 1981). Es un método de decisión multicriterio que determina una clasificación de las alternativas de acuerdo a la distancia de las mismas a la solución ideal, entendiéndose ésta como aquella alternativa hipotética que se obtiene a partir de la combinación de las diferentes alternativas, eligiendo las variables que mejor se “comportan” respecto a cada criterio. Por ello, se trata de buscar la distancia euclídea más corta a una alternativa considerada ideal y lo más lejana a otra alternativa considerada anti-ideal. De manera que se denomina alternativa ideal a la alternativa $A^+ = \{A_1^+, A_2^+, \dots, A_n^+\}$, donde $A_i^+ = \max_i a_{ij}$, para el caso de criterios de beneficio y $A_i^+ = \min_i a_{ij}$, para el caso de criterios de coste. De igual forma, la solución no ideal o anti-ideal será $A^- = \{A_1^-, A_2^-, \dots, A_n^-\}$, donde $A_i^- = \min_i a_{ij}$, para el caso de criterios de beneficio y $A_i^- = \max_i a_{ij}$, para el caso de criterios de coste.

El método TOPSIS requiere la normalización de los elementos de la matriz de decisión, para eliminar el efecto de las diferentes unidades de medida en las valoraciones de las alternativas respecto a cada criterio o variable (elementos de la matriz de decisión. Para ello se emplea el método del vector de normalización (tabla 3.3).

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (3.11)$$

Donde, a_{ij} , es cada elemento de la matriz de decisión, y x_{ij} , son los elementos de la matriz de decisión normalizada. Una vez normalizados los elementos de la matriz de decisión, éstos son ponderados según el método elegido para ello. Posteriormente, se obtienen las distancias a la solución ideal normalizada, v_j^+ , y no-ideal o anti-ideal normalizada, v_j^- , como sigue:

$$d_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (x_{ij} - v_j^+)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.12)$$

$$d_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (x_{ij} - v_j^-)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.13)$$

Donde $i= 1, 2, \dots, m$, es el número de alternativas y $j=1, 2, \dots, n$, es el número de criterios. Por último, se calcula la similitud o proximidad relativa a la solución ideal de la siguiente forma:

$$R_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (3.14)$$

De manera que si, $R_i = 1$, obtenemos la alternativa ideal, y por el contrario si es igual 0, estamos ante la solución anti-ideal. Finalmente, ordenando las alternativas en sentido descendente según el valor de R_i , obtenemos la clasificación de las mejores alternativas.

El método TOPSIS ha sido utilizado en numerosas ocasiones para la selección de alternativas en proyectos de infraestructuras, (Camargo Pérez, Carrillo, and Montoya-Torres 2014), (Villacreses et al. 2017), (Benítez Leyva 2015), (Hajkowicz and Collins 2007), (Wu et al. 2019). El método TOPSIS tienen la ventaja de ser muy intuitivo, sin embargo, tiene varios inconvenientes, los principales se encuentran los siguientes:

- Como se ha comentado, es necesario normalizar los elementos de la matriz de decisión para eliminar el efecto de las diferentes unidades de medida de la valoración de las alternativas respecto a los diferentes criterios.
- Al utilizar la distancia euclídea no tiene en cuenta la correlación o relaciones de dependencia entre variables (criterios de selección). Por ello, antes de su utilización es necesario determinar que no existe correlación entre criterios, o bien utilizar la distancia de Mahalanobis para anular este efecto y considerar la relación de dependencia entre variables, (Villanueva Ponce and García Alcaraz 2013), (Vega et al. 2014), (Liu et al. 2016).
- Otro inconveniente destacable es que es que puede provocar el fenómeno conocido como inversión de rango o de orden inverso, en inglés *rank reversal*. En este fenómeno, el orden de preferencia de las alternativas cambia cuando se agrega o se elimina una alternativa en el problema de decisión. En algunos casos, esto puede llevar a lo que se denomina inversión total de rango, donde el orden de preferencias se invierte totalmente, es decir, que la alternativa considerada la mejor, con la inclusión o eliminación de una alternativa en el proceso, se convierte en la alternativa peor, (Ceballos et al. 2013), (García-Cascales and Lamata 2012), (Mufazzal and Muzakkir 2018).
- Además, el método TOPSIS no considera la importancia relativa de la solución ideal frente a la solución no ideal o anti-ideal, (Opricovic and Tzeng 2004), hecho que sí es considerado en el método VIKOR como se ve a continuación.

3.2.1.2. MÉTODO VIKOR

El método VIKOR, *Vlekriterijumsko KOMPromisno Rangiranje*, fue desarrollado para resolver un problema de decisión con un número limitado de alternativas (posibles soluciones)

con criterios en conflicto y con diferentes unidades de medida, (Opricovic and Tzeng 2007). El nombre procede de un término serbio que significa optimización de criterios múltiples para obtener una solución de compromiso, (Shumaiza et al. 2019). De esta forma, el método proporciona una solución, o un conjunto de soluciones, de compromiso que en el caso de criterios en conflicto puede ayudar a los decisores a tomar una decisión. La solución o soluciones de compromiso serán aquellas que están más cerca de la solución ideal, y el compromiso viene determinado por las concesiones mutuas, de manera que la solución de compromiso es la que está determinada como función de utilidad de la mayoría. Por ello, el método VIKOR, sí considera la importancia relativa de la solución ideal frente a la solución no ideal o anti-ideal, por lo cual, subsana un inconveniente indicado del método TOPSIS. Por ello, el método VIKOR es más adecuado para la selección de alternativas en infraestructuras, y se ha aplicado en muchas ocasiones como refleja la literatura, (Belošević et al. 2018), (Sennaroglu and Varlik Celebi 2018), (Ramezani pour et al. 2016), (Awasthi, Omrani, and Gerber 2018). Por otra parte, la normalización (convertir los criterios en adimensionales) en el método VIKOR es una función lineal y no depende de una función del valor de los criterios como ocurre en TOPSIS, (Opricovic and Tzeng 2004).

El método VIKOR es apropiado para resolver problemas de decisión cuando hay criterios en conflicto y con diferentes unidades de medida. La solución de compromiso (o conjunto de soluciones) será aquella que esté más cerca de la solución ideal, y el compromiso viene determinado por las concesiones mutuas, de manera que la solución de compromiso es la que está determinada como función de utilidad de la mayoría, (Opricovic and Tzeng 2004), (Opricovic and Tzeng 2007). Suponiendo que cada alternativa se evalúa de acuerdo con todos los criterios, la clasificación de compromiso podría realizarse comparando la medida de proximidad de todas las alternativas con la solución ideal f^* (los mejores valores para cada uno de los criterios). El inicio del desarrollo del método VIKOR parte de la forma métrica L_p .

$$L_{p,i} = \left\{ \sum_{j=1}^n [w_j * (f_j^* - a_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)]^p \right\}^{1/p} \quad (3.15)$$

Donde, $1 \leq p \leq \infty$, $i = 1, 2, \dots, m$ es el número de alternativas, y $j = 1, 2, \dots, n$ es el número de criterios. Así, $L_{1,i}$, coincide con la fórmula para determinar S_i (ecuación 3.16), $L_{\infty,i}$, coincide con la fórmula para determinar R_i (ecuación 3.17). La solución dada por $\min_i S_i$ se obtiene con una utilidad de grupo máxima (regla de la "mayoría"), y la solución obtenida para $\min_i R_i$ es aquella que representa el mínimo de sentimiento individual del "oponente". Según esto, para determinar la solución de compromiso se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se calcula el "mejor" y el "peor" valor de cada alternativa para cada uno de los criterios, de la siguiente forma:

$$f_j^* = \max_i a_{ij}; f_j^- = \min_i a_{ij} \quad \text{Si el criterio } j \text{ representa un beneficio}$$

$$f_j^- = \min_i a_{ij}; f_j^* = \max_i a_{ij} \quad \text{Si el criterio } j \text{ representa un coste}$$

2. Los valores S_i , R_i y Q_i son calculados para cada alternativa como sigue:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j * (f_j^* - a_{ij}) / (f_j^* - f_j^-) \quad (3.16)$$

$$R_i = \max_j [w_j * (f_j^* - a_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)] \quad (3.17)$$

Donde, w_j es el peso del criterio j respecto al resto, es decir, refleja la importancia relativa de cada criterio. En este punto, es necesario indicar que en el método VIKOR los valores normalizados vienen dados por la expresión: $(f_j^* - a_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)$, es decir, es una normalización lineal. Por lo cual los valores normalizados no dependen de la unidad de los diferentes criterios, (Opricovic and Tzeng 2007).

$$Q_i = \frac{\vartheta(S_i - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1 - \vartheta)(R_i - R^*) / (R^- - R^*) \quad (3.18)$$

Donde $S^* = \min_i S_i$, $S^- = \max_i S_i$, $R^* = \min_i R_i$, $R^- = \max_i R_i$ y ϑ , representa el peso de la estrategia de la "mayoría de los criterios", o "máxima utilidad de grupo". El consenso es para un valor de $\vartheta=0,5$, (Opricovic and Tzeng 2004). En otras investigaciones, se ha puesto de manifiesto como es difícil lograr una situación de consenso en situaciones de incertidumbre y con mucha información y alternativas posibles, (Jelokhani-Niaraki and Malczewski 2015).

3. Se ordenan las diferentes alternativas según los valores S , R y Q . El resultado son tres listas de clasificación.
4. Se identifica como solución de compromiso la alternativa $A(1)$ la alternativa mejor clasificada según el valor de Q , es decir, la alternativa con menor valor de Q . Esto es así, si se cumplen las dos condiciones siguientes:

- Condición 1: Ventaja aceptable.

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

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

La alternativa $A(1)$ también será la mejor clasificada de acuerdo con la lista de valores de S y/o R . Esta solución de compromiso es estable en un proceso de toma de decisiones.

Si no se cumple alguna de las condiciones, el método sugiere un conjunto de soluciones de compromiso, que puede consistir en: Alternativas $A(1)$ y $A(2)$, si no se cumple la condición 2; Alternativas $A(1)$, $A(2)$,..., $A(M)$, si no se cumple la condición 1; $A(M)$ se establecerá teniendo en cuenta la relación $Q(A(M)) - Q(A(1)) < DQ$. Estas alternativas se consideran dentro de la "cercanía a la solución ideal".

Por lo tanto, el método VIKOR utiliza las definiciones matemáticas de medidas de distancia para determinar la solución de compromiso como aquella que es la más cercana a la

solución ideal. Según la definición matemática de la distancia de Manhattan, ecuación (3.7), la distancia entre dos elementos es la suma de las diferencias de sus correspondientes componentes, o bien, la distancia entre dos puntos es la suma de las diferencias absolutas entre sus coordenadas, (Shahrasbi et al. 2017). Se puede decir, que el método VIKOR establece el valor S_i para cada alternativa i , a partir de la distancia de Manhattan. Por otra parte, la distancia Chebyshev se denomina métrica máxima o métrica L_∞ y la distancia de Chebyshev entre dos vectores es la mayor diferencia en cualquiera de las coordenadas del espacio (Cárdenas-Montes 2017), (Shahrasbi et al. 2017), y viene dada por la ecuación (3.8), por lo cual, los valores R_i se calculan para cada alternativa i , a partir de la distancia de Chebyshev.

El método VIKOR presenta ciertas ventajas frente al método TOPSIS. Por una parte, la expresión $(f_j^* - a_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)$ es en realidad la normalización lineal de los elementos de la matriz de decisión, por lo cual, esto hace que se anule el efecto de las diferentes unidades de medida de los criterios de selección. Por otra parte, como se ha comentado, el método VIKOR sí considera la importancia relativa de la solución ideal frente a la solución no ideal o anti-ideal. Sin embargo, hay dos aspectos que el método VIKOR en su planteamiento tradicional, no consigue eliminar, por un lado, no considera la dependencia de las variables. Por otra parte, dependiendo del número de alternativas y el valor de ϑ , en ocasiones aparece el fenómeno de orden inverso o inversión de rango, (Ceballos, Pelta, and Lamata 2018).

Para tener en cuenta la correlación entre variables en la aplicación del método VIKOR, en esta investigación se propone utilizar la distancia de Mahalanobis para proponer una nueva metodología a partir del método VIKOR modificado con la aplicación de esta distancia matemática. En la revisión bibliográfica realizada solo se ha encontrado un caso en el cual se aplica la distancia de Mahalanobis en la aplicación del método VIKOR, (Zhou and Wan 2014). Pero hay que señalar que en el caso indicado la distancia de Mahalanobis solo se aplica para el cálculo de los valores de S del método VIKOR tradicional, y no para el cálculo de los valores de R , como sí se hace en la presente tesis. Además, se aplica la metodología sobre los valores de la matriz de decisión normalizados, lo cual no es necesario y puede conllevar a soluciones erróneas del problema de decisión, al ser la distancia de Mahalanobis invariante a la escala.

3.2.2. MÉTODOS DE PONDERACIÓN DE CRITERIOS O VARIABLES DE DECISIÓN

Determinar los pesos de los criterios es uno de los aspectos clave en los problemas de decisión multicriterio. El proceso para elegir un método apropiado para determinar los pesos es una etapa muy importante, lo que complica el proceso de toma de decisiones. Teniendo en cuenta el hecho de que las ponderaciones de los criterios pueden influir significativamente en el resultado del proceso de toma de decisiones, está claro que se debe prestar especial atención a los factores de objetividad de las ponderaciones de los criterios, (Pamučar, Stević, and Sremac 2018). En la literatura, se han propuesto muchos métodos para establecer los pesos de los criterios de selección. En resumen, éstos pueden clasificarse de diferentes formas: algebraicos o estadísticos; directa o indirecta; compensatorios o no compensatorios. En

general, los métodos compensatorios son utilizados en los métodos basados en una función de utilidad (*MAUT-Multi-attribute Utility Theory*), sin embargo, los métodos no compensatorios son utilizados en los métodos de superación, por ejemplo, en los métodos ELECTRE y PROMETHEE. Los métodos de ponderación más populares son: de asignación directa o asignación de puntos (*point allocation*), de clasificación, de calificación (*rating*), comparaciones pareadas y los métodos de análisis de compensaciones, (Zardari et al. 2015).

Los métodos de ponderación de criterios a través de datos cualitativos tienen una cierta componente de subjetividad. Para evitar esto, Saaty, en el método AHP, estableció una escala cuantitativa a partir de datos cualitativos, (Saaty 1990). Pero a pesar de esto, esta asignación de valor cuantitativo depende de las preferencias del decisor, aunque este aspecto puede ser minorado en el caso de la decisión sea colegiada a través de un grupo de decisión. Si se considera el grado de subjetividad de los métodos de ponderación los métodos de decisión pueden clasificarse en: subjetivos, objetivos o combinados, (Penadés Plá 2017), (Odu 2019). En los métodos subjetivos, la asignación de pesos a los diferentes criterios se realiza solo teniendo en cuenta las preferencias del decisor, mientras que los métodos objetivos determinan los pesos resolviendo modelos matemáticos sin ningún tipo de consideración de las preferencias del decisor, (Ahn 2011).

El peso asignado a cada criterio expresa la importancia relativa de ese criterio respecto al resto. Por ello, se debe prestar mucha atención a la etapa de selección del método de ponderación de criterios, e incluso, es conveniente testar la ponderación obtenida con varios métodos diferentes para confirmarla, ya que esta asignación de pesos tendrá una importancia relevante en la solución final tras la aplicación del método de decisión.

3.2.2.1. MÉTODOS SUBJETIVOS DE PONDERACIÓN

En los métodos de ponderación subjetivos, la asignación de pesos a los criterios deriva de los juicios emitidos por el decisor o grupo de decisión. Esto significa que la ponderación se realiza solo de acuerdo al juicio del decisor, por lo cual, esta ponderación será más o menos acertada según el conocimiento y experiencia del decisor en el campo del problema de decisión, (Zardari et al. 2015). En algunas ocasiones, cuando hay muchas alternativas disponibles en el problema de decisión, utilizar métodos subjetivos, por ejemplo realizar una clasificación (u ordenación) de la importancia de los criterios, puede ser útil para realizar una selección preliminar eficiente de alternativas, ya que evaluar todas las alternativas con detalle no es factible, (Ahn 2011).

A continuación, se describen las características principales de los métodos de ponderación subjetivos más destacados y usados con más frecuencia para la ponderación de criterios en los métodos de decisión multicriterio:

- ✓ Método directo de calificación: Direct Rating Method.

Esté método asigna de forma directa una calificación o puntuación (*rating*) a cada criterio para representar la importancia relativa de cada uno de ellos de acuerdo a las preferencias del decisor, (Zardari et al. 2015). Para ello, se suele utilizar escalas numéricas similares a las utilizadas en un cuestionario según la escala de Likert, (Nemoto and Beglar 2014). De esta forma, se utilizan escalas que van de 1 a 5, de 1 a 7 o de 1 a 10 para determinar el peso de cada criterio, posteriormente los valores deben ser normalizados para obtener unos pesos comprendidos en el intervalo [0,1]. En este método el decisor puede cambiar el peso de un criterio sin cambiar el peso del resto como sí ocurre en el método del punto fijo, que se verá más adelante.

✓ Método de clasificación: *Ranking Method*.

Este método es el más sencillo en su concepto y en la aplicación. Consiste en ordenar los criterios según su importancia, de más a menos importante. Una vez hecho esto, para determinar los pesos de cada criterio hay tres formas diferentes para obtenerlos: rango de suma, rango recíproco y rango exponencial, (Zardari et al. 2015). Para obtener los pesos en estos casos se aplican las siguientes ecuaciones 3.18, 3.19 y 3.20 respectivamente, y posteriormente estos valores deben ser normalizados para obtener un valor comprendido entre 0 y 1.

$$w_i(\text{sin normalizar}) = (n - r_i + 1) \quad (3.19)$$

$$w_i(\text{sin normalizar}) = (1/r_i) \quad (3.20)$$

$$w_i(\text{sin normalizar}) = (n - r_i + 1)^p, p = 2 \quad (3.21)$$

Donde, w_i , es el peso del criterio $i=1, 2, \dots, n$, n es el número de criterios y r_i , es la posición que ocupa el criterio i , cuando los criterios son ordenados por su importancia en el primer paso del método.

Este método es muy atractivo por su simplicidad y porque ofrece resultados muy satisfactorios. Sin embargo, tiene el inconveniente de que no es aplicable cuando el número de criterios es muy grande al ser difícil establecer el listado ordenado de los criterios según su importancia. Además carecen de una base teórica real, por lo cual, estos métodos deben considerarse solo para realizar aproximaciones de los pesos, (Zardari et al. 2015).

✓ Método de asignación directa de puntos: *Point Allocation*.

En este caso, se asignan de forma directa una serie de puntos a cada criterio según su importancia de un total de puntos a “repartir” entre todos los criterios, por ejemplo 100. De esta forma, cuantos más puntos reciba un criterio, mayor será su importancia relativa. Este método es muy fácil de normalizar y además resulta muy sencilla su aplicación. Sin embargo, las ponderaciones obtenidas no son muy precisas y podría resultar difícil aplicarlo si el número de criterios aumenta a 6 o más, (Zardari et al. 2015).

✓ Método de comparaciones pareadas: *Pairwise Comparison Method*.

El método de comparación por pares es en realidad una técnica muy antigua que ha sido utilizada en numerosas ocasiones en la aplicación de métodos de decisión, un ejemplo de ellos es el método AHP descrito anteriormente, (Saaty 1990). Es un método bien desarrollado para ordenar criterios. Las comparaciones por pares implican la comparación de cada criterio con todos los demás por pares. Puede ser eficaz porque obliga al responsable de la toma de decisiones a considerar detenidamente todos los elementos de un problema de decisión, (Zardari et al. 2015).

La aplicación de este método se desarrolla en tres etapas:

1. Construcción de la matriz de comparaciones pareadas. Para ello se puede establecer una escala de valores como puede ser la desarrollada por Saaty en el método AHP, que ha sido explicada en el epígrafe correspondiente del presente documento. La construcción de la matriz se realiza comparando la importancia en el problema de decisión de los criterios de dos en dos, de manera, que el componente de la matriz de comparaciones pareadas, c_{ij} , representa la importancia del criterio C_i sobre el criterio C_j , y por lo tanto, el elemento $c_{ji} = 1/c_{ij}$, siendo $i=1, 2, \dots, n$, y n el número de criterios.
2. Se calculan las ponderaciones de los criterios. Para ello se suman los valores de cada columna. Posteriormente, dividiendo cada elemento de la matriz de comparaciones pareadas por el total de la suma de cada columna se obtienen los valores normalizados de los elementos de la matriz. A continuación, se suman los elementos de las filas de la matriz de comparaciones pareadas normalizada, obteniéndose el peso cada criterio, dividiendo la suma de las puntuaciones normalizadas de cada fila por el número de criterios.
3. Por último, se debe calcular el **Ratio de Consistencia** de las comparaciones realizadas. Este ratio se determina como la relación entre el Índice de Consistencia, (ecuación 3.2) y el Índice Aleatorio, tabla 3.4. De manera, que serán admitidas las comparaciones pareadas realizadas, siempre y cuando el Ratio de Consistencia sea inferior a 0.1.

El método de comparaciones pareadas, a menudo es criticado por algunos autores al considerar que las escalas de valoración de la importancia relativa de los criterios no están establecidas de forma clara, de manera que esta indefinición o falta de claridad puede hacer que diferentes decisores interpreten estas escalas de valoración de forma diferente, e incluso erróneamente. Además, si el número de criterios es muy grande el proceso puede ser tedioso y puede ocasionar inconsistencias en las comparaciones realizadas. Por otra parte, hay que decir que la determinación de la importancia relativa de los criterios es más sencilla que en otros casos, al realizarse de dos en dos.

Además el método ha sido probado empíricamente en numerosas ocasiones y en problemas de decisión diversos con diferentes objetivos, (Zardari et al. 2015).

✓ Métodos SMART, Simple Multi-attribute Rating Technique.

Este método fue desarrollado por Ward Edwards en 1977, (Edwards 1977) como método de decisión multicriterio para la valoración de alternativas y para la ponderación de criterios. En este sentido, el proceso de asignación de pesos a los criterios se realiza en dos pasos. En un primer paso, el decisor ordena o clasifica los criterios de peores (o menor importancia) a los mejores (de mayor importancia). En un segundo paso, califica la importancia relativa de un criterio a otro clasificado de menor importancia. Para ello, al criterio de menor importancia se le asigna una puntuación de 10, mientras al resto de criterios se le van asignando puntos de forma creciente hasta el criterio de mayor importancia que se le da una puntuación de 100, (Pöyhönen and Hämäläinen 2001), (Odu 2019). Posteriormente, todas las puntuaciones de los criterios deben ser normalizados para obtener los diferentes pesos.

Edwards y Barron (1994) enumeraron las deficiencias de este procedimiento original, y presentaron un nuevo método SMARTER, (Edwards and Barron 1994), que solo usa la clasificación de los criterios para obtener los pesos. La idea es utilizar el método de centroide de Solymosi y Dombi (1986), (Solymosi and Dombi 1986) para que el peso de un criterio clasificado como *i-ésimo* sea:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{k=i}^n \frac{1}{k} \quad (3.22)$$

✓ Métodos SWING.

Este método, (Von Winterfeldt and Edwards 1986), parte de una alternativa con los peores resultados en todos los criterios o atributos. El decisor puede cambiar un criterio del peor resultado al mejor. Para ello, se le pregunta qué "oscilación" del peor al mejor resultado daría como resultado la mejora más grande, la segunda más grande, etc. El criterio con el *swing* más preferido es el más importante y recibe 100 puntos. Las magnitudes de todas las demás oscilaciones se expresan como porcentajes de la oscilación más grande. Nuevamente, los porcentajes derivados son los pesos brutos deben ser normalizados para obtener los pesos finales. La ventaja de este método es que tiene en cuenta el rango de cada criterio y es un método sencillo y directo. Sin embargo, no permite a los participantes comparar directamente los criterios entre sí, (Zardari et al. 2015)

✓ Método TRADEOFF

En este método, (Keeney and Raiffa 1976), quien toma las decisiones compara dos alternativas hipotéticas que difieren sólo en dos criterios. Los otros criterios se mantienen en los mismos niveles fijos. Si nombramos a las alternativas hipotéticas como *x* e *y*, y 1 y 2 a los índices que se refieren a los criterios que mantenemos fijos. Se pide al decisor que considere dos alternativas hipotéticas y uno de los criterios se

mantenga fija y el otro criterio se ajuste hasta que las parejas de alternativas (x_1, x_2) y (y_1, y_2) sean igualmente preferidas. Para elegir qué criterio debe moverse, es necesario conocer el rango (intervalo de peso) de los criterios o cuál de las alternativas hipotéticas se prefiere. Esto es necesario para evitar una situación en la que el responsable de la toma de decisiones quisiera mover el criterio fuera del rango definido al principio para él. La declaración de indiferencia viene dada por la ecuación:

$$w_1\vartheta_1(x_1) + w_2\vartheta_2(x_2) = w_1\vartheta_1(y_1) + w_2\vartheta_2(y_2) \quad (3.23)$$

Donde, w_1 y w_2 son los pesos desconocidos de los criterios. Las $n - 1$ declaraciones de indiferencia, conocidos los valores $\vartheta_i(\cdot)$ y la condición de normalización proporciona n ecuaciones que permiten calcular los n pesos, (Pöyhönen and Hämäläinen 2001).

Este método tiene el inconveniente de que es más complejo de aplicar y menos intuitivo que otros, pero sin embargo tiene la ventaja frente al método de comparaciones pareadas que solo necesita $n - 1$ declaraciones de indiferencia, frente a $n(n - 1)/2$ comparaciones.

✓ Método SIMOS.

El método fue desarrollado por Simos, (Simos 1989), y permite a cualquier decisor (no necesariamente familiarizado con la ayuda a la toma de decisiones multicriterio) analizar y expresar la forma en que desea jerarquizar los diferentes criterios de un problema de decisión en un contexto dado, (Figueira and Roy 2002). A pesar de su simplicidad teórica, se ha utilizado ampliamente en la literatura científica. Varios autores han hecho uso del método, en su mayoría combinado con métodos tipo ELECTRE, para evaluar la importancia de las ponderaciones de los criterios. Por ejemplo, se ha usado en problemas de planificación energética y evaluación ambiental, e incluso, en problemas de selección de proyectos y de ingeniería mecánica, (Siskos and Tsotsolas 2015).

El método original de Simos consta de los tres pasos siguientes, relacionados con la interacción con el decisor y la recopilación de información:

1. El decisor recibe un "juego de tarjetas" con el nombre de un criterio en cada una (n tarjetas, cada una correspondiente a un criterio específico de un problema de decisión con n criterios). El decisor también dispone de varias "tarjetas blancas".
2. Se pide al decisor que clasifique las tarjetas/criterios de menor a mayor importancia, colocándolos en orden ascendente. Si varios criterios tienen la misma importancia, debe construir un subconjunto sosteniendo las tarjetas correspondientes junto con un clip.
3. Finalmente, se le pide al decisor que introduzca tarjetas blancas entre dos tarjetas sucesivas (o subconjuntos de criterios *ex aequo*) si considera que la diferencia entre ellas es más amplia. Cuanto mayor sea la diferencia entre los

pesos de los criterios (o los subconjuntos de criterios), mayor será el número de tarjetas blancas que deben colocarse entre ellos. Específicamente, si denota la diferencia en el valor entre dos tarjetas de criterios sucesivos, entonces una tarjeta blanca significa una diferencia de dos veces y, dos tarjetas blancas significan una diferencia de tres veces y así sucesivamente.

Posteriormente, para la determinación de los pesos hay que proceder como sigue:

1. Clasificación de los subconjuntos *ex aequo* desde el menos importante al más importante, considerando también las tarjetas blancas,
2. Asignación de una posición a cada criterio/tarjeta y a cada tarjeta blanca,
3. Cálculo de los pesos no normalizados,
4. Determinación de los pesos normalizados, (Siskos and Tsotsolas 2015).

Sin embargo, la forma en que Simos recomienda procesar la información necesita una revisión por dos razones principales. La primera de ellas es que se basa en una suposición poco realista, y la segunda porque conduce a que los criterios del proceso tengan la misma importancia (es decir, el mismo peso) de una manera no robusta, (Figueira and Roy 2002).

En su esfuerzo por abordar estos problemas, Figueira y Roy (2002), propusieron una versión revisada del método Simos. De manera que, además del proceso de recolección de datos de tres pasos, el nuevo procedimiento introduce un cuarto paso, que exige al decisor que indique “cuántas veces el último criterio es más importante que el primero en el ranking” (razón z). Esta relación se utiliza para definir un intervalo fijo entre las ponderaciones de los criterios o sus subconjuntos. La variable u denota este intervalo: $u = (z - 1)/e$, donde e es el número de diferentes clases de peso (es decir, tarjeta única, subconjuntos de tarjetas y tarjeta blanca), (Fontana, Morais, and De Almeida 2011) (Siskos and Tsotsolas 2015).

✓ Método DELPHI.

El método Delphi fue introducido por primera vez en problemas de decisión en 1963 por Dalkey y Helmer (Dalkey and Helmer 1963). Es una herramienta que se basa en recopilar la opinión de expertos para minimizar la incertidumbre existente en la ponderación de criterios y en la evaluación de criterios cualitativos para obtener valoraciones cuantitativas, (Hallowell and Gambatese 2010), (Penadés-Plà et al. 2016). Aunque hay muchas opiniones e investigaciones sobre cuál es el número adecuado de expertos que deben participar en el proceso, la mayor parte de ellas coinciden en que este número debe ser al menos ocho, (Sierra, Yepes, García-Segura, et al. 2018) y puede estar comprendido entre ocho y doce, (Hallowell and Gambatese 2010). Por otra parte, el número de rondas a realizar en el proceso de encuestas debe ser mínimo tres, (Hallowell and Gambatese 2010). De manera que primero, cada experto evalúa los criterios; luego, si las opiniones de los expertos son diferentes, se realiza una

segunda ronda de cuestionarios y entrevistas que muestran los resultados de la primera ronda. De esta forma, los expertos pueden evaluar los criterios de nuevo, pero con una orientación de ayuda. Este proceso se realiza hasta que se alcanza un consenso, (Penadés-Plà et al. 2016). Por tanto, podemos resumir el proceso como sigue, (Zardari et al. 2015):

1. Se eligen los expertos participantes en el proceso y se recopilan los datos iniciales sobre la evaluación realizada por los expertos en una primera encuesta.
2. Se compilan los resultados de la primera ronda, y se envían de nuevo estos resultados provisionales sobre las valoraciones de los criterios a los expertos para que puedan volver a evaluarlos, pero con una orientación de ayuda. De nuevo, se sintetizan los resultados de esta nueva ronda y se determinan un menor número de resultados provisionales.
3. Por último, se envían los resultados obtenidos en la ronda anterior para evaluar de nuevo los criterios y alcanzar una solución consensuada.

✓ Método OWA

Los operadores OWA, *Ordered Weighted Averaging*, Medias Ponderadas Ordenadas, en español, definidos por Yager, (Yager 1988), son una herramienta estadística que ha ganado una alta notabilidad en la toma de decisiones, estos permiten agregar la información o, en otras palabras, teniendo como punto de partida una serie de datos se puede obtener un único valor representativo de la información, (Anido, Sánchez, and Ancizar 2019). Yager puso de manifiesto que un factor principal en la determinación de la estructura de tales funciones de agregación es la relación entre los criterios involucrados. En un extremo está la situación en la que deseamos que se satisfagan todos los criterios. En el otro extremo está el caso en el que la satisfacción de cualquiera de los criterios es todo lo que deseamos. Estos dos casos extremos llevan al uso de operadores "y" y "o" para combinar las funciones de criterio, (Yager 1988).

Por ello, el operador OWA se define de la siguiente forma, (Yager 1988), (Yager 2004):
Un operador OWA de dimensión n está dado por una función $F: R^n \rightarrow R$, que tiene asociado un vector de pesos $w = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)^T$, que debe cumplir las siguientes propiedades:

- $\sum_{i=1}^n w_i = 1$
- $w_i \in [0,1]$

Además, su resultado final viene dado por la expresión $f(a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n w_i * b_i$ donde b_i , es el i -ésimo mayor elemento de la colección a_i .

Un aspecto fundamental de este operador OWA, está asociado con el reordenamiento de los elementos de agregación, es decir a un elemento particular a_i no se le asocia un

peso determinado, sino que a cada peso w_i se le asocia una posición en la agregación, (Yager 1988).

A partir de lo expresado anteriormente, se plantean tres casos en la agregación con el operador OWA, (Yager 1988):

- Caso 1: F^* , donde $w = w^* = (1, 0, 0, \dots, 0)^T$
- Caso 2: F_* , donde $w = w_* = (0, 0, 0, \dots, 1)^T$
- Caso 3: F_{ave} , donde $w = w_{ave} = \left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}\right)^T$,

Por tanto:

- $F^*(a_1, a_2, \dots, a_n) = \max_i a_i$
- $F_*(a_1, a_2, \dots, a_n) = \min_i a_i$
- $F_{ave}(a_1, a_2, \dots, a_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$

Además, el operador OWA tiene asociada varias propiedades importantes, (Yager 1988), (Yager 2004), tales como:

- Para cualquier operador OWA, F , se cumple que el valor resultante de la agregación está comprendido entre el máximo y el mínimo:
 $F^*(a_1, a_2, \dots, a_n) \leq F(a_1, a_2, \dots, a_n) \leq F_*(a_1, a_2, \dots, a_n)$, lo cual es equivalente a: $\min_i a_i \leq F(a_1, a_2, \dots, a_n) \leq \max_i a_i$.
- Monotonía: Para cualquier operador OWA, F , si $a_i \geq c_i, \forall i = 1, 2, \dots, n$, entonces se cumple: $F(a_1, a_2, \dots, a_n) \geq F(c_1, c_2, \dots, c_n)$.
- Idempotencia: Para cualquier operador OWA, F , si $a_i = a, \forall i = 1, 2, \dots, n$, entonces se cumple que: $F(a_1, a_2, \dots, a_n) = a$.
- Conmutativa: Para cualquier operador OWA, F , y para cualquier permutación d_i por a_i , entonces se cumple que: $F(a_1, a_2, \dots, a_n) = F(d_1, d_2, \dots, d_n)$.

Yager, (Yager 1988) plantea una serie de medidas asociadas al vector de pesos de un operador OWA:

- ✓ El valor α u *orness* del vector de pesos w , se denota por $\alpha(w)$ u *orness*(w), se define a través de la fórmula 3.23.

$$\alpha(w) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n ((n-i)w_i) \quad (3.24)$$

De manera que $\alpha(w^*) = 1$, $\alpha(w_*) = 0$ y $\alpha(w_{ave}) = 0,5$, por lo cual, $\alpha(w) \in [0,1]$.

El valor asociado a esta medida $\alpha(w)$, refleja el resultado de la agregación de *andlike* u *orlike* de un operador OWA, mostrando el grado de preferencia (en

mayor o menor medida) de los argumentos que intervienen en la agregación. Por tanto, al realizar la agregación del máximo su valor es 1, mientras que al realizar la agregación con el mínimo su valor es 0 y en el caso que la agregación se realiza con el promedio su valor es 0,5, (Cables Pérez 2011).

- ✓ El valor *andness*, es el complemento de *orness*, es decir:

$$andness(w) = 1 - orness(w) \quad (3.25)$$

- ✓ La dispersión o entropía del vector de pesos w de un operador OWA, se denota por $dispersion(w)$ y se define a través de la ecuación 3.25, (Yager 1988):

$$dispersion(w) = - \sum_{i=1}^n w_i \ln(w_i) \quad (3.26)$$

Se puede observar que, dado que esta dispersión es realmente una medida de entropía, las siguientes propiedades son válidas:

1. Si $w_i = 1$, para algún i , entonces la dispersión es mínima y $dispersion(w) = 0$.
2. Sin embargo, la *dispersion* es máxima si $w_i = 1/n$, $dispersion(w) = \ln(n)$.

Es interesante ver que esta medida de dispersión utiliza este concepto de información de Shannon, (Shannon 1948) porque en cierto sentido, cuanto más disperso es w , más información sobre los criterios individuales se utiliza en la agregación del valor agregado.

3.2.2.2. MÉTODOS OBJETIVOS DE PONDERACIÓN

Como se ha comentado, en los métodos objetivos de ponderación de criterios no intervienen las preferencias o juicios del decisor. De manera que, los métodos objetivos determinan la ponderación de los criterios resolviendo modelos matemáticos automáticamente sin tener en cuenta las preferencias de quien toma las decisiones, (Zardari et al. 2015). En los métodos objetivos, el peso de cada criterio se obtiene a partir de datos observables y valores reales del comportamiento de las diferentes alternativas según ese criterio y tienen la ventaja de no depender de la opinión de expertos, (Lee and Chang 2018). A continuación, se incluye la descripción de los principales, o más frecuentes en la literatura, métodos objetivos de ponderación de criterios de selección.

- ✓ Método ENTROPÍA.

El método de entropía de Shannon se basa en el concepto de entropía, que en sus inicios fue un concepto de Termodinámica, usado para medir el desorden de un sistema o, lo que es lo mismo, para medir el grado de confusión. Claude E. Shannon (1948) aplicó el concepto de entropía en la teoría de la comunicación para medir la

aleatoriedad y como una herramienta para poder luchar con la incertidumbre, (Shannon 1948). Según esta teoría, la entropía es una medida de la información contenida en el mensaje, es decir, la entropía es el análisis del orden que presenta un sistema aparentemente desordenado. Y cuanto menor es el valor de la entropía, mayor es la información que puede ser proporcionada. Si esto lo trasladamos a la obtención de pesos de los criterios en un problema de decisión, si el valor de la entropía es menor en todas las alternativas, esto proporciona una información muy útil en la toma de decisiones y se le asigna a ese criterio un mayor peso. Al contrario, para un criterio con un mayor valor de entropía, debe asignarse un menor peso, (Ye 2010). Este método de asignación de pesos ha sido utilizado en problemas de decisión de diferentes índoles, (Wu et al. 2019), (Zhao, Zhao, and Guo 2018), (Deepa and Ganesan 2018).

El proceso de cálculo de los pesos de cada criterio según el método de entropía es como sigue, (Deepa and Ganesan 2018):

1. Se obtienen los valores normalizados de los valores de cada alternativa para cada criterio, a_{ij} , teniendo en cuenta si el criterio es índice de beneficio o de coste, (Wang et al. 2018), de la siguiente forma:

$$s_{ij} = \begin{cases} \frac{a_{ij} - \min_i\{a_{ij}\}}{\max_i\{a_{ij}\} - \min_i\{a_{ij}\}}, & \text{criterio de beneficio} \\ \frac{\max_i\{a_{ij}\} - a_{ij}}{\max_i\{a_{ij}\} - \min_i\{a_{ij}\}}, & \text{criterio de coste} \end{cases} \quad (3.27)$$

Donde a_{ij} , es el valor de la alternativa i para el criterio j , y m es el número total de alternativas, n es el número de criterios y $s_{ij} \in [0,1]$. Se calcula, x_{ij} :

$$x_{ij} = \frac{s_{ij}}{\sum_{i=1}^m s_{ij}} \quad (3.28)$$

2. Se calcula el valor de entropía e_j para cada criterio j , de la siguiente forma:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m x_{ij} \ln(x_{ij}) = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \ln(x_{ij}) \quad (3.29)$$

Con la condición de que si $x_{ij} = 0$, entonces $\ln(x_{ij}) = 0$,

3. Calculamos el grado de desviación d_j , para cada criterio j ,

$$d_j = 1 - e_j \quad (3.30)$$

4. Por último, calculamos el peso w_j a asignar a cada criterio j como:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (3.31)$$

Donde n es el número de criterios.

✓ Método CRITIC.

El método CRITIC, *CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation*, (Diakoulaki, Mavrotas, and Papayannakis 1995), al igual que el método de entropía, utiliza la divergencia en las valoraciones de las alternativas respecto a cada criterio, es decir, los valores de los elementos de la matriz de decisión, para determinar el peso de los criterios. El método utiliza el análisis de correlación para detectar contrastes (importancias relativas) entre criterios (Zardari et al. 2015). Es decir, el método se basa en la investigación analítica de la matriz de decisión para extraer toda la información contenida en los criterios de evaluación, (Diakoulaki et al. 1995).

De esta forma, para la determinación de los pesos de cada criterio se procede de la siguiente forma:

Para cada criterio c_j del problema de decisión, y a partir del concepto de solución ideal y solución anti-ideal, se define el valor $x_{ij} \in [0,1]$, que expresa el grado de cercanía de la alternativa i respecto al valor ideal f_j^* , que representa la mejor valoración de todas las alternativas respecto al criterio c_j , y la lejanía al valor f_j^- , que es la peor valoración respecto al criterio c_j . Por tanto, el valor x_{ij} , se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$x_{ij} = \frac{a_{ij} - f_j^-}{f_j^* - f_j^-} \quad (3.32)$$

De esta forma, la matriz inicial de valoraciones, matriz de decisión, se convierte en una matriz de valoraciones relativas con los elementos genéricos, x_{ij} . Al examinar el j –ésimo criterio de forma aislada, se genera el vector x_j , formado por las valoraciones de todas las m alternativas respecto al criterio c_j .

$$x_j = \{x_j(1), x_j(2), \dots, x_j(m)\} \quad (3.33)$$

Cada vector x_j se caracteriza por la desviación estándar σ_j que cuantifica la intensidad del contraste del criterio correspondiente. Así, la desviación estándar de x_j es una medida del valor de ese criterio para el proceso de toma de decisiones. Obviamente, puede usarse cualquier otro índice de la divergencia en las valoraciones, como la entropía o la varianza.

A continuación, se construye una matriz simétrica de dimensiones $n \times n$, en la cual, el elemento genérico r_{jk} , es el índice de correlación lineal entre los vectores x_j y x_k . Puede verse que cuanto más discordantes son las valoraciones de las alternativas respecto a los criterios j y k , menor es el valor r_{jk} . En este sentido, la suma mostrada en la fórmula 3.34, incluida a continuación, representa una medida del conflicto

creado por el criterio j con respecto a la situación de decisión definida por el resto de criterios.

$$\sum_{k=1}^n (1 - r_{jk}) \quad (3.34)$$

Diakoulaki et al., (Diakoulaki et al. 1995) indicaron que el elemento genérico, r_{jk} , índice de correlación lineal, puede ser sustituido por el coeficiente de correlación de rango de Spearman que proporciona una medida más general de la relación entre los vectores x_j y x_k .

Por tanto, la cantidad de información C_j , emitida por el j –ésimo criterio, puede determinarse componiendo las medidas que cuantifican las dos nociones mediante la siguiente fórmula de agregación multiplicativa:

$$C_j = \sigma_j * \sum_{k=1}^n (1 - r_{jk}) \quad (3.35)$$

Según el análisis anterior, cuanto mayor sea el valor C_j , mayor será la cantidad de información transmitida por el criterio correspondiente y mayor su importancia relativa para la toma de decisiones. Los pesos objetivos se obtienen al normalizar estos valores a la unidad de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^n C_k} \quad (3.36)$$

✓ Método del Peso Medio.

En el método del peso medio, los pesos de los criterios se obtienen objetivamente a partir de la siguiente ecuación:

$$w_i = 1/n \quad (3.37)$$

Donde n es el número de criterios.

Se basa en el supuesto de que todos los criterios tienen la misma importancia. El peso medio se usa en aquellos métodos de decisión multicriterio cuando no hay información del decisor o la información no es suficiente para tomar una decisión, (Zardari et al. 2015).

✓ Método de Desviación Estándar.

El método de desviación estándar es similar al método de entropía, determina el peso de los criterios en términos de su desviación estándar a través de las siguientes ecuaciones, (Jahan et al. 2012):

$$w_i = \sigma_i / \sum_{i=1}^n \sigma_i, \text{ donde } n \text{ es el número de criterios} \quad (3.38)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x})^2}{m}}, \text{ donde } m \text{ es el número de alternativas} \quad (3.39)$$

w_i , es el peso del criterio i , σ_i es la desviación estándar.

3.2.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD E INCERTIDUMBRE

Como se ha comentado anteriormente, los métodos de decisión multicriterio presentan numerosas ventajas porque permiten resolver problemas complejos de una forma sistemática y sencilla. Pero la utilidad de cualquier modelo depende de la precisión y confiabilidad de sus resultados, por lo cual, es altamente deseable desarrollar métodos de decisión que sean menos sensibles a la influencia de los supuestos subjetivos hechos a través de la determinación de la importancia relativa de los criterios (ponderación), o construir estrategias que ayuden a evaluar la sensibilidad del modelo y la incertidumbre del resultado, (Maliene, Dixon-Gough, and Malys 2018). Que los resultados de los diferentes métodos de decisión se ven afectados por un cierto grado de incertidumbre, y que en muchos casos puede ser muy significativo, ha sido resaltado por muchos autores y por responsables públicos, por ejemplo, la Unión Europea a la hora de aplicar sus políticas tiene en cuenta este hecho, (Azzini et al. 2020).

Como consecuencia de lo anterior, el significado de los resultados, sus posibles interpretaciones y las fuentes de incertidumbre y, por tanto, la calidad de la información que respalda los procesos de decisión, exige algunos pasos que permitan llevar a cabo una serie de precauciones adicionales. Por ello, es importante identificar y conocer las diferentes fuentes de incertidumbre, así como cuantificar, en la medida de lo posible, la incertidumbre y su influencia en los resultados del método de decisión. Sin embargo, reconocer y cuantificar la incertidumbre es un tema complejo y multifacético, (Azzini et al. 2020). Por otra parte, la mayoría de los autores proponen que la aplicación de cualquier método de decisión se complete con un análisis de sensibilidad a través de una simulación de cambios en la ponderación de los criterios, pero la incertidumbre debe considerarse a lo largo del proceso a partir de la estructuración del problema, la identificación de los criterios de evaluación y la selección de la metodología adecuada, (Mosadeghi et al. 2013). La incertidumbre en los datos, procedimientos y enfoques empleados para su resolución sugieren realizar un estudio del comportamiento del proceso de toma de decisiones lo más completo posible (Moreno-Jiménez et al. 1998). En este sentido, el análisis del comportamiento debe efectuarse en tres niveles que responden, respectivamente, a la efectividad, eficacia y eficiencia del proceso de decisión (1) la aproximación (validez); (2) la modelización (robustez); y (3) la solución (estabilidad), (Moreno-Jiménez et al. 1998).

En ocasiones se confunde el concepto de análisis de incertidumbre, análisis de sensibilidad y de robustez del método de decisión, al ser conceptos similares, y todos ellos encaminados a asegurar la calidad del método de decisión, pero sin embargo, existen diferencias entre ellos, (Azzini et al. 2020), (Song and Chung 2016). De manera que, el análisis

de incertidumbre tiene como objetivo cuantificar la incertidumbre en la solución proporcionada por el método de decisión debido a la incertidumbre en las entradas (criterios y alternativas) del método, (Azzini et al. 2020). Para determinar la robustez de los métodos, suele efectuarse un análisis del comportamiento de la solución, que evalúe la posibilidad de cambio de rango entre las alternativas cuando se añaden o eliminan aspectos relevantes (alternativas, criterios, dependencias, etc.) (Moreno-Jiménez et al. 1998). Como se ha comentado, la mayoría de los estudios de comportamiento de las soluciones del método de decisión que se realizan se refieren al estudio de la estabilidad (análisis de sensibilidad) de la solución ante pequeñas modificaciones en los valores tomados por la evaluación de las alternativas respecto a los criterios y, principalmente, en la ponderación de éstos.

Por ello, se puede decir que el análisis de sensibilidad mide la estabilidad o el comportamiento de la solución ante pequeños cambios en las preferencias ocurridos durante el proceso de resolución o ante pequeños cambios en los valores tomados para los parámetros. Así, el análisis de sensibilidad es un proceso de investigación del comportamiento de un sistema, proceso o método y asociado con la incertidumbre, (Medeiros, Alencar, and de Almeida 2017). En un contexto de toma de decisiones, el análisis de sensibilidad tiene gran importancia porque las variaciones en las entradas del método pueden afectar la recomendación dada por el decisor a la toma de decisiones multicriterio.

En la literatura se encuentran diferentes clasificaciones y tipos de análisis de sensibilidad. En este sentido, Frey y Patil en 2002, (Frey and Patil 2002) identificaron varios métodos diferentes de análisis de sensibilidad que se pueden agrupar en tres grupos: matemáticos, estadísticos (probabilísticos) y gráficos. Dentro de los métodos probabilísticos destaca la simulación de Montecarlo, (Cruz Trejos and Bazzani C. 2008), (Liu et al. 2016). A continuación, se incluyen algunos métodos de cálculo de la medida de robustez del método de decisión y algunos métodos de análisis de sensibilidad más utilizados:

✓ Medida de robustez.

Varios autores (Guillen, Trejos, and Canales 1998) han propuesto una medida de robustez que permite al decisor determinar la solidez de la preferencia entre dos alternativas, la cual se define como la modificación de los pesos de los criterios de decisión para cambiar el orden (o *ranking*) entre dos alternativas. La medida de robustez se puede calcular para cada par de alternativas utilizando la siguiente ecuación:

$$\gamma(a_1, a_2) = \frac{w_1*(x_{11}-x_{21})+\dots+w_n*(x_{1n}-x_{2n})}{w_1*|(x_{11}-x_{21})|+\dots+w_n*|(x_{1n}-x_{2n})|} \quad (3.40)$$

Donde, $\gamma(a_1, a_2)$ es la medida de robustez entre las alternativas A_1 y A_2 , w_n es el peso del criterio n , x_{1n} es la valoración de la alternativa A_1 con respecto al criterio c_n , y $\gamma(a_1, a_2) \in [-1,1]$. El peso de los criterios w^* que invierte la clasificación de un par de alternativas puede ser calculado como sigue:

Si $x_{11} > x_{12}$, entonces $w_1^* = w_1 - w_1 * \gamma(a_1, a_2)$

Si $x_{11} \leq x_{12}$, entonces $w_1^* = w_1 + w_1 * \gamma(a_1, a_2)$

Los valores totales de las alternativas emparejadas que se evalúan se determinan luego utilizando pesos de criterios modificados y deberían ser iguales, si el método se ha ejecutado correctamente, (Song and Chung 2016), (Hyde, Maier, and Colby 2005).

Las principales limitaciones de este método son: 1) solo es aplicable al método de decisión de la suma ponderada; 2) no se pueden identificar las ponderaciones de los criterios críticos ya que todas las ponderaciones de los criterios se ajustan en una proporción igual; y 3) la suma de las ponderaciones de los criterios optimizados ya no es igual a la suma de las ponderaciones de los criterios iniciales, ésta es una de las principales deficiencias de este enfoque, (Song and Chung 2016).

✓ Análisis de sensibilidad.

Hay diferentes enfoques para llevar a cabo el análisis de sensibilidad, en ocasiones se utiliza una combinación de dos de ellas.

- **Variación de pesos en un determinado intervalo:**

Este sistema se ha utilizado en ocasiones para determinar el nivel de interferencia entre criterios y la clasificación de alternativas dada por el método de decisión, (Maliene et al. 2018). La metodología a seguir se describe en la investigación realizada por Davies et al. (2012), (Davies et al. 2012). Permite conocer el efecto de cada criterio de forma independiente sobre la solución del método de decisión. Para ello, el peso de cada criterio se modifica (incrementándose y disminuyéndose) en un pequeño porcentaje, por ejemplo, 5%, e igualmente se modifica (incrementándose y disminuyendo) en un gran porcentaje (50%), manteniendo constantes el peso del resto de los criterios. De esta forma, se pueden calcular los coeficientes relativos de sensibilidad de cada criterio como el número de cambios en la clasificación de alternativas debido al cambio (pequeño o gran porcentaje) en las ponderaciones de los criterios.

La aplicación inversa del método permite conocer la tolerancia al cambio de cada criterio, como porcentaje del cambio permitido (aumento o disminución) para cada criterio, sin que se produzca ningún efecto sobre el resultado de clasificación de alternativas. Este último caso, requiere el uso de la programación de un algoritmo relativamente sencillo en ordenador, (Maliene et al. 2018).

De esta forma, es posible determinar qué criterios tienen una mayor “sensibilidad” a cambios en la ponderación y el efecto de ésta en la clasificación de alternativas que da como solución el método de decisión. Por otra parte, permite determinar si algún criterio puede ser suprimido, en el caso, de que cambios en la ponderación del mismo en ningún caso afecte a la clasificación de alternativas.

- **Criterio crítico (*most critical criterion*):**

Triantaphyllou y Sanchez (1997), (Triantaphyllou and Sánchez 1997) propusieron un método de análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de la incertidumbre en la determinación del criterio más crítico y los resultados. Determinaron que las ponderaciones asignadas a los criterios caracterizaban la importancia de los mismos, por lo tanto, identificar los criterios críticos y reevaluar con precisión sus ponderaciones podría mejorar el proceso de toma de decisiones, (Haddad 2019). Para ello propusieron tres análisis de sensibilidad diferentes para evaluar los resultados en tres métodos de decisión distintos: método de la suma ponderada, método del producto ponderado y método AHP. En el caso del método de la suma ponderada, se calcula la cantidad mínima δ , que tiene que cambiar el peso de un criterio, w_m , para invertir la clasificación de alternativas. Se calcula para cada par de alternativas, a_i y a_j , y para cada criterio c_m , de la siguiente forma:

$$\delta_{m,i,j} = \frac{P_j - P_i}{x_{jm} - x_{im}} \quad (3.41)$$

Donde, P_j y P_i , son las posiciones ocupadas por las alternativas en la clasificación y x_{jm} y x_{im} , son las valoraciones de cada alternativa respecto al criterio c_m .

Se debe cumplir la siguiente condición para que el peso de los criterios modificados sea factible:

$$\delta_{m,i,j} \leq w_m \quad (3.42)$$

En ocasiones, puede ser imposible revertir la clasificación existente cambiando el peso de los criterios actuales. Sin embargo, cuando se cumplen las condiciones, el peso modificado del criterio, w_m^* , se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$w_m^* = w_m - \delta_{m,i,j} \quad (3.43)$$

El porcentaje de cambio de los pesos de los criterios se puede calcular como:

$$\%w_m = \frac{w_m^*}{w_m} * 100 \quad (3.44)$$

El criterio crítico se define como el menor valor relativo de $\%w_m$ para todos los criterios en relación con la mejor alternativa. No obstante, también se puede encontrar para todas las alternativas, (Hyde 2006).

Por otra parte, el método también proporciona el valor umbral de la valoración de una alternativa respecto a un determinado criterio, para que se produzca una inversión en la clasificación, (Hyde 2006). De esta manera, en el método de suma ponderada, para dos alternativas, A_i y A_j , con $1 \leq i \leq j \leq m$, para cada criterio C_k , $1 \leq k \leq n$, la mínima variación, valor umbral, ∇_{ijk} , para que se produzca una inversión en el ranking puede ser calculada de la siguiente forma, (Song and Chung 2016):

$$\nabla_{ijk} < \frac{P_i - P_j}{w_k} * \frac{100}{a_{ik}} \text{ si } i < k \quad (3.45)$$

$$\nabla_{ijk} > \frac{P_i - P_j}{w_k} * \frac{100}{a_{ik}} \text{ si } k < i \quad (3.46)$$

Sin embargo, para que el valor umbral sea factible se debe cumplir la siguiente condición:

$$\nabla_{ijk} \leq 100 \quad (3.47)$$

De esta forma, el grado de criticidad de la alternativa A_i , en relación con el criterio C_k , es el menor valor (%) por el que el actual valor de a_{ik} debe cambiar para que se modifique el ranking de alternativas, es decir:

$$\Delta_{ik} = \min |\nabla_{ijk}| \quad (3.48)$$

El coeficiente de sensibilidad de la alternativa A_i , en relación con el criterio C_k , denotado por $sens(a_{ik})$, es el valor recíproco del grado de criticidad, es decir:

$$sens(a_{ik}) = \frac{1}{\Delta_{ik}} \quad (3.49)$$

Donde, $1 \leq i \leq m$ y $1 \leq k \leq n$. Cuando el coeficiente de sensibilidad es igual a cero no se producirán cambios en la clasificación de las alternativas, sin embargo, si el coeficiente de sensibilidad es alto, los cambios en la clasificación se producirán más fácilmente, (Song and Chung 2016).

Las principales limitaciones de este método son que los resultados dependen del método de decisión que se aplique, y además no se puede evaluar al mismo tiempo la sensibilidad de los pesos de los criterios y la valoración de las alternativas respecto a cada criterio. A pesar de estas limitaciones, el método sí permite calcular el criterio crítico, (Hyde 2006).

- **Método de análisis de incertidumbre basado en medidas de distancia.**

Este método fue propuesto por Hyde et al. (2004), (Hyde and Maier 2004) consiste en un enfoque de análisis de incertidumbre a través de una optimización de la métrica de distancia y la interpretación de los resultados. Este enfoque de análisis de incertidumbre determinista se utilizó para determinar las variaciones mínimas de las ponderaciones de los criterios que pueden hacer la equivalencia de rango o la inversión entre dos alternativas seleccionadas. La modificación mínima de las ponderaciones de los criterios se obtiene convirtiendo el problema en un problema de optimización y explorando los rangos de ponderación de los criterios factibles. De esta forma, la función objetivo minimiza la métrica de distancia, que proporciona un valor numérico para la cantidad de disimilitud entre los pesos de los criterios originales y los pesos optimizados. Las ponderaciones de criterios optimizadas es el conjunto de ponderaciones de los criterios que son la distancia más pequeña al conjunto de ponderaciones de criterios original, de modo que, cuando se utilizan las ponderaciones de criterios optimizadas para evaluar el resultado final, se obtiene el mismo resultado para las dos alternativas que se están evaluando, (Song and Chung 2016). La métrica de distancia utilizada es la distancia euclídea, y se evalúa la alternativa peor clasificada en el ranking original con el resto de alternativas para obtener los parámetros optimizados, (Hyde and Maier 2004). Al usar la distancia euclídea, la función objetivo se define como sigue:

$$\min d_e = \sqrt{\sum_{n=1}^N ((w_{ni} - w_{no})^2) + (x_{nmi} - x_{nmo})^2} \quad (3.50)$$

Sujeta a las siguientes limitaciones:

$$\sum_{n=1}^N w_{ni} = \sum_{n=1}^N w_{no} \quad (3.51)$$

$$v(a_y)_{opt} = v(a_x)_{opt} \quad (3.52)$$

$$LL_w \leq w_{no} \leq UL_w \quad (3.53)$$

$$LL_x \leq x_{nmo} \leq UL_x \quad (3.54)$$

Donde, w_{ni} y w_{no} son los pesos original y optimizado del criterio n , x_{nmi} y x_{nmo} , son las valoraciones inicial y optimizada de la alternativa peor clasificada originalmente, n , para el criterio m , siendo N el número total de criterios. Por otra parte, $v(a_y)_{opt}$ y $v(a_x)_{opt}$, son los valores totales originales de las alternativas mejor y peor clasificadas calculados según los valores iniciales de estas alternativas y con los pesos optimizados. LL_x y UL_x son los límites inferiores y superiores de los valores para cada criterio de la alternativa peor clasificada originalmente, y LL_w y UL_w son los límites inferiores y superiores, respectivamente, de cada uno de los pesos de los criterios, (Hyde and Maier 2004).

En algunas situaciones, una alternativa siempre será superior a otra, independientemente de los valores de las ponderaciones de los criterios. En este caso, la clasificación de las alternativas es robusta, ya que es insensible a las ponderaciones de los criterios. Sin embargo, en muchos casos, esto no suele ocurrir y combinaciones diferentes de los pesos de los criterios darán como resultado una equivalencia de rango, es decir, la misma posición en la clasificación de alternativas. De esta forma, se trata de determinar el cambio más pequeño de las ponderaciones de los criterios para lograr la equivalencia de rango o la inversión. Finalmente, después de analizar la distancia euclídea para cada par de alternativas, se pueden identificar los criterios críticos examinando el cambio relativo y absoluto en las ponderaciones de los criterios de acuerdo con las siguientes ecuaciones, (Song and Chung 2016):

$$Absoluto \Delta w_m = w_{mo} - w_{mi} \quad (3.55)$$

$$Relativo \Delta w_m = \frac{w_{mo} - w_{mi}}{w_{mi}} * 100 \quad (3.56)$$

3.2.4. APLICACIÓN DE MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS EN INFRAESTRUCTURAS

Los métodos de decisión multicriterio son herramientas que se han utilizado en muchas ocasiones para la selección de alternativas en infraestructuras. En este sentido, hay que indicar que en la práctica o en el ámbito profesional se utilizan métodos de decisión sencillos como el método de suma ponderada o el método de Pattern (Sigford and Parvin 2013), (Suarez Galarza 2015) con métodos de ponderación de criterios de asignación directa y normalmente método subjetivos. De igual forma, el análisis de sensibilidad se limita a cambiar la ponderación de los criterios para determinar cómo cambia la clasificación de alternativas, sin analizar los criterios críticos o los valores umbral que determinan cambios en la clasificación.

Sin embargo, en la literatura académica sí es frecuente encontrar investigaciones y artículos centrados en la selección de alternativas en proyectos de infraestructuras de diferentes ámbitos. En estos casos se aplican métodos de decisión multicriterio con distintos objetivos: evaluar la sostenibilidad de las diferentes alternativas (Liu et al. 2016), (Sierra, Yepes, García-Segura, et al. 2018), (Sierra, Yepes, and Pellicer 2018), (Zavadskas, Šaparauskas, and Antuheviciene 2018); tener en cuenta la correlación entre las variables de entrada, (Mardani et al. 2015), (Dimić et al. 2016); obtener una clasificación de alternativas adecuadas para optimizar y/o priorizar inversiones en fases iniciales de planificación de infraestructuras; (Belošević et al. 2018); evaluar los riesgos, (Mohsen and Fereshteh 2017); determinar la localización óptima, (Wu et al. 2019), (Lee et al. 2017).

Si consideramos la aplicación de métodos de decisión en infraestructuras por sectores de actividad, se destacan, entre otros, los siguientes artículos que han estudiado su aplicación:

Tabla 3.5. Aplicación de métodos de decisión multicriterio en infraestructuras por áreas de actividad

Energía	<ul style="list-style-type: none">• (Mardani et al. 2015)• (Guerrero-Liquet et al. 2016)• (Wang et al. 2018)• (Lee and Chang 2018)• (Faxas Gúzman and Guerrero Liquet 2015)• (Kumar et al. 2017)• (Ceballos et al. 2013)• (Villacreses et al. 2017)• (Lee et al. 2017)
Transporte y movilidad	<ul style="list-style-type: none">• (Schitea et al. 2019)• (Suprayoga et al. 2020)• (Sennaroglu and Varlik Celebi 2018)• (Camargo Pérez et al. 2014)• (Watróbski et al. 2017)• (Barford and Leleur 2014)

	<ul style="list-style-type: none">• (Mardani et al. 2016)• (Bueno Cadena and Vassallo Magro 2015)• (Awasthi et al. 2018)
Planificación urbanística	<ul style="list-style-type: none">• (Liu et al. 2016)• (Salari et al. 2018)• (De Medina-Salas et al. 2017)
Infraestructuras hidráulicas	<ul style="list-style-type: none">• (Wu et al. 2019)• (Badi et al. 2018)• (Zardari et al. 2015)• (Llopis-Albert and Palacios-Marques 2017)• (Song and Chung 2016)

Fuente: Elaboración propia

3.3. APARCAMIENTOS DISUASORIOS

Las instalaciones o infraestructuras de aparcamientos disuasorios (*park and ride*) son elementos fundamentales para implantar medidas de restricciones al transporte privado en el centro de la ciudad y así disminuir la congestión en el centro de las ciudades. De forma sencilla y coloquial, un aparcamiento disuasorio permite a un usuario estacionar su vehículo privado, normalmente un coche, y a continuación utilizar el transporte público para desplazarse y finalizar el viaje, (Parkhurst and Meek 2014). Frecuentemente, los aparcamientos disuasorios son elementos a tener en cuenta en los planes de movilidad urbana para lograr un sistema de transporte sostenible. Estas instalaciones, para que sean eficientes y eficaces en su función, deben situarse junto a un nodo de transporte público como una estación de metro, estación de ferrocarril o terminal de autobuses, y próximas a las principales carreteras de entrada a las grandes ciudades. También deben tener un coste de aparcamiento bajo o gratuito cuando se utilice como complemento al transporte público.

Cuando los aparcamientos disuasorios son planificados adecuadamente, y como parte de un plan de movilidad urbana integral y sostenible, se reducen los desplazamientos individuales en vehículos privados y la congestión y mejoran la calidad del aire, al aumentar la utilización del transporte público. De esta forma, son un elemento fundamental a considerar cuando el objetivo es “retirar” los vehículos de los centros de las ciudades. La utilización de aparcamientos disuasorios proporciona beneficios como: reducción de la congestión en el centro de las ciudades, reducción de las emisiones de gases contaminantes, menor consumo de combustible y energía, menor ocupación del suelo, ahorros de tiempo en los desplazamientos y mayor desarrollo económico, (Özen, Halit; Saraçoğlu, Abdulsamet; Boz and Kusakci 2016).

La existencia de un transporte público cercano es la razón de ser de los aparcamientos disuasorios. La calidad del transporte público es, por tanto, una condición vital para que el aparcamiento funcione correctamente y consolide el atractivo y productividad de este sistema.

Un factor importante para el usuario es la posibilidad de conseguir una plaza en el transporte público, lo que determina la capacidad de los servicios de transporte público. En este sentido, los servicios de autobuses son más flexibles para adaptarse a la demanda que un servicio de trenes de cercanías, (European Union 2005). Estos aspectos deben ser tenidos en cuenta a la hora de planificar un sistema de aparcamientos disuasorios.

Como indicaron Boyce et al. (1972), en sus inicios, el desarrollo de aparcamientos disuasorios fue considerado como una de las mayores innovaciones en el transporte público urbano de la época, (Boyce, D.E.; Allen, B.; Desfor, G.; Zuker 1972). En EE.UU., los aparcamientos disuasorios tienen su origen en la década de 1930, entendidos estos como aparcamientos ad hoc a lo largo de rutas de autobuses y ferrocarril en las áreas marginales de grandes ciudades. En 1939, el ferrocarril de Long Island desarrolló un gran estacionamiento para estacionar en el World's Fair, (Noel 1988). Se considera que es en 1953 cuando se

construye el primer gran aparcamiento disuasorio asociado a una línea de autobuses en St. Louis con una capacidad de 1.000 plazas. Dos años más tarde, la autoridad portuaria de New York y New Jersey construyó un aparcamiento disuasorio para facilitar el acceso a Manhattan. A mediados de la década de 1960, 36 ciudades de EE.UU. tenían implementados servicios de aparcamiento disuasorio asociados al transporte público, 28 de los cuales se encontraban plenamente operativos, (Bullard and Christiansen 1983). El desarrollo de aparcamientos disuasorios en Europa comenzó en los Países Bajos y Reino Unido, (Parkhurst and Meek 2014), (Bullard and Christiansen 1983), (RPS Group 2009). Aproximadamente en 1970, en las ciudades de Leicester, Oxford y Nottingham en Reino Unido se implementaron, de forma experimental, sistemas de autobuses de corto alcance vinculados a aparcamientos disuasorios. En los siguientes años se abrieron instalaciones de aparcamientos disuasorios en otras ciudades como Cambridge, Exeter, Norwich, Preston y York. De manera, que al final de la década de los 90 se encontraban operando este tipo de aparcamientos en unas 35 ciudades los días laborables durante todo el año, y en otras 30 ciudades más estaban considerando iniciar su explotación o expansión, (Parkhurst 2000).

Tabla 3.6. Evolución del desarrollo de aparcamientos disuasorios en Europa, 1970-1990.

Año	Nº Ciudades	Nº Aparcamientos disuasorios	Plazas disponibles	Tamaño medio (nº plazas)
1970	24	1.166	194.213	168
1990	76	3.722	849.226	228
Incremento (%)	216	219	337	36

Fuente: *Parking policies and the effects on economy and mobility. COST Action 342*, (European Union 2005).

3.3.1. CARACTERÍSTICAS Y TIPOS DE APARCAMIENTOS DISUASORIOS

De forma general, casi todas las clasificaciones de los tipos de aparcamientos disuasorios se establecen en función de la cercanía al centro de la ciudad y el medio de transporte público asociado al aparcamiento. En este sentido, y teniendo en cuenta sólo aquellos aparcamientos disuasorios que proporcionan el servicio de transferencia intermodal para el cambio de medio de transporte, según su localización y relación con la captación de usuarios éstos pueden clasificarse en (European Union 2005), (Meek, Ison, and Enoch 2008), (Mingardo 2013), (Chu, Land, and Pendyala 2001), (Espada Recarey et al. 2009):

- Remotos, tienen la función de captar conductores en origen, al comienzo de sus desplazamientos. Suelen estar ubicados cerca de los hogares de los usuarios, normalmente en zonas residenciales suburbanas. Según la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (AASHTO 2004), las instalaciones de aparcamiento disuasorio suburbano son aquellas instalaciones que se encuentran entre 6,4 y 48,3 km del destino final y que proporcionan un servicio intermodal para cambiar de medio de transporte.

- Periféricos, tienen la función de destino, cuyo objetivo es interceptar a los conductores justo antes de su destino final. Están generalmente ubicados en las afueras de la ciudad. Este tipo de aparcamientos disuasorios son necesarios para reducir el tráfico en vehículos privados en el centro de las ciudades y, especialmente, en aquellos casos en los cuales hay restricciones de circulación para vehículos particulares, por ejemplo, a través de peajes o prohibición de acceso, para reducir o eliminar problemas de congestión y de contaminación en los centros urbanos o bien cuando en el centro de la ciudad el número de estacionamientos es muy limitado. Numerosas ciudades recurren a este tipo de aparcamientos para preservar el centro histórico de la ciudad. En España, ciudades como Valencia, Sevilla, Toledo o Barcelona cuentan con este tipo de infraestructuras para evitar la congestión en el centro de la ciudad. Madrid cuenta con 25 aparcamientos disuasorios en su periferia y 10 más se encuentran en fase de proyecto o en construcción, (Ayuntamiento de Madrid 2016). En Reino Unido ciudades como Oxford, Bath, Cambridge y York también cuentan con aparcamientos disuasorios periféricos.
- Locales, tienen una función más amplia para interceptar conductores en algún momento de su viaje entre el origen y el destino. Estas instalaciones se encuentran normalmente en zonas no residenciales, en áreas suburbanas y a lo largo de los principales corredores de transporte.

Por otra parte, los aparcamientos disuasorios también pueden ser de uso único o bien de uso compartido con otros servicios. En el primer caso, el aparcamiento disuasorio es planificado, diseñado, construido y explotado para funcionar únicamente como tal, es decir, para facilitar la intermodalidad entre el vehículo privado y el transporte público. En el segundo caso, las instalaciones son compartidas para dar servicio de aparcamiento a otros servicios, por ejemplo: centros comerciales, iglesias, cines, instalaciones deportivas, etc., (Bullard and Christiansen 1983). Un ejemplo de este tipo de aparcamiento disuasorio en España, lo encontramos en Madrid para el caso del aparcamiento “Estadio Metropolitano” que funciona como aparcamiento disuasorio y como aparcamiento convencional para el estadio de fútbol Wanda Metropolitano, propiedad del Club de Fútbol Atlético de Madrid.

Por otra parte, también se pueden clasificar según el modo de transporte público de intermodalidad, si solo existe un tipo de transporte público o varios, según la tarifa y por otros criterios, (Parkhurst and Meek 2014). En la tabla siguiente se incluyen diferentes tipos de aparcamientos disuasorios según distintos criterios:

Tabla 3.7. Tipos de aparcamientos disuasorios según diferentes criterios

Criterio	Tipos de aparcamientos disuasorios
Reserva de la capacidad del aparcamiento disuasorio	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad reservada para usuarios del intercambiador de transporte • Capacidad compartida con otros usuarios demandantes de aparcamiento
Tarifa	<ul style="list-style-type: none"> • Libre • De pago • Condicionada al uso de transporte público
Modo de transporte intermodal	<ul style="list-style-type: none"> • Bus urbano • Bus interurbano • Metro • Tren de cercanías • Tren interurbano • Varios modos de transporte en la misma instalación intermodal
Localización de aparcamiento disuasorio respecto a destino final	<ul style="list-style-type: none"> • Corredor urbano • Áreas metropolitanas • Periférico • Remoto

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. BENEFICIOS Y EFECTOS SOBRE EL TRÁFICO DE LOS APARCAMIENTOS DISUASORIOS

Se han realizado numerosos estudios sobre la eficacia de los aparcamientos disuasorios en relación a los objetivos políticos por los cuales son diseñados, planificados y construidos y que son: reducir el número de vehículos que entran en el centro de la ciudad, promover el transporte público y reducir los vehículos-kilometros recorridos y, como consecuencia las emisiones de gases de efecto invernadero, (Zijlstra, Vanoutrive, and Verhetsel 2015). Sin embargo, no hay muchos estudios sobre los efectos producidos por los aparcamientos disuasorios teniendo en cuenta los cambios de modalidad, (European Union 2005).

A modo de ejemplo del funcionamiento y los efectos de instalaciones de aparcamientos disuasorios en Europa se pueden destacar los siguientes, (European Union 2005):

- ✓ Países Bajos: Se ha calculado una reducción del tráfico de automóviles en las horas punta del 1% al 3% para 4 de las 9 instalaciones especializadas. Por otra parte, en la ciudad holandesa de Groningen no se midió ninguna reducción en el tráfico de entrada a la ciudad, pero se informó de un aumento de la demanda en aparcamientos disuasorios por parte de visitantes y trabajadores.
- ✓ Reino Unido: En Oxford, las instalaciones de aparcamientos disuasorios (park and ride) han dado lugar a una reducción de entre el 3 y el 9% en el tráfico de automóviles. En Chester se informa de una reducción del 20% del tráfico en el

centro de la ciudad. Y en el caso de York, se informa que el tráfico de entrada anual se ha reducido en 1,1 millones de coches.

- ✓ Alemania: En la ciudad de Hannover se han registrado reducciones del tráfico de automóviles hacia y desde el centro de unos 10.000 viajes diarios. Y en la ciudad de Colonia, las 21 instalaciones de aparcamientos disuasorios, con las que cuenta la ciudad, se utilizan los fines de semana por encima de su capacidad.
- ✓ España: En Madrid, diariamente unos 20.000 vehículos no entran en el centro de la ciudad al hacer uso de los aparcamientos disuasorios. En Barcelona, esta cifra alcanza los 12.000 vehículos diarios.
- ✓ Francia: La implantación de instalaciones de aparcamientos disuasorios en la ciudad de Estrasburgo dieron lugar a un aumento del número de usuarios del transporte público en más del 43%.
- ✓ Austria: En la ciudad de Viena el sistema de aparcamientos disuasorios absorben un tráfico de vehículos de entrada a la ciudad de aproximadamente el 12%.

Es claro que, la implementación de un servicio de aparcamiento disuasorio es un medio eficaz para reducir el consumo energético, así como, la contaminación del aire y la congestión del tráfico. Estos beneficios se logran mediante una reducción de los kilómetros recorridos por vehículo que resultan de la desviación de los viajes en automóvil a los viajes modales en transporte público. La medida en que cada uno de los beneficios potenciales se realiza, sin embargo, depende de los tipos de aparcamientos disuasorios y la demanda de uso que reciben. De esta forma, los aparcamientos remotos, que se encuentran más lejos de sus destinos finales, pueden producir mayores beneficios en términos absolutos que los periféricos que no tendrán un efecto tan significativo, ya que la porción de tránsito del viaje es pequeña en relación con la longitud del viaje total, (Bullard and Christiansen 1983). Sin embargo, los aparcamientos periféricos son fundamentales para implantar medidas de limitación de acceso a los centros históricos de las ciudades.

Es aceptado que las instalaciones de aparcamiento disuasorio interceptan el tráfico existente de vehículos privados durante la totalidad o parte del viaje. La evidencia sugiere que este tipo de instalaciones también inducen nuevos viajes. En algunos casos, las personas mayores que viven fuera de la ciudad y tienen miedo de entrar en la ciudad en coche vuelven a la ciudad utilizando estos aparcamientos. En otras situaciones donde la capacidad de la carretera es más o menos igual a la cantidad de tráfico entrante, la investigación sugiere que las instalaciones de aparcamiento disuasorio apoyan el crecimiento de visitantes y trabajadores entrantes, (European Union 2005). El efecto de la introducción de instalaciones de aparcamiento disuasorio, en general, depende en gran medida de la magnitud de la demanda y oferta de estacionamiento en el destino; el atractivo del destino, la accesibilidad de las instalaciones y la calidad del transporte público, desde el aparcamiento disuasorio hasta el destino.

Respecto al debate sobre los efectos ambientales de las instalaciones de aparcamientos disuasorios, resulta difícil llegar a una conclusión firme. De hecho, es dudoso si contribuyen a una reducción general de las emisiones y el uso de energía, (European Union 2005). En este sentido, hay que indicar que los efectos medioambientales de las políticas de aparcamientos disuasorios, reducción de emisiones y consumo de energías están determinadas por la reducción en el número de desplazamientos en vehículos privados, (Espada Recarey et al. 2009). El efecto sobre la reducción en el tráfico ha sido ampliamente discutido y varios estudios han indicado que, en algunos casos, una política de aparcamientos disuasorios puede producir efectos “no deseados”, (Mingardo 2013). Entre estos efectos no deseados que pueden provocar un aumento en el tráfico se deben, por ejemplo, a que una vez implantado el aparcamiento disuasorio se captan usuarios que realizan parte del trayecto en coche y parte en transporte público cuando antes estos usuarios realizaban todo el trayecto en transporte público. Igualmente puede ocurrir con usuarios que realizaban todo el trayecto en bicicleta. También, como se ha comentado, se pueden generar nuevos viajes que antes del aparcamiento disuasorio no se realizaban, o bien, usuarios que utilizan el aparcamiento disuasorio como aparcamiento tradicional, de manera que dejan en el mismo su vehículo y continúan el trayecto andando, por encontrarse cerca de su destino final, (Mingardo 2013). Respecto a este último efecto, una forma de evitarlo es regular la tarifa condicionada al uso del transporte público.

A pesar de los efectos no deseados comentado, existe un consenso claro sobre el hecho de que una política de aparcamientos disuasorios contribuye a la calidad del centro de la ciudad en términos de calidad del aire, reducción de la congestión y mejora de la accesibilidad (European Union 2005). Además son necesarios como medidas complementarias a restricciones en el acceso a los centros de las ciudades.

3.3.3. ELEMENTOS Y CRITERIOS A CONSIDERAR EN LA IMPLANTACIÓN DE APARCAMIENTOS DISUASORIOS

Los principales factores o requisitos que hacen aconsejable la construcción de aparcamientos disuasorios en las estaciones de tren de cercanías e intercambiadores de transporte público son (European Union 2005):

- El desarrollo de un anillo metropolitano dependiente de una ciudad central.
- Principales rutas de comunicación con problemas de congestión de tráfico en las vías de acceso a una ciudad.
- Plazas de aparcamiento insuficientes en el centro de una ciudad.
- La existencia de un buen sistema de transporte público que canalice grandes flujos hacia el centro, necesariamente acompañado de una red urbana adecuada (metro, autobuses urbanos, tranvías, etc.) que no penalice al usuario en cuanto a tiempo de viaje y comodidad.

- Zonas metropolitanas con baja densidad poblacional.
- Alto índice de motorización.
- Centros de trabajo ubicados principalmente en el centro de las ciudades.
- Gran afluencia de visitantes y compradores al centro de la ciudad.
- Horas punta claramente definidas.

Por otra parte, para determinar la viabilidad y eficacia de los aparcamientos disuasorios hay que considerar una serie de criterios, de manera que la evaluación de las diferentes localizaciones respecto a estos criterios ayudará a determinar cuál es la opción que mejor cumple el objetivo estratégico de sostenibilidad, para el cual el aparcamiento disuasorio es planificado. Estos criterios pueden agruparse en cuatro grandes categorías: funcionales, económicos, medioambientales y sociales.

- Los funcionales agrupan criterios como: demanda captada en base a las condiciones socioeconómicas, de ubicación y de relaciones origen-destino entre los diferentes puntos del corredor; reducción en los vehículos-km recorridos en automóvil como consecuencia directa de la implementación del aparcamiento disuasorio; accesibilidad al sistema de transportes intermodal, dificultad de aparcamiento en destino, limitaciones o restricciones de acceso en vehículo privado al centro de la ciudad, etc.
- Los económicos incluyen criterios como: costes de construcción, costes de explotación, derivados de la relación coste-beneficio al usuario potencial del sistema en comparación con otras opciones competitivas, rentabilidad económica, financiación pública, financiación privada o participación público-privada.
- Los energéticos y medioambientales tienen en cuenta el ahorro en combustible tras la implantación del aparcamiento disuasorio, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como consecuencia de la menor congestión del tráfico en las vías de acceso, la reducción de la contaminación acústica o calidad del aire, la integración paisajística del aparcamiento disuasorio, ocupación del suelo, etc.
- Por último, los criterios sociales engloban aspectos relacionados con la mejora en la calidad de vida de los usuarios, la aceptación política o social de este tipo de medidas por parte de la comunidad, la reducción de la siniestralidad vial en los corredores afectados, etc., (Colin Buchanan Consultores 2010).

Hay que decir que la demanda potencial del aparcamiento es el elemento fundamental que determina el éxito del objetivo estratégico de reducir el número de kilómetros recorridos por vehículo y reducir el tráfico en el centro de las ciudades, (European Union 2005). Por otra parte, muchos estudios indican que es difícil estimar la demanda, al depender directamente del comportamiento de los usuarios. En este sentido, en varias guías se indica que una forma aproximada de cálculo se puede realizar a través de la población adyacente, de la intermodalidad y por la observación del aparcamiento informal existente en la zona próxima al

centro de transferencia de transporte, (Bullard and Christiansen 1983), (Colin Buchanan Consultores 2010), (Chu et al. 2001).

Algunas guías indican que para estimar la demanda hay que tener en cuenta si el aparcamiento disuasorio es remoto o periférico, (Chu et al. 2001). En este sentido, para aparcamientos remotos se tiene en cuenta datos de aparcamiento informal, datos de población en la zona de origen y datos de empleabilidad en el destino final. Sin embargo, para los aparcamientos disuasorios periféricos, que se diseñan para complementar las deficiencias de estacionamiento en centros de ciudades muy congestionados o con acceso restringido, es necesario tener en cuenta otros aspectos como la calidad y disponibilidad del transporte público y la oferta de aparcamientos disuasorios próximos. También es fundamental conocer los datos de volumen de tráfico y congestión en el corredor de entrada, la población adyacente y los motivos de la mayoría de los viajes al centro de la ciudad.

3.4. MUROS DE CONTENCIÓN.

Es difícil establecer cuándo fue construida la primera estructura que pueda considerarse como un muro de contención. Parece que el primer ejemplo de construcciones para soportar o contener el empuje de una masa de materiales o de tierra se encuentran vinculados a monumentos megalíticos de la costa Atlántica de Europa, como es el caso de Newgrange Cairn en Irlanda, erigido unos 4000 años A.C., (Kerisel 1993). Aunque en la Antigüedad se construyeron muchos muros, los que se conservan son de adobe o de piedra. En este sentido, se tiene registro del empleo de estructuras de contención por parte de los egipcios, que fueron en la antigüedad, una de las primeras civilizaciones en construir grandes monumentos y ciudades. Para ello utilizaban pastas y morteros. Posteriormente, los romanos impulsaron la técnica del *emplectum*, consistente en crear dos hojas exteriores de sillares de piedra, rellenas de un mortero de cal con arena y cascotes, (Acuña et al. 2012).

Durante el desarrollo de las ciudades y su fortificaciones, se produjo un gran auge en la construcción de muros, y el desarrollo de tratados sobre su construcción. Así, en la Escuela de Alejandría se escribió el primer libro importante de estructuras de contención, donde se ponía de manifiesto la necesidad de mayores espesores de los muros en proporción a sus mayores alturas. Durante la Edad Media y el Renacimiento, se desarrollaron muchos otros tratados para fortificaciones, las cuales eran construidas principalmente de mampostería. En uno de estos tratados, publicado por Marshal de Vauban en 1684, se señala que el espesor de la base de los muros debía ser función de su altura, recomendando para ello una base de espesor igual a $0,2 \cdot H + 1,48$ m, (Jara Mori 2008).

Un muro de contención se puede definir como toda estructura continua que de forma activa o pasiva produce un efecto estabilizador sobre una masa de terreno, (Ministerio de Fomento. Gobierno de España 1999). En la bibliografía se encuentran otras definiciones, el término de muro de contención de tierras se aplica a estructuras que retienen el terreno con un ángulo más pronunciado que el ángulo de rozamiento del propio terreno, (Anderson 2012). Los muros de contención se construyen para soportar la presión lateral de la tierra detrás de ellos. Son estructuras que se utilizan para contener tierra u otros materiales sueltos cuyas pendientes naturales son indeseables, en el caso de la construcción de infraestructuras lineales como ferrocarriles o carreteras, (Pons et al. 2018). Los muros de contención son a menudo un activo crítico de las infraestructuras que se pasa por alto porque están constantemente en las infraestructuras que usan diariamente. Cada año, a nivel mundial, se construyen millones de metros cuadrados de muros de contención para proyectos públicos y privados. Los muros de contención ahorran espacio, reducen los impactos y permiten a los propietarios aprovechar al máximo una propiedad o un derecho de paso determinados. Por lo tanto, los muros de contención son una parte importante de los proyectos de desarrollo en la actualidad, (Anderson, Alzamora, and Demarco 2008).

Existen diferentes clasificaciones de muros de contención según diferentes criterios: mecanismo de soporte de carga (muros estabilizados externa o internamente), sistema

constructivo (relleno o corte), rigidez del sistema (rígido o flexible) y vida útil (permanente o temporal), (South Carolina Department of Transportation (SCDOT) 2010). Por lo tanto, existen diferentes tipos de muros de contención según sus características de funcionamiento, sus características de construcción, o bien, por los usos de los mismos, (Anderson 2012). De igual forma, hay diferentes tipologías de muros, con características distintas para dar respuesta a diferentes situaciones, como presencia o no de agua, tipo de terreno, sismicidad, etc.

Los muros de contención son estructuras costosas que están diseñadas y construidas para soportar taludes de desmonte y terraplén donde no hay espacio disponible para la construcción de taludes más planos y estables, (South Carolina Department of Transportation (SCDOT) 2010). La necesidad de un muro de contención se determina conjuntamente por el promotor de la obra y los proyectistas. Típicamente, en una obra de carreteras, se requieren muros de contención donde no es posible disponer de derecho de paso adicional o hay otros factores (es decir, otras vías de comunicación, servicios públicos, o otras construcciones, etc.) que limitan el desarrollo de las laderas estables. La necesidad de un muro de contención a menudo se puede determinar durante el proceso de diseño de las infraestructuras, (South Carolina Department of Transportation (SCDOT) 2010). Por tanto, el coste de construcción, el respeto al medio ambiente y el espacio disponible serán criterios a tener en cuenta en su diseño y construcción. La selección de un tipo de muro de contención es un proceso complejo, considerando los diversos factores geotécnicos y no geotécnicos involucrados (Choi and Lee 2010). Además, durante el proceso de selección, es necesario considerar los criterios durante todo el ciclo de vida.

Según las características de los muros, estos cumplen distintas funcionalidades. A título de ejemplo, y para el caso de carreteras, los muros según su funcionalidad, pueden ser, (Ministerio de Fomento. Gobierno de España 1999):

- **Recubrimiento:** Cuya función principal es proteger superficialmente al terreno de la acción de la erosión y de la meteorización.
- **Sostenimiento:** Se construye separado del terreno natural dejando un espacio vacío que posteriormente se rellena con un material seleccionado, con el objeto de crear o ampliar la plataforma de la carretera. Sostiene a la carretera.
- **Contención:** Se emplean para la sujeción de tierras o terrenos inestables. Contiene tierras respecto a la carretera.

Existen muchas tipologías de muros de contención, con distintas formas y características estructurales. Para la presente investigación, se consideran tres grupos principales:

- **Muros de gravedad.** Un muro de gravedad consigue la resistencia al deslizamiento y al vuelco a través del peso del muro y del rozamiento de la base del mismo con el terreno. Se construyen, generalmente, sobre una superficie plana antes de rellenar detrás del muro para crear la diferencia de altura que el muro retiene. Por sus

características, son comúnmente usados para situaciones en las cuales el perfil natural del terreno es elevado, por ejemplo, para retener terraplenes en carreteras e infraestructuras ferroviarias.

También pueden ser usados para soportar excavaciones por debajo del nivel del terreno natural. Para estas situaciones, la excavación se realiza a cielo abierto y el relleno se realiza detrás de la pared del muro. Estos muros requieren una excavación adicional y relleno, así como la ocupación de terrenos durante la construcción.

Una característica común de los muros de gravedad es que el drenaje se realiza en forma de los drenajes interceptores detrás del muro con el fin de reducir la presión del agua que actúa sobre el muro.

Entre los muros de gravedad destacan:

- Muros modulares: gaviones, mampostería, de bloques prefabricados de hormigón, sillería, muros jardinera de madera, muros criba.
- Muros vegetados.
- Muros de escollera (figura
- Muros de hormigón armado.
- Muros de tierra armada.

Figura 3.2. Muro de escollera en una carretera. Jaén (España)



Fuente: Propia del autor

- **Muros empotrados o muros pantalla.** Un muro empotrado es aquel cuya base penetra en el terreno para obtener el apoyo lateral de la resistencia pasiva del suelo en la parte frontal inferior del muro. Esta resistencia puede ser utilizada como una resistencia única para proporcionar estabilidad al muro o puede actuar en conjunción con anclajes, apoyos u otras fuentes de apoyo lateral para aumentar la estabilidad. En este caso, se consideran muros anclados o apuntalados.

Al contrario que los muros de gravedad, la construcción de los muros empotrados requiere equipos especialistas y operaciones in-situ. Este tipo de muros se construyen de forma previa a realizar la excavación.

Los muros empotrados son utilizados preferentemente a los muros de gravedad cuando:

- ✓ Hay que realizar excavaciones muy profundas.
- ✓ La ocupación temporal de terrenos colindantes no es posible para realizar una excavación temporal a cielo abierto.
- ✓ Existen estructuras o edificaciones cercanas a la excavación que tienen que ser sustentados o protegidos.
- ✓ Si el nivel freático está alto y requiere un excesivo bombeo para la eliminación de agua para realizar una excavación temporal a cielo abierto.

Entre los muros empotrados destacan:

- Muros de tablestacas: planas o modulares.
- Pantallas de pilotes perforados: pilotes separados, tangentes o secantes.
- Pantallas de pilotes hincados.
- Muros pantallas con lodos bentoníticos.

Figura 3.3. Muro de tablestacas arriostradas con anclajes al terreno.



Fuente: Fernando Arancibia. *Ingeniería y Construcción*, 2014.

<https://facinyconst.blogspot.com/2014/02/pantallas-de-tablestacas-arriostradas.html>

- **Muros híbridos.** Combinan aspectos de los muros de gravedad y de los muros empotrados o muros pantalla para retener el terreno natural. Un ejemplo de un muro híbrido es un muro de hormigón armado en “L” o “T”, con cimentación de pilotes. De esta forma, los muros híbridos son adecuados para aquellas circunstancias donde es insuficiente la capacidad de soporte y frente al deslizamiento del muro. La capacidad de soporte suficiente se puede conseguir utilizando una cimentación por pilotes.

En la siguiente tabla se incluyen las tipologías principales de cada grupo junto con sus características principales.

Tabla 3.8. Tipologías de muros de contención

	Tipologías	Características principales
Muros de gravedad	Muro de hormigón en masa	Utiliza su propio peso como estabilizador, no trabaja a tracción
	Muro de hormigón armado	Pueden ser: en “L”, “T”, con plataforma estabilizadora, con contrafuertes, realizados in situ o prefabricados
	Muros de fábrica de sillería	Son muros de bloques de piedra colocados de forma ordenada uno junto a otro
	Muros de fábrica de mampostería	Son muros formados por mampuestos acuñaados
	Muros de escollera	Son muros formados bloques pétreos irregulares, obtenidos generalmente mediante voladura, con formas diversas y superficies rugosas
	Muros vegetados	Son macizos de suelo reforzado con geotextiles. No suelen necesitar cimentación, total integración paisajística
	Muros de gaviones	Formados por la superposición de cajas de forma prismática de enrejado de alambre galvanizado rellenas de rocas de pequeño tamaño
	Muros jardinera	Muro compuesto por un emparrillado de elementos de hormigón colocados sobre una cimentación de hormigón.
	Muros jardinera de madera	Formado por piezas de madera que se van encajando y cuyo interior se rellena de tierra
	Muros prefabricados de hormigón	Muros en forma de “L”, el panel y la zapata se han prefabricado conjuntamente formando un solo elemento. Limitados a 4 m. altura limitaciones transporte.
	Muros de bloques prefabricados de hormigón	Verdes: Formado por piezas prefabricadas huecas que se rellenan de tierra Bloques macizos: encajados entre sí. Hay una amplia tipología de bloques.
	Muros de lamas	Formados por placas transversales prefabricadas, lamas, situadas entre contrafuertes verticales. Suelen llevar una cobertura vegetal.
	Muros de tierra reforzada	Muros construidos mediante tongadas de material de relleno, colocándose entre estos elementos que arman el mismo y con paramento exterior formado por elementos prefabricados de hormigón: escamas, bloques aligerados, macizos, celular verde.
Muros empotrados o muros pantalla	Muro de tablestacas: planas o modulares	Son construidos por la introducción en el terreno de las planchas de acero, por vibración o por presión, sin retirar ningún material
	Muros pantallas tradicionales	Pueden ser ancladas o apuntaladas. La construcción se puede realizar con o sin lodos bentoníticos.
	Muros pantallas de pilotes perforados	Pueden ser pilotes separados, tangentes o secantes
	Muros pantalla de micropilotes	

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4. Muro jardinera de bloques de hormigón.



Fuente: *Architecture&Design: Australian Architectural Design.*
<https://www.architectureanddesign.com.au/home>.

Existen antecedentes en la bibliografía que consideran métodos de decisión multicriterio, como herramienta para elegir el tipo de muro de contención más adecuado, como es el caso del Departamento de Transportes de Carolina del Sur en USA, (South Carolina Department of Transportation (SCDOT) 2010). El SCDOT utiliza un método de decisión basado en la Teoría de la Utilidad Multi-atributo y considera un listado de 12 criterios de selección que son: tipo de terreno; presencia de agua en el terreno; consideraciones en la construcción; plazo de construcción; zona de tránsito de vehículos (right-of-way); estética; medioambientales; durabilidad y mantenimiento; tradición; prácticas del contratista (por ejemplo uso de patentes); coste; desplazamientos (horizontales y verticales).

Igualmente, para la selección de la solución constructiva más adecuada de muros de contención de tierras en edificación, hay que destacar que en la bibliografía hay otros antecedentes en los cuales se han aplicado otros métodos de selección para ello, y no estudiados en la presente revisión, en concreto, árboles de decisión aplicando análisis de regresión logística, para selección de muros en edificación, (Choi and Lee 2010). En este caso, se definen, en primer lugar, las variables objetivo, que se caracterizan en función de las tres partes principales que componen una estructura de contención de tierras: pared de retención, soporte lateral y técnicas de tratamiento del terreno (grouting). A continuación, se definen las variables explicatorias que determinan la elección de las variables objetivo, veinticinco en total, entre ellas, metros cuadrados de excavación, impacto sobre los edificios colindantes, tipo de suelo, prevención de la contaminación, etc.



CAPÍTULO 4: MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.

En los capítulos anteriores se han descrito, por una parte, los criterios o indicadores de sostenibilidad a tener en cuenta en la evaluación sostenible de infraestructuras, y por otra parte, los diferentes métodos de decisión multicriterio que permiten sistematizar el proceso de toma de decisiones en la selección de alternativas en proyectos de infraestructuras. Teniendo en cuenta que, en la mayoría de las ocasiones las decisiones se toman en condiciones de incertidumbre, también se han revisado los diferentes análisis de robustez, sensibilidad e incertidumbre para evaluar la validez de la metodología de decisión y que la clasificación de alternativas obtenida se mantiene estable ante cambios en las condiciones de partida.

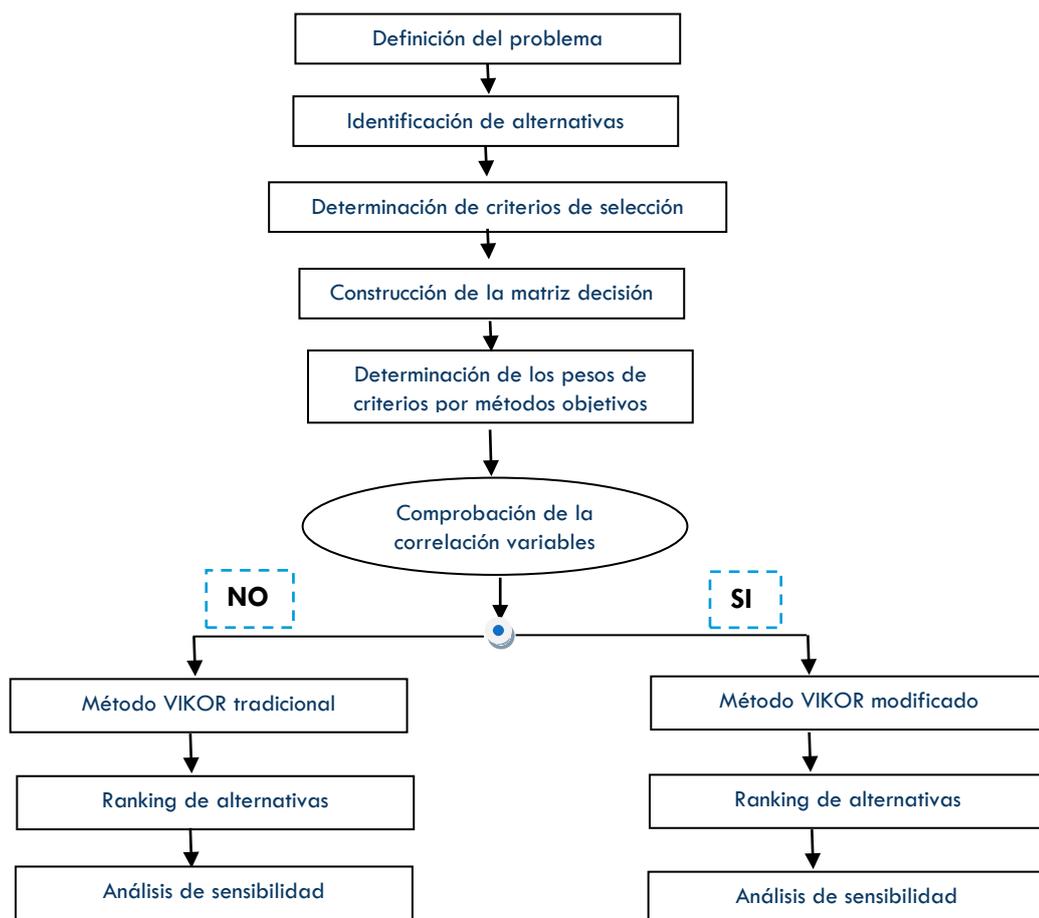
Como se ha indicado, los métodos de decisión multicriterio son herramientas muy útiles que permiten de forma relativamente sencilla resolver problemas de decisión. Por ello, se han aplicado en numerosas ocasiones para la selección de alternativas en proyectos de infraestructuras. La principal ventaja de los métodos de decisión multicriterio es la sencillez de aplicación y la versatilidad que ofrece para resolver cualquier problema en el que hay un número limitado y conocido de alternativas. Del mismo modo, la propia construcción de la matriz de decisión ayuda al análisis del problema y sintetizar las posibles soluciones, así como la importancia relativa de los diferentes requisitos. Sin embargo, tiene algunos inconvenientes que es necesario destacar: por una parte, alternativas que pueden ser potencialmente óptimas pueden ser descartadas porque nunca reciben la mayor puntuación total, pero pueden ser las alternativas que mejor cumplen los requisitos principales. Por otra parte, dependiendo del método utilizado para la ponderación de criterios, este proceso tiene una componente subjetiva y está influenciado por las preferencias del decisor. Este último inconveniente puede ser eliminado al utilizar métodos objetivos de ponderación criterios, los cuales se basan en medir la divergencia en las valoraciones de las alternativas respecto a cada criterio para establecer los pesos de los criterios de selección.

Otro aspecto a considerar en la aplicación de los métodos de decisión multicriterio, por la gran influencia que pueden tener en la solución obtenida, es la correlación entre las variables de entrada (elementos de la matriz de solución). Este aspecto, ha llevado a algunos autores y desarrolladores de métodos de decisión multicriterio, como es el caso de Thomas Saaty (métodos AHP y ANP), a modificar la formulación matemática de los métodos de decisión para considerar la correlación entre variables. Sin embargo, gran parte de los métodos de decisión multicriterio existentes y estudiados en esta tesis no tienen en cuenta la correlación entre variables. Por ello, de forma previa a la selección adecuada del método de decisión a aplicar, es altamente recomendable comprobar la correlación entre variables a través de alguna de las herramientas estadísticas existentes para ello, ya sea a través del método de correlación de Pearson (correlación lineal) y/o a través del método de Spearman (relaciones no lineales). De manera que, si hay correlación entre las variables es necesario aplicar un método de decisión que considere esta correlación entre variables.

En la presente tesis, se plantea una metodología de decisión que se basa en: la modificación del método VIKOR, estudiado en la bibliografía, para considerar la correlación entre variables y la ponderación de criterios de selección a través de métodos objetivos para evitar la subjetividad del decisor, en concreto se utiliza el método de entropía, definido en el apartado de Métodos objetivos de ponderación. Por último, se evalúa la estabilidad de la clasificación de alternativas a través de la comparación de dos métodos de análisis de sensibilidad diferentes. Esta metodología de decisión desarrollada se aplica a dos tipos diferentes de infraestructuras, por un lado, a la selección de tipologías de muros de contención en infraestructuras lineales, por el gran impacto medioambiental que tienen sobre el entorno, tanto visual como de barrera. Por otro lado, a la selección de la localización de aparcamientos disuasorios, al ser una infraestructura determinante en los planes de movilidad urbana y en el establecimiento de medidas de restricción del tráfico, en el centro de las grandes ciudades, para la reducción de emisiones de gases contaminantes.

De forma esquemática la metodología desarrollada se refleja en la figura 4.1.:

Figura 4.1. Esquema de metodología de decisión



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se desarrolla cada una de las etapas de la metodología:

1. Definición del problema.

En primer lugar, es necesario definir el problema. Para ello se definen los objetivos a lograr. Estos objetivos dependerán de cada proyecto. Así, en los casos de estudio en los cuales se aplica la metodología, por una parte, la selección de tipologías de muros de contención y por otra parte a la localización sostenible de aparcamientos disuasorios en una gran ciudad, los objetivos son diferentes. En el primer caso, el objetivo es determinar la tipología más sostenible para cada entorno o localización geográfica. En el segundo caso, el objetivo es determinar la solución más sostenible para la ubicación de aparcamientos disuasorios teniendo en cuenta criterios económicos, ambientales, funcionales y sociales.

2. Identificación de alternativas.

Se trata de determinar todas las posibles soluciones al problema de decisión. Para el caso de selección de tipologías de muros de contención serán todas las tipologías posibles, ver tabla 3.8. En el caso de aparcamientos disuasorios, las alternativas serán todas las localizaciones posibles de aparcamientos disuasorios.

3. Determinación de los criterios de selección.

Se trata de determinar todos los requisitos de proyecto que pueden influir en el proceso de selección. Estos criterios pueden tener diferentes unidades de medida e incluso ser adimensionales. Es decir, estos criterios pueden ser cuantitativos o cualitativos. De forma detallada, estos criterios de selección son identificados para los dos casos de estudio, en los cuales se aplica la metodología desarrollada. En el epígrafe siguiente se describen los casos de estudio.

4. Construcción de la matriz de decisión.

Para ello, será necesario determinar la valoración de cada alternativa para cada uno de los criterios. En este punto hay que indicar que la valoración de las alternativas respecto a criterios cuantitativos, dependiendo de cada caso, es más o menos sencilla, sin embargo, el problema surge a la hora de valorar las diferentes alternativas respecto a criterios cualitativos. Para solventar este inconveniente y poder convertir valoraciones cualitativas en valores cuantitativas, se utilizan comparaciones pareadas según la escala de Saaty del método AHP descrito en la bibliografía. De esta manera, la valoración cuantitativa de cada alternativa, para cada criterio cualitativo, varía entre 0 y 1, siendo 0 el valor más bajo y 1 el valor más alto para cada criterio.

5. Determinación de los pesos de criterios por métodos objetivos.

Para determinar la importancia relativa, de cada criterio en el proceso de decisión, éstos deben ser ponderados. Para ello se aplica el método de entropía, un método objetivo de determinación de los pesos de los criterios, los cuales han sido descritos en el epígrafe de Métodos Objetivos de Ponderación del presente documento.

6. Comprobación de la correlación de las variables.

Como se ha comentado anteriormente, previo a la selección del método de decisión a aplicar, es necesario comprobar la correlación entre variables, bien a través del método de correlación de Pearson (correlación lineal) y/o a través del método de Spearman (relaciones no lineales). De manera que, si hay correlación entre las variables, es necesario aplicar un método de decisión que considere esta correlación entre variables, en el caso de la presente investigación, el método VIKOR modificado. Para comprobar la correlación entre variables, en esta tesis se emplea el coeficiente de correlación de Pearson (correlación lineal), al considerar suficiente la existencia de correlación lineal para hacer necesaria la aplicación de un método de decisión que considere la correlación entre variables.

Así, el concepto de relación o correlación se refiere al grado de dependencia existente entre dos o más variables, (Santabárbara 2019). De esta forma, el coeficiente de correlación de Pearson es un coeficiente utilizado para medir la relación lineal entre dos variables cuantitativas. Es un coeficiente ampliamente utilizado por su facilidad de cálculo y de interpretación. Por otra parte, es necesario que la medida de la relación entre variables no esté influenciada por las diferentes unidades de medida de las mismas. Para ello, la fórmula del coeficiente de correlación de Pearson, para dos variables X e Y es como sigue:

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x * S_y} \quad (4.1)$$

Donde S_{xy} es la covarianza entre las variables X e Y , S_x y S_y son las desviaciones típicas de X e Y respectivamente. O lo que es lo mismo:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.2)$$

Los valores de r_{xy} varían entre -1 y 1, de manera que si $r_{xy} = 1$, existe una correlación positiva perfecta, es decir, si X aumenta, Y también lo hace, y al representar gráficamente los valores de la muestra de ambas variables se encuentran en una recta. Por el contrario, si $r_{xy} = -1$, existe una correlación negativa perfecta, de manera que si X aumenta, Y decrece. Si $r_{xy} = 0$, no existe correlación entre las variables. Si $0 < r_{xy} < 1$, se dice que existe correlación positiva, y si $-1 < r_{xy} < 0$, existe una correlación negativa.

Para poder interpretar la intensidad de la correlación entre variables para valores intermedios de r_{xy} , se puede usar la siguiente escala, (Santabárbara 2019):

- $-1 < r_{xy} < -0,7$, correlación negativa fuerte
- $-0,7 < r_{xy} < -0,3$, correlación negativa moderada
- $-0,3 < r_{xy} < 0$, correlación negativa débil
- $0 < r_{xy} < 0,3$, correlación positiva débil
- $0,3 < r_{xy} < 0,7$, correlación positiva moderada

- $0,7 < r_{xy} < 1$, correlación positiva fuerte

Además de calcular el coeficiente de correlación de Pearson, para determinar el grado o la intensidad de dependencia, también se debe calcular la significancia de los resultados obtenidos, (Rivas 1998), para acreditar que no es probable que éstos hayan sido debido al azar.

7. Aplicación del método de decisión.

Si se revisa la formulación del método VIKOR, la solución de compromiso (o conjunto de soluciones) es aquella que está más cerca de la solución ideal, y el compromiso viene determinado por las concesiones mutuas, de manera que la solución de compromiso es la que está determinada como función de utilidad de la mayoría. Para ello, según se indicó en el epígrafe correspondiente, para determinar la solución de compromiso se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se calcula el “mejor” y el “peor” valor de cada alternativa para cada uno de los criterios, de la siguiente forma:

$$f_j^* = \max_i a_{ij}; f_j^- = \min_i a_{ij} \quad \text{Si el criterio } j \text{ representa un beneficio}$$

$$f_j^- = \min_i a_{ij}; f_j^* = \max_i a_{ij} \quad \text{Si el criterio } j \text{ representa un coste}$$

2. Los valores S_i , R_i y Q_i son calculados para cada alternativa según las ecuaciones 3.16, 3.17 y 3.18:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j * (f_j^* - a_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)$$

$$R_i = \max_j [w_j * (f_j^* - a_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)]$$

Donde, w_j es el peso del criterio j .

$$Q_i = \frac{\vartheta(S_i - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1 - \vartheta)(R_i - R^*) / (R^- - R^*)$$

Siendo, $S^* = \min_i S_i$, $S^- = \max_i S_i$, $R^* = \min_i R_i$, $R^- = \max_i R_i$ y ϑ , representa el peso de la estrategia de la “mayoría de los criterios”, o “máxima utilidad de grupo”. El consenso es para un valor de $\vartheta=0,5$.

3. Se ordenan las diferentes alternativas según los valores S , R y Q . El resultado son tres listas de clasificación.

4. Se identifica como solución de compromiso la alternativa $A(1)$, que es la alternativa mejor clasificada según el valor de Q , es decir, la alternativa con menor valor de Q . Esto es así, si se cumplen las dos condiciones mencionadas:

- Condición 1: Ventaja aceptable.

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

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

La alternativa $A(1)$ también será la mejor clasificada de acuerdo con la lista de valores de S y/o R . Esta solución de compromiso es estable en un proceso de toma de decisiones.

Si no se cumple alguna de las condiciones, el método sugiere un conjunto de soluciones de compromiso, que puede consistir en: Alternativas $A(1)$ y $A(2)$, si no se cumple la condición 2; Alternativas $A(1), A(2), \dots, A(M)$, si no se cumple la condición 1; $A(M)$ se establecerá teniendo en cuenta la relación $Q(A(M)) - Q(A(1)) < DQ$.

Por lo tanto, como se ha comentado anteriormente, el método VIKOR utiliza las definiciones matemáticas de medidas de distancia para determinar la solución de compromiso como aquella que es la más cercana a la solución ideal. De manera que, el método VIKOR establece el valor S_i para cada alternativa i , a partir de la distancia de Manhattan, ecuación (3.7), en la que la distancia, entre dos elementos, es la suma de las diferencias de sus correspondientes componentes, o bien, la distancia entre dos puntos es la suma de las diferencias absolutas entre sus coordenadas. Por otra parte, la distancia Chebyshev entre dos vectores es la mayor diferencia en cualquiera de las coordenadas del espacio y viene dada por la ecuación (3.8). El método VIKOR utiliza la distancia de Chebyshev para determinar el valor R_i para cada alternativa i . Estas medidas de distancia, al igual que la distancia euclídea, que es la más común, no tienen en cuenta la correlación entre las variables para establecer la distancia entre elementos o vectores.

Por lo anteriormente expuesto, se propone una modificación del método VIKOR para tener en cuenta la correlación entre variables, utilizando la distancia de Mahalanobis, ecuación (3.10), para medir la distancia de cada alternativa a la solución ideal. El utilizar esta distancia permite considerar la correlación entre variables y además es independiente de la escala, aunque este efecto también se puede eliminar al normalizar la matriz de decisión.

En numerosas ocasiones, los criterios de selección que intervienen en los problemas de decisión de selección de alternativas de proyectos de infraestructuras están correlacionadas. A título de ejemplo, la disminución de emisiones de gases contaminantes, como CO_2 en el centro de la ciudad está directamente relacionada con el aumento de la demanda de usuarios de aparcamientos disuasorios que reducen la congestión del tráfico en el centro de las

ciudades. Por ello, y según la definición de la distancia de Mahalanobis, consideramos que para la selección o clasificación de alternativas sostenibles en proyectos de infraestructuras según el método VIKOR, esta metodología debe ser modificada para considerar la correlación entre variables. Por otra parte, al ser la distancia de Mahalanobis invariante a la escala, no sería necesaria la normalización de las variables. Por lo cual, se propone un método VIKOR modificado para la selección de alternativas en el caso de que exista correlación entre variables o criterios de selección.

Llegados a este punto, se plantea una cuestión, ¿se debe utilizar la distancia de Mahalanobis para el cálculo del valor de S ?, ¿O bien para el cálculo de R ?. Teniendo en cuenta que en el método VIKOR, el valor de S_i de la alternativa i viene dado como la suma de las “j-distancias” a la solución ideal del valor dicha alternativa i para cada criterio j , mientras que el valor R_i es el máximo de estas “j-distancias”. Esto se puede interpretar como que el valor S es un valor en el que intervienen todos los criterios, lo que hemos llamado “utilidad de la mayoría”, mientras que para el valor R se considera solo aquel criterio para el cual la alternativa i está más cerca de la solución ideal, independientemente del comportamiento (valor) de la alternativa i respecto al resto de los criterios. En la metodología propuesta en esta investigación, se modifica el método de VIKOR por la distancia de Mahalanobis al calcular el valor de S o de R , de forma alterna y se comparan los resultados. Para ello, se aplica la distancia de Mahalanobis, en lugar de la distancia de Manhattan, para el cálculo de S , es decir, para determinar la distancia de cada alternativa a la solución ideal, sin ser necesaria la normalización de los valores de la matriz de decisión, mientras que R se calcula según la distancia de Chebyshev, ecuación (3.17). De esta forma, los valores de S_i , para cada alternativa i , vendrán dados por la expresión:

$$S_i = \sqrt{\left[\left(\left(\vec{f}_p^* - \vec{A}_{ip} \right) \right)^T * \Sigma^{-1} * \left(\vec{f}_p^* - \vec{A}_{ip} \right) \right]} \quad (4.3)$$

Donde:

Σ es la matriz de covarianzas de la matriz de decisión,

$f_p^* = \{w_1 * f_1^*, w_2 * f_2^*, \dots, w_j * f_j^*, \dots, w_n * f_n^*\}^T$, la transpuesta del vector de la solución ideal ponderado, siendo $w = \{w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n\}$, el vector de pesos y n el número de criterios

$A_i = \{w_1 * a_{i1}, w_2 * a_{i2}, \dots, w_j * a_{ij}, \dots, w_n * a_{in}\}^T$, la transpuesta del vector de la valoración de la alternativa A_i , respecto a cada criterio de selección, ponderado.

Posteriormente, se aplica la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores de R , mientras que para el cálculo de S , se aplica la distancia de Manhattan como en el método de VIKOR tradicional, ecuación (3.16). Los valores de R_i , para cada alternativa i , vendrán dados por la siguiente expresión:

$$R_i = \sqrt{\left[\left(\left(\vec{f}_p^* - \vec{A}_{ip} \right) \right)^T * \Sigma^{-1} * \left(\vec{f}_p^* - \vec{A}_{ip} \right) \right]} \quad (4.4)$$

A continuación, en ambos casos, se calculan los valores Q_i , para un valor de $\vartheta = 0,5$ que indica un consenso entre la utilidad de la mayoría y el comportamiento individual de la alternativa más alejada de la solución ideal respecto a cada criterio. Por último, se comparan los resultados obtenidos. En ambos casos se considera la correlación entre las variables, pero en el primer caso, se tiene en cuenta el comportamiento individual y la utilidad de la mayoría en el cálculo de los valores de Q_i , mientras que en el segundo se prima en la decisión la utilidad de la mayoría, al ser, a su vez, los dos componentes de la suma que componen los valores de Q_i un sumatorio de la diferencia de las coordenadas de cada alternativa y las coordenadas de la solución ideal.

Por último, se obtendrán dos clasificaciones de las alternativas, según los valores Q_i . En una de las cuales, los valores S_i se calculan según la distancia de Mahalanobis, tal y como se ha indicado anteriormente. En el otro caso, los valores R_i se calculan aplicando la distancia de Mahalanobis, ecuación (4.4). A partir de aquí podremos establecer la alternativa con menor distancia a la solución ideal o el conjunto de soluciones de compromiso que dan solución al problema de decisión, si no se cumple alguna de las condiciones del método de VIKOR: condición 1, ventaja aceptable y condición 2, estabilidad aceptable.

En el anexo 1, se han incluido los algoritmos desarrollados en MATLAB® que permiten aplicar la metodología de forma sistemática y sencilla.

4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

4.2.1. SELECCIÓN DE TIPOLOGÍAS DE MUROS DE CONTENCIÓN

Para validar la metodología desarrollada y descrita en el epígrafe anterior, ésta es aplicada a dos casos de estudio diferentes. Por un lado, a la selección sostenible de tipologías de muros de contención, en proyectos de infraestructuras lineales, por el gran impacto medioambiental que tienen sobre el entorno, tanto por el impacto visual como de efecto barrera. Por otra parte, como se verá en el siguiente apartado, a la selección de la localización óptima con criterios de sostenibilidad de aparcamientos disuasorios en una gran ciudad como Madrid (España).

Es necesario destacar en primer lugar que, de las tipologías descritas en el capítulo anterior, muchas de ellas pueden ser diseñadas y construidas cumpliendo los requisitos del proyecto, sin embargo, la selección en ocasiones se realiza entre un grupo reducido de tipologías. Esto es así, ya que en el proceso de selección no se tienen en cuenta todas las alternativas posibles, es decir, todas aquellas soluciones o tipologías que cumplen las especificaciones de proyecto, sino un conjunto reducido de tipologías de acuerdo a unos factores como: la costumbre, el coste de construcción o, simplemente, por ser la tipología preferida del decisor, sin tener en cuenta otras alternativas que pueden ser más adecuadas en un proceso de decisión sistemático y con criterios de sostenibilidad.

En el caso de estudio de selección de tipologías de muros de contención, hay que indicar que la selección de la tipología adecuada estará condicionada por el proyecto de la propia infraestructura lineal en la cual se proyecta el muro, y especialmente, estará condicionada por el entorno. Es decir, no es lo mismo seleccionar la tipología más sostenible, en el caso de un muro de contención a diseñar y construir en una carretera existente de montaña en el entorno de un parque natural, que en una vía de circunvalación urbana en el entorno de una gran ciudad, o que en una vía rápida o autopista de nueva construcción sin condicionantes de tráfico existente.

En cualquier proceso de decisión, uno de los primeros pasos, y se podría decir que uno de los más importantes, es la identificación de los criterios de selección, es decir, aquellas especificaciones o requisitos que pueden determinar la solución óptima en el proceso de decisión. En capítulos anteriores, se ha descrito cómo debe realizarse esta identificación de criterios de sostenibilidad. De forma general, estos criterios pueden ser clasificados en cuatro grupos principales: económicos, ambientales, funcionales y sociales. Por las características especiales del proceso de decisión, para la selección de tipologías de muros de contención, en el cual los criterios de selección vienen determinados por la infraestructura lineal en la que se va a construir la estructura, los criterios de selección se han clasificado en los siguientes grupos: económicos, medioambientales, requisitos constructivos, condicionantes externos y características del suelo natural. Los tres últimos grupos se podrían englobar en un único grupo de criterios funcionales. A continuación, se incluye la descripción de estos criterios:

Tabla 4.1. Criterios de selección de tipologías de muros de contención

<i>Grupo</i>	<i>Criterio</i>	<i>Tipo</i>	<i>Relevancia</i>	<i>Objetivo</i>
Económicos	Costes de construcción	Cuantitativo	Alta	Minimizar
Económicos	Necesidades de mantenimiento y conservación	Cualitativo/cuantitativo	Alta	Minimizar
Medioambientales	Ruidos y vibraciones durante la construcción	Cuantitativo	Media	Minimizar
Medioambientales	Residuos de construcción y demolición	Cuantitativo	Alta	Minimizar
Medioambientales	Integración paisajística	Cualitativo	Alta	Maximizar
Medioambientales	Consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero (ciclo de vida)	Cuantitativo	Alta	Minimizar
Requisitos constructivos	Rendimiento de construcción	Cuantitativo	Alta	Maximizar
Requisitos constructivos	Elementos en el interior del suelo: bolos, gravas, escombros	Cualitativo	Baja	Minimizar
Requisitos constructivos	Perturbaciones en la superficie	Cualitativo	Baja	Minimizar
Requisitos constructivos	Maquinaria y equipos especializados	Cualitativo	Media	Minimizar
Requisitos constructivos	Espacio disponible para acopio de materiales	Cuantitativo	Media	Maximizar
Requisitos constructivos	Disponibilidad de materiales	Cuantitativo	Media	Maximizar
Condicionantes externos	Dimensiones muro de contención	Cuantitativo	Media	Minimizar
Condicionantes externos	Espacio disponible en la base del muro	Cuantitativo	Media	Maximizar
Condicionantes externos	Restricciones de tráfico	Cualitativo	Media	Minimizar
Condicionantes externos	Servicios públicos afectados	Cualitativo	Media	Minimizar
Condicionantes externos	Espacio disponible para acceso de la maquinaria	Cualitativo	Media	Maximizar
Condicionantes externos	Asentamientos permisibles	Cuantitativo	Media	Minimizar
Condicionantes externos	Sobrecargas	Cuantitativo	Media	Minimizar
Condicionantes externos	Sismicidad	Cuantitativo	Media	Minimizar
Condicionantes externos	Permeabilidad	Cuantitativo	Media	Maximizar
Condicionantes externos	Apariencia estética	Cualitativo	Baja	Maximizar
Condicionantes externos	Cultura y costumbre	Cualitativo	Alta	Maximizar
Características del terreno natural	Densidad del material retenido	Cuantitativo	Media	Maximizar
Características del terreno natural	Presión agua intersticial	Cuantitativo	Media	Minimizar
Características del terreno natural	Resistencias, ángulo de rozamiento interno	Cuantitativo	Media	Maximizar

Fuente: Elaboración propia

Para validar la metodología de forma sencilla, en un primer caso de estudio, se aplicará a la selección de tipologías de muros de contención entre cuatro tipologías y según los siete criterios de selección con relevancia alta. Se consideran como alternativas cuatro de las tipologías incluidas en la tabla 3.8: muro de hormigón armado, muro jardinera de bloques de hormigón, muro vegetal reforzado con geomalla y muro de escollera. Se han elegido estas tipologías al ser las más representativas de los diferentes grupos de tipos de muros. Se toman como criterios determinantes en el proceso de decisión los de relevancia alta, desde un punto de vista de desarrollo sostenible de infraestructuras, es decir, los siguientes: coste de construcción (€/m²), rendimiento de construcción (m/día), integración paisajística, cultura,

entendida ésta como frecuencia de construcción, residuos de construcción y demolición, emisiones de gases de efecto invernadero y, por último, necesidades de conservación y mantenimiento.

Se considera que los diferentes muros de contención tienen una altura media de cuatro metros. Para la aplicación de la metodología de decisión se realizan las siguientes hipótesis:

- Todos los muros definidos son estructuralmente estables.
- No se consideran condicionantes logísticos, como disponibilidad de materiales o espacio disponible para acopios.
- El sistema de drenaje funciona correctamente en todos los casos.

Para las valoraciones de cada alternativa, respecto a los criterios cuantitativos, así como para la definición de las secciones estructuralmente resistentes se han seguido las recomendaciones de proveedores, (Polyfelt Geosynthetics 2010), del Ministerio de Fomento del Gobierno de España, (Ministerio de Fomento. Gobierno de España 1999), (Ministerio de Fomento. Gobierno de España 2006b), de la web de ©CYPE Ingenieros, S.A., (CYPE Ingenieros n.d.) así como las realizadas por proyectistas y contratistas consultados al efecto. A continuación, se incluye el cálculo de la valoración de cada alternativa respecto a cada uno de los criterios de selección, que servirán para obtener la matriz de decisión:

1. *Coste de construcción.*

Para el cálculo del coste de construcción se tiene en cuenta: el coste de materiales, el coste de la mano de obra y los costes complementarios. De esta forma, se obtienen los siguientes costes, según las fuentes consultadas e indicadas anteriormente:

	<i>Muro de gravedad</i>	<i>Muro jardinera</i>	<i>Muro vegetal</i>	<i>Muro de escollera</i>
<i>Coste (€/m²)</i>	870,00	640,00	430,00	608,00

2. *Rendimiento de construcción.*

Para el cálculo del rendimiento de construcción se ha tenido en cuenta los rendimientos de la maquinaria empleada, obteniéndose los siguientes rendimientos según las fuentes consultadas e indicadas anteriormente:

	<i>Muro de gravedad</i>	<i>Muro jardinera</i>	<i>Muro vegetal</i>	<i>Muro de escollera</i>
<i>Rendimiento (m/día)</i>	1,50	2,48	2,75	2,80

3. *Integración paisajística.*

Este criterio es un criterio cualitativo, por lo cual, para calcular la valoración de cada alternativa según este criterio, es necesario aplicar la metodología descrita en el epígrafe anterior. Por comparaciones pareadas y según la escala de Saaty del método AHP, se puede determinar, cuánto mejor es una alternativa respecto a otra, respecto a este criterio. Calculando el vector propio de la matriz de comparaciones obtenemos la valoración de cada alternativa respecto a ese criterio. Por otra parte, es necesario recordar que el método AHP

permite determinar la coherencia de los juicios emitidos a través del índice de Proporción de Consistencia, también llamado Ratio de Consistencia, que se expresa como el cociente entre el Índice de Consistencia y el Índice Aleatorio, y que debe ser inferior al 10%. Se ha obtenido el Índice de Consistencia, a partir de la matriz de comparaciones, según la ecuación (3.3). El Índice Aleatorio se obtiene de la tabla 3.4, según el rango de la matriz de comparaciones.

De esta forma, y teniendo en cuenta lo comentado, se determina la matriz de comparaciones pareadas, como sigue:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 1/9 & 1/7 \\ 5 & 1 & 1/5 & 1/3 \\ 9 & 5 & 1 & 3 \\ 7 & 3 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

Se ha obtenido, un Ratio de Consistencia de 0,0632, inferior al 10%, por lo que se puede concluir que son aceptables los juicios emitidos. Finalmente, la valoración de cada alternativa, respecto al criterio cualitativo de integración paisajística, obtenida a partir del vector propio de la matriz de comparaciones, es la siguiente:

	<i>Muro de gravedad</i>	<i>Muro jardinera</i>	<i>Muro vegetal</i>	<i>Muro de escollera</i>
<i>Integración paisajística</i>	0,0417	0,2046	0,4381	0,3156

4. Cultura y costumbre.

Este criterio es un criterio cualitativo, por lo cual, al igual que en el caso anterior para calcular la valoración de cada alternativa según este criterio, es necesario calcular la matriz de comparaciones pareadas y el vector propio de la misma:

$$\begin{pmatrix} 1 & 5 & 9 & 3 \\ 1/5 & 1 & 4 & 2 \\ 1/9 & 1/4 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 1/2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

Obteniéndose, un Ratio de Consistencia de 0,0935, por lo cual inferior a 0,10, siendo aceptables los juicios emitidos, y por último, la valoración de cada alternativa respecto al criterio cualitativo de cultura, obtenida a partir del vector propio de la matriz de comparaciones, es la siguiente:

	<i>Muro de gravedad</i>	<i>Muro jardinera</i>	<i>Muro vegetal</i>	<i>Muro de escollera</i>
<i>Cultura/costumbre</i>	0,5390	0,2492	0,0547	0,1571

5. Residuos de construcción y demolición.

La valoración de cada alternativa, respecto a este criterio, se realiza a partir de la estimación de la cantidad de residuos de construcción y demolición correspondientes a la construcción de un m² de paramento frontal, para cada tipología de muro de contención,

contempladas como alternativas. En la siguiente tabla 4.2 se incluye la estimación de la generación de residuos de construcción y demolición para cada tipología.

Tabla 4.2. Estimación residuos de construcción y demolición por tipologías de muros de contención

Código LER	RCD	Muro Hormigón Armado		Muro Jardinera		Muro Vegetal		Muro de Escollera	
		Peso (kg)	Volumen (l)	Peso (kg)	Volumen (l)	Peso (kg)	Volumen (l)	Peso (kg)	Volumen (l)
17 04 05	Hierro y acero	1,175	0,558			0,086	0,041		
17 02 03	Plástico	0,008	0,014						
17 01 01	Hormigón (hormigones, morteros y prefabricados).	16,506	11,004	77,657	51,770				
01 04 08	Residuos de grava y rocas trituradas			54,283	36,188				
15 01 01	Envases de papel y cartón.	1,191	1,589						
17 02 01	Madera.	0,021	0,019	5,480	4,983				
17 02 03	Plástico			0,335	0,557	0,026	0,043		
04 02 22	Residuos de fibras textiles (geotextil)					0,017	0,028		
01 04 13	Residuos del corte y serrado de piedra							100,403	66,934
		18,902	13,184	137,755	93,498	0,129	0,112	100,403	66,934

Fuente. Elaboración propia

6. Emisiones de gases de efecto invernadero.

Para calcular la estimación de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), de cada tipología de muro de contención, se determina, para cada alternativa, el dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) que es el indicador para valorar el impacto de las emisiones de GEI. Para la valoración de alternativas respecto a este criterio, se toma esta medida (kg CO₂ eq) debido a que los gases que se indican en el Protocolo de Kioto, (Naciones Unidas 2008) como máximos responsables del efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global, son: el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido de nitrógeno (N₂O), los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC), el hexafluoruro de azufre (SF₆) y, desde 2013, el trifluoruro de nitrógeno (NF₃), (Naciones Unidas 2013). Sin embargo, el CO₂ es el GEI que influye en mayor medida en el calentamiento del planeta, y es por ello por lo cual se adopta la medida de kg CO₂ eq, para medir el potencial calentamiento global.

Para determinar la cantidad de kg CO₂ eq se multiplica cada actividad por su factor de emisión. El dato de actividad es un parámetro que define el grado o nivel de la actividad generadora de las emisiones de GEI (por ejemplo, kWh de combustible), mientras que el factor de emisión indica los GEI emitidos por la unidad de la actividad analizada, y que se expresan en kg CO₂ equivalente. De esta forma, para cada tipología identificamos las actividades diferenciadoras en cada una ellas y posteriormente calculamos la huella de carbono medida en Kg CO₂ equivalente. Para ello, se ha seguido la metodología y la aplicación informática hueCO₂ desarrollada por Tecniberia, Asociación Española de Empresas de Ingeniería, Consultoría y

Servicios Tecnológicos, y la Fundación Biodiversidad del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, (Tecniberia and Biodiversidad n.d.).

Antes del cálculo de los kg de CO₂ eq, es necesario definir el concepto de “alcance. Este concepto ayuda a delimitar las fuentes de emisiones directas e indirectas, (Ranganathan et al. 2010). Así pues, las emisiones de alcance 1, serán las emisiones directas GEI, y que comprenden todas las emisiones generadas en el lugar de actividad, de manera directa; las emisiones de alcance 2, emisiones indirectas de GEI asociadas a la electricidad, incluye las emisiones de la generación de electricidad adquirida y consumida por la empresa; por último las emisiones de alcance 3, otras emisiones indirectas, comprende las emisiones generadas por bienes y servicios consumidos (productos entrantes, desplazamiento del personal, gestión de residuos, etc.).

Como se ha comentado, para determinar la valoración de cada alternativa solo se consideran aquellas actividades y medición de las mismas, que son diferentes entre ellas, por ejemplo, no se considera las emisiones debidas al consumo de energía eléctrica en instalaciones auxiliares de obra, al ser despreciables las diferencias entre una alternativa y otra. La estimación de las emisiones, de cada alternativa, se realiza por m² de paramento frontal de cada tipología.

Tabla 4.3. Estimación emisiones de kg CO₂ eq para tipología de muro de hormigón armado

Muro Hormigón Armado							
Materiales							
Descripción	Ud.	Cantidad	Fuente emisión	Alcance	FE	Unidades	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Hormigón HA-30	m ₃	0,90	Fabricación	3		282,00 kg CO ₂ eq/m ³	253,80
Hormigón HA-30	h	1,50	Transporte (camión 6-9 m ₃)	3		25,946 kg CO ₂ eq/h	5,84
Hormigón HA-30	l	1,00	Producción diesel	3		0,248 kg CO ₂ eq/l	0,248
Acero en barras corrugadas B 500 S	Kg	142,62	Fabricación	3		1400,00 kg CO ₂ eq/t	199,67
Acero en barras corrugadas B 500 S	kg	142,62	Transporte	3		0,122 kg CO ₂ eq/t*km	1,74
Acero en barras corrugadas B 500 S	l	0,50	Producción diesel	3		0,248 kg CO ₂ eq/l	0,124
Equipos y maquinaria							
Descripción	Ud.	Cantidad	Fuente emisión	Alcance	FE	Unidades	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Bomba para hormigonar	h	0,50		1		40,05 kg CO ₂ eq/h	20,03
TOTAL							481,45

Fuente. Elaboración propia

Tabla 4.4. Estimación emisiones de kg CO₂ eq para tipología de muro jardinera

Muro Jardinera							
Materiales							
Descripción	Ud.	Cantidad	Fuente emisión	Alcance	FE	Unidades	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Hormigón HA-25 cimentación	m ₃	0,20	Fabricación	3		282,00 kg CO ₂ eq/m ³	56,40
Hormigón HA-25 cimentación	h	1,50	Transporte (camión 6-9 m ₃)	3		25,946 kg CO ₂ eq/h	1,30
Hormigón HA-25 cimentación	l	1,00	Producción diesel	3		0,248 kg CO ₂ eq/l	0,248
Acero en barras corrugadas B 500 S	Kg	5,00	Fabricación	3		1400,00 kg CO ₂ eq/t	7,00
Acero en barras corrugadas B 500 S	kg	5,00	Transporte	3		0,122 kg CO ₂ eq/t*km	0,06
Acero en barras corrugadas B 500 S	l	0,50	Producción diesel	3		0,248 kg CO ₂ eq/l	0,124
Bloques hormigón	Ud.	14,00	Fabricación	3		282,00 kg CO ₂ eq/m ³	108,37
Bloques hormigón	Ud.	14,00	Transporte	3		0,122 kg CO ₂ eq/t.km	11,72
Bloques hormigón	l	1,00	Producción diesel	3		0,248 kg CO ₂ eq/l	0,248
Equipos y maquinaria							
Descripción	Ud.	Cantidad	Fuente emisión	Alcance	FE	Unidades	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Dumper descarga frontal 2 t carga útil	h	0,30		1		6,68 kg CO ₂ eq/h	2,00
Bandeja vibrante 3,7 kW 90 kg	h	2,20		1		40,05 kg CO ₂ eq/h	88,11
TOTAL							275,59

Fuente. Elaboración propia

Tabla 4.5. Estimación emisiones de kg CO₂ eq para tipología de muro vegetal

Muro Vegetal							
Materiales							
Descripción	Ud.	Cantidad	Fuente emisión	Alcance	FE	Unidades	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Geomalla	m ₂	45,00	Fabricación	3		3,858 (*) kg CO ₂ eq/m ₂	173,61
Malla electrosoldada ME 15x15 Ø6 B 500	kg	3,44	Fabricación	3		1400,00 kg CO ₂ eq/t	4,82
Malla electrosoldada ME 15x15 Ø6 B 500	kg	3,44	Transporte	3		0,122 kg CO ₂ eq/t.km	0,42
Malla electrosoldada ME 15x15 Ø6 B 500	l	0,30	Producción diesel	3		0,248 kg CO ₂ eq/l	0,07
Equipos y maquinaria							
Descripción	Ud.	Cantidad	Fuente emisión	Alcance	FE	Unidades	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Grúa telescópica autoprop. 25 t.	h	0,20		1		53,4 kg CO ₂ eq/h	10,68
TOTAL							189,61

(*) FE facilitado por el proveedor, (Anon n.d.).

Fuente. Elaboración propia

Tabla 4.6. Estimación emisiones de kg CO₂ eq para tipología de muro de escollera

Muro Escollera							
Materiales							
Descripción	Ud.	Cantidad	Fuente emisión	Alcance	FE	Unidades	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Bloque piedra caliza	t	3,10	Transporte	3		0,122 kg CO ₂ eq/t.km	18,91
Bloque piedra caliza	l	1,10	Producción diesel	3		0,248 kg CO ₂ eq/l	0,26
Equipos y maquinaria							
Descripción	Ud.	Cantidad	Fuente emisión	Alcance	FE	Unidades	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Retroexcavadora sobre cadenas, de 118 kW, con pinza para escollera.	h	1,20		1		41,76 kg CO ₂ eq/h	50,11
TOTAL							69,28

Fuente. Elaboración propia

7. Coste de mantenimiento anual.

La valoración de cada alternativa respecto a este criterio se realiza a partir del coste de construcción por m² de paramento frontal para cada tipología de muro de contención, según las fuentes consultadas indicadas anteriormente. Se obtienen los siguientes costes anuales de mantenimiento, por m² de paramento frontal de cada tipología.

	<i>Muro de gravedad</i>	<i>Muro jardinera</i>	<i>Muro vegetal</i>	<i>Muro de escollera</i>
<i>Coste de mantenimiento anual (€)</i>	1,20	8,93	54,20	5,55

Según las estimaciones realizadas anteriormente, la matriz de decisión, sin normalizar, que incluye la valoración de cada alternativa respecto a cada uno de los criterios de selección es la siguiente:

Tabla 4.7. Matriz de decisión tipologías de muros de contención

	Coste construcción (€)	Rendimiento construcción (m/d)	Integración paisajística	Cultura y costumbre	Residuos RCD (volumen litros)	Emisiones GEI (kg CO₂ eq)	Coste mantenimiento anual (€)
Muro de Hormigón Armado	870,00	1,50	0,0417	0,5390	13,184	481,45	1,20
Muro Jardinera	640,00	2,48	0,2046	0,2492	93,498	275,59	8,93
Muro Vegetal	430,00	2,75	0,4381	0,0547	0,112	189,61	54,20
Muro de Escollera	608,00	2,80	0,3156	0,1571	66,934	69,28	5,55

Fuente. Elaboración propia

4.2.2. SELECCIÓN DE APARCAMIENTOS DISUASORIOS

Como se ha indicado en capítulos anteriores, para validar la metodología desarrollada, ésta se aplica a dos casos de estudio diferentes. Por un lado, el caso anterior de la selección sostenible de tipologías de muros de contención en proyectos de infraestructuras lineales. Por otra parte, y como segundo caso de estudio, a la selección de la localización óptima con criterios de sostenibilidad, de aparcamientos disuasorios en una gran ciudad como Madrid (España). Para ello se estudia la localización óptima, con criterios de sostenibilidad de 12 aparcamientos disuasorios proyectados en el Programa de Aparcamientos Disuasorios de la ciudad de Madrid, (Ayuntamiento de Madrid 2016).

Se ha elegido Madrid por sus condiciones particulares de territorialidad marcadas por: el sistema radial de carreteras y por la intensidad diaria de tráfico. Madrid, capital de España, con tres millones de habitantes es la ciudad más poblada del país y una de las capitales más pobladas de Europa. Además, Madrid recibe diariamente más de dos millones de visitantes (Ayuntamiento de Madrid 2018a). La población de la capital representa un 7% de la población total del país, sin embargo, con una superficie de 606 km² abarca menos del 1% del territorio nacional, (Siemens plc 2017). Con el objeto de ser un referente en relación con un modelo de crecimiento sostenible, para España y para el resto de Europa, en los últimos años ha aprobado y establecido una serie de medidas para reducir la contaminación, (Ayuntamiento de Madrid 2014), (Ayuntamiento de Madrid 2017b), (Ayuntamiento de Madrid 2018a), (Ayuntamiento de Madrid 2018c), (Ayuntamiento de Madrid 2021).

Según datos del Inventario de Emisiones Contaminantes a la Atmósfera del Ayuntamiento de Madrid, en 2014, el transporte por carretera fue el responsable del 31 % de las emisiones de gases efecto invernadero en Madrid, (Siemens plc 2017). Si consideramos las emisiones producidas, por todo el sistema de transporte, el valor asciende al 41%, cifra superior a otras ciudades europeas como Helsinki (34%) o Copenhague (20%), (Siemens plc 2017). Por gases contaminantes, el 51 % de las emisiones de NO_x procedieron del tráfico rodado, así como el 61% de las partículas PM₁₀. Se define el parámetro PM₁₀ como “la masa de partículas que pasan a través de un cabezal de tamaño selectivo para un diámetro aerodinámico de 10 µm con una eficiencia de corte del 50 %”. Esta definición está incluida en la Directiva Europea 1999/30 de 22 de abril de 1999, relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente, (European Council 1999). De igual forma, corresponden al tráfico rodado el 55 % de las emisiones de PM_{2,5} (European Council 1999), y el 55% de las emisiones de monóxido de carbono (CO), (Ayuntamiento de Madrid 2017b).

Los altos niveles de emisiones contaminantes en Madrid, producidos por el transporte, se deben en gran medida al transporte privado. El 81,2% de los recorridos que se producen en el municipio se realizan en turismos. En la zona centro, este porcentaje es de un 72,6%, (Ayuntamiento de Madrid 2017b), cifra algo inferior pero en cualquier caso muy alta. El Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, (Gobierno de España 2011), fija el valor del umbral de alerta para el dióxido de nitrógeno en 400 µg/m³ durante tres horas consecutivas en lugares representativos de la calidad del aire, en un área de al menos 100 km² o en una zona o aglomeración completa, si la superficie de esta última es menor. También establece un valor límite anual de 40 µg /m³ y un valor límite horario para la protección de la salud de dióxido de nitrógeno de 200 µg /m³ que no debe superarse más de 18 horas al año en ninguna de las estaciones de la red. Sin embargo, estos valores umbrales han sido superados de forma reiterada desde el año 2010, (Ayuntamiento de Madrid 2018c).

Durante los últimos años se han registrado varios episodios de contaminación con altos niveles de dióxido de nitrógeno que han dado lugar, en algún caso, a la activación del Protocolo de medidas a adoptar durante episodios de alta contaminación por dióxido de nitrógeno, recomendando especialmente la utilización del transporte público y aplicando diversas restricciones tales como la disminución de la velocidad máxima en la M-30, autopista de circunvalación exterior a la ciudad, a 70 km/h y la prohibición de estacionamiento en las plazas azules de la Zona de Estacionamiento Regulado en la zona de la ciudad interior de dicha vía. Esta situación ha obligado a establecer un plan de acciones para tratar el problema de forma global, (Ayuntamiento de Madrid 2017b), y así como medidas de aplicación puntual para frenar la emisión de gases contaminantes, (Ayuntamiento de Madrid 2018a). Entre estas medidas, destaca una sobre las demás por el impacto que ha supuesto en la opinión pública: la creación de una zona de bajas emisiones (ZBE) denominada “Madrid Central”, que ha supuesto la limitación o prohibición de acceso a vehículos privados a la zona centro de la ciudad en función del carácter contaminante de cada vehículo que, a su vez, depende del tipo de combustible que utiliza el vehículo y de la antigüedad del mismo. Recientemente, esta medida ha sido

anulada por el Tribunal Superior de Justicia de Madrid (TSJM) por defectos formales, y se ha redactado un nuevo plan estratégico conocido como “Madrid 360”, (Ayuntamiento de Madrid. Area de Gobierno Medio Ambiente y Movilidad 2019), aprobado recientemente en septiembre de 2021, (Ayuntamiento de Madrid 2021).

El plan “Madrid 360” prevé reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno un 15% más de lo que se proponía en plan anterior. El objetivo es una reducción del 20% de los NO_x en 2023. En base al contexto anterior, entre las medidas más destacadas, y vinculadas con esta investigación, se encuentran las siguientes:

- Se mantienen las restricciones de acceso al centro para los vehículos más contaminantes, con los siguientes hitos temporales:
 - Prohibido el estacionamiento a vehículos de categoría A, según la calificación ambiental de los vehículos, (Ministerio de la Presidencia. Gobierno de España 2018). A partir del 1 de enero de 2020, dentro de la almendra central excepto para residentes de un mismo barrio.
 - Prohibido el acceso y circulación por la zona dentro de la M-30. A partir del 1 de enero de 2022 para vehículos A no residentes en la ciudad.
 - Prohibido circular por toda la M-30 y vías de circunvalación. A partir del 1 de enero de 2023 para vehículos A no residentes en Madrid.
 - Prohibido circular por toda la ciudad. A partir del 1 de enero de 2025 para ningún vehículo A, residente o no residente en Madrid.
- Para facilitar la movilidad por el centro en transporte público, se ha puesto en marcha la Línea Cero de autobuses, autobuses de cero emisiones que dan servicio gratuito por el distrito Centro y alrededores.
- Se van a construir 15.000 nuevas plazas de aparcamiento, 10.000 en 14 aparcamientos disuasorios y 5.000 en plazas de rotación y residentes.

Pero como el mismo plan indica, para garantizar la efectividad de la estrategia de reducir las emisiones, ésta debe estar enmarcada en un plan de acciones que contemple otras como el fomento del transporte público y el establecimiento de una red de aparcamientos disuasorios. En relación con esto, el Plan de Calidad del Aire y Cambio Climático de la Ciudad de Madrid, (Ayuntamiento de Madrid 2017b), ya establecía como medida número 8 el desarrollo de una red de aparcamientos intermodales en la corona metropolitana.

Por otra parte, si se consideran las horas perdidas en desplazamientos en vehículo privado debido a la congestión, Madrid es la ciudad de España con mayor número de horas perdidas al año. El tiempo medio perdido por cada usuario es de 14 minutos al día, equivalente a 57,4 horas al año. Este tiempo equivale a 7 días de vacaciones cada año y es solo algo inferior

al tiempo perdido por absentismo laboral por trabajador en España, que es de 67 horas al año, (RACC 2009).

Actualmente en la Comunidad de Madrid, hay 45 aparcamientos ligados al transporte público en las principales vías de la región. En el término municipal de Madrid hay 22 aparcamientos disuasorios, aunque algunos de ellos no están funcionando como aparcamiento intermodal o disuasorio como tal, sino como aparcamiento público de tarifa. El Programa de Aparcamientos Disuasorios, incluido en el Plan de Calidad del Aire y Cambio Climático de la Ciudad de Madrid de 2017, contempla la construcción y/o explotación de 12 aparcamientos disuasorios en la ciudad de Madrid en diferentes corredores de entrada. Actualmente, de estos 12 aparcamientos solo se encuentra construido uno de ellos, el aparcamiento de Estadio Olímpico, junto al estadio de fútbol Wanda Metropolitano propiedad del Club Atlético de Madrid. En su momento no funcionaba como aparcamiento disuasorio sino como aparcamiento de tarifa, sin embargo, es a partir de 2020 cuando su uso como aparcamiento está ligado el transporte intermodal, salvo los días de partido en el estadio de fútbol. El segundo caso de estudio, para validar la metodología desarrollada, es la aplicación a la obtención de una clasificación con criterios de sostenibilidad de los aparcamientos disuasorios incluidos en el Programa de Aparcamientos Disuasorios que se encuentra recogido en el Plan de Calidad del Aire y Cambio Climático de la Ciudad de Madrid de 2017.

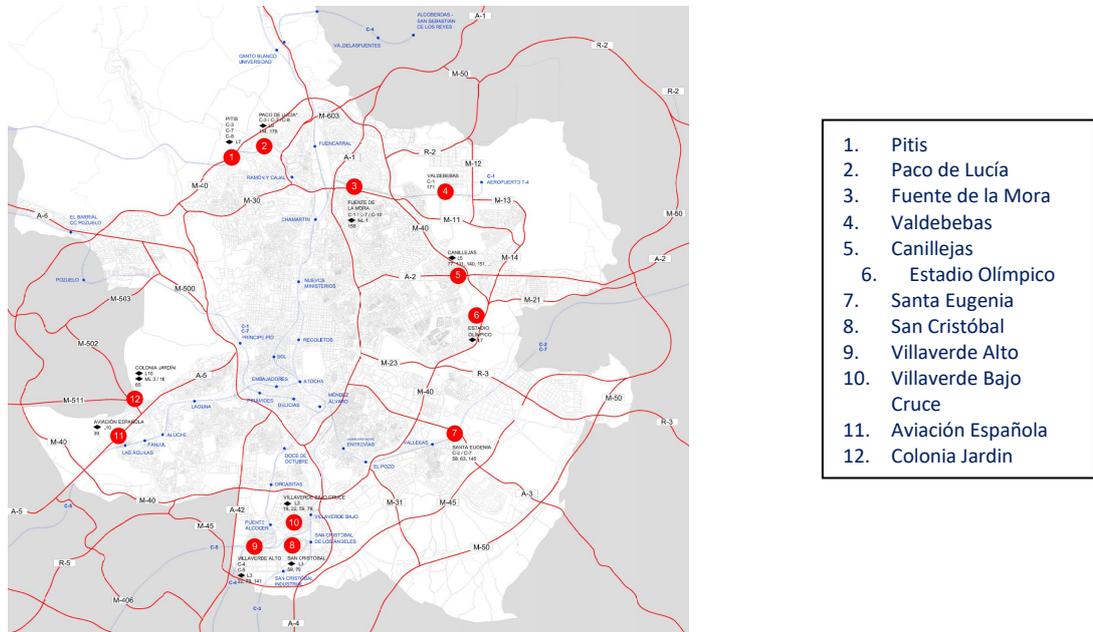
En la tabla 4.8 se incluyen las características principales de estos 12 aparcamientos disuasorios que son analizados para obtener una clasificación sostenible de los mismos a partir de la aplicación de la metodología de decisión descrita anteriormente. De cada aparcamiento, se incluyen los siguientes datos: el distrito de la localización, tipología, corredor de entrada, intermodalidad con otros medios de transporte públicos y número de plazas previstas. En la figura 4.2 se localiza geográficamente cada alternativa.

Tabla 4.8. Aparcamientos disuasorios en la ciudad de Madrid. Programa de Aparcamientos Disuasorios

Alternativa	Distrito	Tipología	Número plazas	Corredor entrada	Intermodalidad		
					Bus	Cercanías	Metro
Pitis	Fuencarral – El Pardo	Superficie	400	M-40	SI	SI	SI
Paco de Lucía	Fuencarral – El Pardo	Superficie	185	M-40	SI	SI	SI
Fuente de la Mora	Hortaleza	Superficie	330	M-40	SI	SI	SI
Valdebebas	Barajas	Superficie	600	M-11	SI	SI	NO
Canillejas	Hortaleza	Estructura + bajo rasante	537	A-2	SI	NO	SI
Estadio Olímpico	San Blas	Superficie	1510	A-2	NO	NO	SI
Santa Eugenia	Vallecas Villa	Superficie	307	A-3	SI	SI	NO
San Cristóbal	Villaverde	Superficie	500	A-4	SI	NO	SI
Villaverde Alto	Villaverde	Superficie	375	A-42	SI	SI	SI
Villaverde Bajo Cruce	Villaverde	Bajo rasante	648	A-4	SI	NO	SI
Aviación Española	Latina	Superficie	750	A-5	SI	SI	SI
Colonia Jardín	Latina	Bajo rasante	1000	M-502 M-511	SI	NO	SI

Fuente: Programa de Aparcamientos Disuasorios. Plan de Calidad del Aire y Cambio Climático de la Ciudad de Madrid (2017)

Figura 4.2. Localización de aparcamientos disuasorios.



Fuente: Programa de Aparcamientos Disuasorios de Madrid, 2017.

Para la evaluación de la sostenibilidad del conjunto de alternativas se ha establecido un sistema de 18 criterios pertenecientes a 4 grupos: medioambientales, económicos, funcionales y sociales. A continuación, en la tabla 4.9, se incluye: la definición de cada criterio de selección, unidad de medida y objetivo a lograr, maximizar si es un índice de beneficio, o minimizar si por el contrario es un índice de coste. Con posterioridad, cada alternativa es valorada según los criterios de sostenibilidad seleccionados. Para ello, se han utilizado diferentes bases de datos y fórmulas de cálculo que se detallan para cada caso y criterio.

Tabla 4.9. Criterios de selección para la evaluación sostenible de aparcamientos disuasorios

Grupo	Criterio	Descripción	Unidad de medida	Objetivo
Medioambiental	Reducción emisiones CO ₂ (C1)	Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero CO ₂ en el centro debido a los vehículos privados que como usuarios de aparcamiento disuasorios dejan de acceder al centro	Kg	Maximizar
Medioambiental	Reducción emisiones NO _x (C2)	Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero NO _x en el centro debido a los vehículos privados que como usuarios de aparcamientos disuasorios dejan de acceder al centro	Kg	Maximizar

Material es y métodos

Medioambiental	Eficiencia energética (C3)	Disminución consumo combustible, ahorro en toneladas equivalentes de petróleo por los km no recorridos por los vehículos usuarios de aparcamientos disuasorios	Toneladas	Maximizar
Medioambiental	Emisiones CO ₂ explotación aparcamiento disuasorio (C4)	Toneladas al año de emisiones de gases de efecto invernadero CO ₂ durante la explotación de aparcamientos disuasorios debido al consumo de energía, iluminación y ventilación el caso de aparcamiento bajo rasante	Toneladas	Minimizar
Medioambiental	Ocupación suelo (C5)	Superficie de la parcela de aparcamiento disuasorio	m ²	Minimizar
Medioambiental	Suelo no ocupado en aparcamiento en el centro (C6)	Superficie de aparcamientos en vía pública que deja de ocuparse en el centro por el uso de aparcamientos disuasorios	m ²	Maximizar
Económico	Coste de construcción (C7)	Estimación de los costes de construcción de aparcamientos disuasorios	€	Minimizar
Económico	Coste del suelo (C8)	Estimación del coste del suelo sobre el que se construye aparcamiento disuasorio, a partir del precio medio de mercado del suelo en las proximidades del aparcamiento	€	Minimizar
Económico	Costes anuales de explotación (C9)	Estimación de los costes anuales de explotación de aparcamiento disuasorio, incluyendo gastos corrientes de agua, luz y personal.	€	Minimizar
Funcional	Dimensiones (C10)	Número de plazas en aparcamiento disuasorio	Número de plazas	Maximizar
Funcional	Población (C11)	Número de habitantes en la zona residencial adyacente y municipios cercanos en corredor de entrada de aparcamiento disuasorio	Número de habitantes	Maximizar
Funcional	Demanda (C12)	Estimación de la demanda prevista de ocupación de aparcamiento disuasorio	Número de plazas ocupadas	Maximizar
Funcional	Tráfico (C13)	Intensidad del tráfico en corredor de entrada en el que está localizado aparcamiento disuasorio, medida en IMD – Intensidad Media Diaria – número de vehículos que circulan de media en un día en el corredor de entrada	Número de vehículos	Maximizar
Funcional	Congestión (C14)	Pérdida media de tiempo al día por congestión de tráfico en el corredor de entrada en el que está localizado aparcamiento disuasorio	Minutos	Maximizar
Funcional	Intermodalidad (C15)	Índice establecido a partir del número de líneas de trenes de cercanías, líneas de metro y líneas de autobuses de posible conexión para usuarios de aparcamiento disuasorio	Adimensional	Maximizar
Funcional	Proximidad carril-bici (C16)	Distancia a la red de carriles bici de la Ciudad de Madrid	Metros	Minimizar
Social	Accidentalidad (C17)	Índice de Peligrosidad que mide la accidentalidad en el corredor de entrada en el que está localizado aparcamiento disuasorio en función del número de accidentes y la IMD	Adimensional	Maximizar
Social	Calidad de vida (C18)	Percepción de los usuarios de aparcamientos disuasorios de mejora en la calidad de vida medida como ahorro del tiempo en el trayecto expresado en términos monetarios	€	Maximizar

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detalla cómo se valora cada alternativa en relación con los criterios indicados:

Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (C1 y C2).

La obtención de los valores de cada alternativa respecto a los subcriterios medioambientales de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), C1 y C2, se ha realizado según la Guide of European Environment Agency, (European Environment Agency 2012). En esta guía, se establece una clasificación del parque de vehículos según el tipo de combustible y la tecnología, la cual está directamente relacionada con la antigüedad. De esta forma, se estiman las emisiones de GEI por km recorrido, teniendo en cuenta además otros factores como la velocidad o, si es en entorno urbano o interurbano.

Las características de los vehículos, que circulan por la ciudad de Madrid y anillos de circunvalación, se han obtenido del “Informe del parque circulante en la ciudad de Madrid”. En este informe se realiza un estudio completo del parque de vehículos que circulan por la ciudad de Madrid, para estimar los recorridos realizados (vehículos*kilómetro) y diferenciando por tipología de vehículo, combustible consumido y tecnología de reducción de emisiones instalada en los citados vehículos, (Ayuntamiento de Madrid 2017a). Es necesario recordar que, la determinación de la composición del parque circulante se presenta como una de las claves para el cálculo de las emisiones del sector, porque permite determinar las emisiones medias de GEI a partir de la tecnología instalada en los vehículos para la reducción de emisiones y los recorridos realizados. Siguiendo las consideraciones anteriores, se han estimado las emisiones medias de GEI del parque de vehículos que circulan por los anillos exteriores a la ciudad de Madrid (exterior a M-30 y M-40) como usuarios potenciales de la red de aparcamientos disuasorios, estimándose en 211,20 g/km las emisiones medias de CO₂ por km recorrido y 0,246 como emisiones medias de NO_x por km recorrido. Por otra parte, si se considera la distancia de cada aparcamiento disuasorio al centro de la ciudad, medida utilizando el software *Google Maps*, y la demanda prevista de cada aparcamiento, se pueden estimar los trayectos no realizados por los vehículos que dejan de acceder al centro de la ciudad, y de esta forma, estimar la valoración de las diferentes alternativas para los criterios de reducción de emisiones de GEI. En el epígrafe correspondiente se detalla cómo se calcula la demanda prevista de cada alternativa. Estos datos se han incluido en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Estimación reducción emisiones de GEI para cada alternativa de aparcamiento disuasorio

	Distancia al centro de la ciudad (km)	Demanda prevista	Reducción emisiones CO ₂ (Kg)	Reducción emisiones NO _x (kg)
Pitis	15,6	400	1.317.906,82	1.535,04
Paco de Lucía	16,7	102	358.881,44	418,01
Fuente de la Mora	18	330	1.254.545,92	1.461,24
Valdebebas	20,9	150	662.121,46	771,21
Canillejas	13,8	537	1.565.141,07	1.823,01
Estadio Olímpico	14	151	446.483,18	520,04
Santa Eugenia	10,2	307	661.361,12	770,32
San Cristóbal	16,9	125	446.166,37	519,68
Villaverde Alto	12,5	375	990.014,14	1.153,13
Villaverde Bajo Cruce	10,3	518	1.127.722,73	1.313,52
Aviación Española	9,3	750	1.473.141,04	1.715,85
Colonia Jardín	9,5	1000	2.006.428,65	2.337,00

Fuente: Elaboración propia

Eficiencia energética (C3).

La eficiencia energética de cada alternativa se determina como la reducción en el consumo de combustible, medido en ahorro en toneladas equivalentes de petróleo por los km no recorridos por los vehículos usuarios de los aparcamientos disuasorios estudiados. De igual forma que para la estimación de la reducción de emisiones de GEI, se ha analizado, para la estimación de la eficiencia energética de cada alternativa, el parque de vehículos que circulan

por los anillos exteriores a la ciudad de Madrid (exterior a M-30 y M-40) como usuarios potenciales de la red de aparcamientos disuasorio. Para ello, las características de los vehículos que circulan por la ciudad de Madrid y anillos de circunvalación, nuevamente se han obtenido del “Informe del parque circulante en la ciudad de Madrid”. Como se ha comentado, en este informe se realiza un estudio completo del parque de vehículos que circulan por la ciudad de Madrid, para estimar los recorridos realizados (vehículos*kilómetro) y diferenciando por tipología de vehículo, combustible consumido y tecnología de reducción de emisiones instalada en los citados vehículos, (Ayuntamiento de Madrid 2017a). Una vez determinada la composición del parque circulante de vehículos en los anillos indicados, se determina el consumo medio de combustible, medido en kilogramos equivalentes de petróleo, (Ayuntamiento de Sevilla n.d.). Los datos para calcular el consumo medio se han incluido en la tabla 4.11, obteniéndose un consumo medio de 59,726 gr equivalente de petróleo por kilómetro recorrido. Una vez determinado el consumo medio de combustible, se estima la eficiencia energética de cada alternativa a partir de la reducción en el consumo de combustible, medido en toneladas equivalentes de petróleo, considerando los recorridos no realizados por los usuarios de los aparcamientos disuasorios. Estas consideraciones son las mismas que se han tenido en cuenta para los criterios C1 y C2. Para ello, es necesario tener en cuenta la distancia al centro y la demanda. Los resultados se han incluido en la tabla 4.12.

Tabla 4.11. Estimación consumo medio de combustible (gr equivalente de petróleo por kilómetro)

Sub-categoría	Tecnología	Combustible	Consumo combustible g/km	Porcentaje de vehículos zona M-40 y exterior M-40	Consumo medio de combustible (gr equivalente de petróleo por kilómetro)
Gasolina<1,4 l	pre-ECE y lazo abierto	Gasolina	65	1,0229	0,665
	Euro I y posteriores		56	11,7257	6,566
Gasolina 1,4-2,0 l	pre-ECE y lazo abierto		77	0,6588	0,507
	Euro I y posteriores		66	15,0469	9,931
Gasolina >2,0 l	pre-ECE y lazo abierto		95	0,0483	0,046
	Euro I y posteriores		86	3,1664	2,723
Diesel <2,0 l	Convencional	Diesel	63	0,1152	0,073
	Euro I y posteriores		55	58,5024	32,176
Diesel >2,0 l	Convencional		75	0,0731	0,055
	Euro I y posteriores		73	9,5104	6,943
LPG	Convencional	LPG	59	0,0000	0,000
	Euro I y posteriores		57	0,0532	0,030
Gasolina híbrido 1,4-2,0 l	Euro I y posteriores	Gasolina/eléctrico	26	0,0396	0,010
Eléctrico	50 Wh	Electricidad	135 kWh ¹	0,0124	0,029
	75 Wh		160 kWh ¹	0,0124	0,034
	80 Wh		173 kWh ¹	0,0124	0,037
TOTAL				100,00	59,825

Fuente: Elaboración propia

¹ Tonelada equivalente de petróleo (tep)=11.630 kWh, (Instituto Energético de Galicia n.d.)

Tabla 4.12. Valoración de cada alternativa de aparcamiento disuasorio respecto al criterio de eficiencia energética

	Distancia al centro de la ciudad (km)	Demanda prevista	Eficiencia energética (ahorro en toneladas equivalentes de petróleo)
Pitis	15,6	400	0,3733
Paco de Lucía	16,7	102	0,1017
Fuente de la Mora	18	330	0,3554
Valdebebas	20,9	150	0,1876
Canillejas	13,8	537	0,4433
Estadio Olímpico	14	151	0,1265
Santa Eugenia	10,2	307	0,1873
San Cristóbal	16,9	125	0,1264
Villaverde Alto	12,5	375	0,2804
Villaverde Bajo Cruce	10,3	518	0,3194
Aviación Española	9,3	750	0,4173
Colonia Jardín	9,5	1000	0,5683

Fuente: Elaboración propia

Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por explotación de aparcamiento disuasorio (C4).

Para la valoración de las alternativas, respecto al criterio de emisiones de GEI debidas a la explotación de cada aparcamiento, se estiman las emisiones de CO₂ (toneladas al año) debidas a las actividades de explotación de cada uno de los aparcamientos estudiados. Se ha considerado el consumo de energía eléctrica de cada alternativa, teniendo en cuenta el tipo de aparcamiento: superficie, estructura o bajo rasante, y a partir del consumo de energía eléctrica, se estima las emisiones de GEI, (Ayuntamiento de Sevilla n.d.).

En los aparcamientos en superficie, el consumo de energía eléctrica se determina a partir del consumo debido a iluminación durante el horario nocturno. La eficiencia energética mínima de las instalaciones de aparcamientos en superficie viene definida en la legislación vigente, Reglamento de Eficiencia Energética en Instalaciones de Alumbrado Exterior y sus Instrucciones Técnicas Complementarias EA-01 a EA-07, (Ministerio de Industria. Gobierno de España 2008). Para instalaciones en superficie el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior, establece las condiciones para el alumbrado de aparcamientos al aire libre, que cumplirá con los requisitos fotométricos de las clases de alumbrado correspondientes a la situación de proyecto D1-D2, y clases de alumbrado CE1A, CE2, CE3 y CE4 establecidos en la tabla 4 de dicho Reglamento. Por otra parte, en la tabla 9 de la misma Instrucción, tabla 4.13, se indica la iluminancia media y mínima para proyectos tipo D según el tipo de alumbrado. A partir de la eficiencia energética se puede determinar la potencia a instalar de la iluminación teniendo en cuenta la iluminancia (medida en lux) y la superficie del aparcamiento. Por último, el consumo se calcula a partir de la potencia a instalar por el número de horas de encendido.

Tabla 4.13. Iluminancia media y uniformidad media para diferentes clases de alumbrado para situaciones tipo D

Clases de alumbrado	Iluminancia horizontal	
	Iluminancia media Em (lux) [mínima mantenida ⁽¹⁾]	Uniformidad media Um [mínima]
CE0	50	0,4
CE1	30	0,4
CE1A	25	0,4
CE2	20	0,4
CE3	15	0,4
CE4	10	0,4
CE5	7,5	0,4
<p>(1) Los niveles de la tabla son valores mínimos en servicio con mantenimiento de la instalación de alumbrado. A fin de mantener dichos niveles de servicio, debe considerarse un factor de mantenimiento (fm) elevado que dependerá de la lámpara adoptada, del tipo de luminaria, grado de contaminación del aire y modalidad de mantenimiento preventivo.</p>		

Fuente: Tabla 9 Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior.

Por otra parte, el Reglamento también indica cuáles son los requisitos mínimos de eficiencia energética, en instalaciones de alumbrado público, en función de la iluminancia media (lux).

Tabla 4.14. Requisitos mínimos de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado vial ambiental.

Iluminancia media en servicio Em (lux)	EFICIENCIA ENERGÉTICA MÍNIMA $\frac{m^2 \cdot lux}{W}$
≥20	9
15	7,5
10	6
7.5	5
≤5	3,5
<p>Nota - Para valores de iluminancia media proyectada comprendidos entre los valores indicados en la tabla, la eficiencia energética de referencia se obtendrá por interpolación lineal.</p>	

Fuente: Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior

Según lo anterior, si se considera una iluminancia media de 15 lux, la eficiencia energética mínima debe ser de 7,5. Según la tabla 4.14, y en función de la superficie de cada aparcamiento disuasorio diseñado en superficie, se obtienen los consumos de energía eléctrica al año y, a partir de aquí, las toneladas de emisiones de GEI (t CO₂). Los resultados se incluyen, para cada alternativa en superficie, en la tabla 4.15.

Tabla 4.15. Estimaciones de emisiones de GEI (tCO₂) debidas a la explotación de aparcamientos disuasorios en superficie.

Aparcamiento disuasorio en superficie	Superficie m ²	w/hora	Mw/año ²	tCO ₂ /año ³
Pitis (1)	8.500	17.000	61,200	17,748
Paco de Lucía (2)	5.163	10.326	37,174	10,780
Fuente de la Mora (3)	6.600	13.200	47,520	13,781
Valdebebas (4)	20.500	41.000	147,600	42,804
Estadio Olímpico (6)	21.500	43.000	154,800	44,892
Santa Eugenia (7)	6.153	12.306	44,302	12,847
San Cristóbal (8)	10.000	20.000	72,000	20,880
Villaverde Alto (9)	8.659	17.318	62,345	18,080
Aviación Española (11)	15.000	30.000	108,000	31,320

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de emisiones de GEI en relación con la explotación de los aparcamientos disuasorios en estructura y/o bajo rasante, al igual que en el caso de los aparcamientos en superficie, se ha considerado el papel fundamental que tiene el consumo eléctrico, debido a la iluminación. En el caso de aparcamientos en estructura y/o bajo rasante, para el cálculo del consumo se ha tenido en cuenta, por su importancia, no sólo el consumo debido a la iluminación sino, además el consumo debido a ventilación y a otros servicios como bombeo de aguas residuales. En estos casos, se estima que el consumo de energía eléctrica debido a la iluminación es un 42% del total, (Hinojo 2011).

Para el cálculo del consumo energético en aparcamientos bajo rasante, éste se realiza según las reglamentaciones existentes, Código Técnico de la Edificación, CTE, Sección HE3, Eficiencia Energética de las Instalaciones de Iluminación, (Ministerio de Fomento. Gobierno de España 2006a). Según esta reglamentación, la eficiencia energética de una instalación de iluminación de una zona, se determinará mediante el valor de eficiencia energética de la instalación (VEEI) (W/m²) por cada 100 lux mediante la siguiente expresión:

$$VEEI = \frac{P \cdot 100}{S \cdot E_m} \quad (4.3)$$

Donde,

P es la potencia la potencia de la lámpara más el equipo auxiliar (W);

S, la superficie iluminada (m²);

E_m, la iluminancia media horizontal mantenida (lux);

Por otra parte, la tabla 2.1 del CTE, página 41, se indica que, para aparcamientos, el valor límite de eficiencia energética de la instalación es de 4,0, y en la tabla 2.2, página 42, que la potencia máxima instalada para iluminación en aparcamientos es de 5,0 W/m². A partir de estos datos y la ecuación (4.3), se puede calcular el consumo energético debido a alumbrado

² Horario de invierno: 18:00-8:00, horario de verano: 21:00-8:00.

³ 0,29 tCO₂ por MW, (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) 2014), (MAGRAMA (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente) 2016)

para cada alternativa de aparcamiento en estructura y/o bajo rasante. Una vez obtenido el consumo eléctrico debido a la iluminación, se puede calcular el consumo total teniendo en cuenta el hecho de que el consumo de energía eléctrica correspondiente a iluminación en un aparcamiento supone aproximadamente un 42% del consumo total, (Hinojo 2011), y a partir de esto las emisiones de GEI de tCO₂. Los resultados se incluyen en la tabla 4.16.

Tabla 4.16. Estimaciones de emisiones de GEI (tCO₂) debidas a la explotación de aparcamientos disuasorios en estructura y/o bajo rasante.

Aparcamiento disuasorio en estructura/bajo rasante	Superficie m ₂	w/hora	Mw/año ⁴	tCO ₂ /año ⁵
Canillejas (5)	13.425	153.367	1.343,497	389,614
Villaverde Bajo cruce (10)	16.200	185.069	1.621,203	470,149
Colonia Jardín (12)	25.000	285.600	2.501,856	725,538

Fuente: Elaboración propia

Ocupación de suelo (C5).

La valoración de cada alternativa respecto al criterio de ocupación de suelo se ha obtenido directamente del Programa de Aparcamientos Disuasorios de Madrid, (Ayuntamiento de Madrid 2016). Para cada aparcamiento se incluye la superficie de la parcela ocupada por el mismo. En la tabla 4.17 se incluye la valoración de las diferentes alternativas respecto a este criterio.

Tabla 4.17. Superficie de la parcela ocupada por cada alternativa

	Superficie parcela aparcamiento
Pitis	8.500
Paco de Lucía	5.163
Fuente de la Mora	6.600
Valdebebas	20.500
Canillejas	3.150
Estadio Olímpico	21.500
Santa Eugenia	6.153
San Cristóbal	10.000
Villaverde Alto	8.659
Villaverde Bajo Cruce	8.112
Aviación Española	15.000
Colonia Jardín	6.250

Fuente: Programa de Aparcamientos Disuasorios de Madrid, (Ayuntamiento de Madrid 2016).

Ocupación de suelo no utilizado en el centro (C6).

La valoración de cada alternativa, respecto al criterio de ocupación de suelo no utilizado en el centro, se ha obtenido a partir de las dimensiones de una plaza de aparcamiento en la vía pública definida en la Instrucción de Vía Pública del Ayuntamiento de Madrid, (Ayuntamiento de Madrid 2000). Esta instrucción indica que las dimensiones mínimas

⁴ Horario: 24 horas/día

⁵ 0,29 tCO₂ por MW, (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) 2014), (MAGRAMA (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente) 2016)

de una plaza de aparcamiento, para un automóvil medio, son 4,5*2,25 metros. A partir de aquí, se obtiene la valoración de cada alternativa respecto a este criterio multiplicando la superficie indicada por la demanda prevista de cada uno de los aparcamientos estudiados. La demanda prevista de cada alternativa se determina en el epígrafe correspondiente del presente capítulo. La tabla 4.18 incluye la valoración de las diferentes alternativas respecto al criterio de ocupación de suelo no utilizado en el centro.

Tabla 4.18. Superficie de suelo no ocupado en el centro

	Ocupación de suelo no utilizado en el centro (m ²)
Pitis	4.050,00
Paco de Lucía	1.030,22
Fuente de la Mora	3.341,25
Valdebebas	1.518,75
Canillejas	5.437,13
Estadio Olímpico	1.528,88
Santa Eugenia	3.108,38
San Cristóbal	1.265,63
Villaverde Alto	3.796,88
Villaverde Bajo Cruce	5.248,80
Aviación Española	7.593,75
Colonia Jardín	10.125,00

Fuente: Elaboración propia

Coste de construcción (C7).

La valoración de cada alternativa, respecto al criterio de coste de construcción, se ha obtenido directamente del Programa de Aparcamientos Disuasorios de Madrid, (Ayuntamiento de Madrid 2016), que incluye el coste total de construcción para cada uno de los aparcamientos. La tabla 4.19 incluye la valoración de las diferentes alternativas respecto a este criterio.

Tabla 4.19. Coste de construcción de cada aparcamiento disuasorio

	Coste de construcción (€)
Pitis	1.540.000,00
Paco de Lucía	647.500,00
Fuente de la Mora	1.755.000,00
Valdebebas	2.100.000,00
Canillejas	8.383.500,00
Estadio Olímpico	6.913.000,00
Santa Eugenia	1.074.500,00
San Cristóbal	2.050.000,00
Villaverde Alto	1.312.500,00
Villaverde Bajo Cruce	13.413.600,00
Aviación Española	2.625.000,00
Colonia Jardín	21.325.000,00

Fuente: Programa de Aparcamientos Disuasorios de Madrid, (Ayuntamiento de Madrid 2016)

Coste del suelo (C8).

La valoración de cada alternativa respecto al criterio de coste del suelo donde se ubica cada aparcamiento disuasorio se ha determinado a partir de la superficie de la parcela ocupada por cada aparcamiento multiplicada por el precio medio del suelo en la zona correspondiente. Para determinar el precio medio de mercado del suelo se han consultado portales inmobiliarios, considerándose como precio el precio medio del suelo urbanizable en cada localización, (Idealista n.d.).

Tabla 4.20. Coste del suelo de cada aparcamiento disuasorio

	Superficie parcela (m ²)	Precio medio terreno urbanizable (€/m ²)	Coste del suelo (€)
Pitis	8.500	1.260,00	10.710.000,00
Paco de Lucía	5.163	1.260,00	6.505.380,00
Fuente de la Mora	6.600	1.350,00	8.910.000,00
Valdebebas	20.500	1.350,00	27.675.000,00
Canillejas	3.150	950,00	2.992.500,00
Estadio Olímpico	21.500	437,00	9.395.500,00
Santa Eugenia	6.153	510,00	3.138.030,00
San Cristóbal	10.000	360,00	3.600.000,00
Villaverde Alto	8.659	360,00	3.117.240,00
Villaverde Bajo Cruce	8.112	620,00	5.029.440,00
Aviación Española	15.000	725,00	10.875.000,00
Colonia Jardín	6.250	376,00	2.350.000,00

Fuente: Elaboración propia

Costes de explotación (C9):

El coste anual de la explotación de cada aparcamiento disuasorio, es la suma de los costes de mantenimiento y de operación. Los costes de mantenimiento de una instalación de aparcamiento incluyen el coste del mantenimiento rutinario y periódico, como pequeñas reparaciones o parches, pintura, limpieza de elementos de drenaje, reposición del pavimento y de los elementos de control de tráfico y barreras, y pueden estimarse en unos 52 € por plaza y año, (Chu et al. 2001). Como costes de operación se incluyen los gastos de servicios públicos de abastecimiento de agua y saneamiento, energía eléctrica, gestión de residuos y seguridad. Teniendo en cuenta que los costes de abastecimiento de agua, saneamiento, gestión de residuos y seguridad son similares en todas las alternativas, para el cálculo de los costes de operación se ha considerado solo el coste de energía eléctrica en cada uno de los aparcamientos disuasorios. Para ello, se han tenido en cuenta los consumos de energía eléctrica estimada en el criterio C4 y una tarifa eléctrica de un mercado regulado con una Tarifa de Último Recurso (TUR1 y TUR2) y, en el que el precio del kWh es fijado por subastas trimestrales y publicado por el Gobierno a través de Red Eléctrica Española, (Red Eléctrica Española n.d.), obteniéndose un precio medio de KWh de 0,13847 €/kWh. De esta forma, la valoración de cada alternativa respecto al criterio de costes de explotación se incluye en la tabla 4.21.

Tabla 4.21. Costes anuales de explotación de cada aparcamiento disuasorio

	Costes de mantenimiento (52€*nº de plazas)	Costes de operación (consumo de energía eléctrica)	Costes anuales de explotación (€)
Pitis	20.880,00	8.474,36	29.354,36
Paco de Lucía	5.311,35	5.147,43	10.458,78
Fuente de la Mora	17.226,00	6.580,09	23.806,09
Valdebebas	7.830,00	20.438,17	28.268,17
Canillejas	28.031,40	186.033,98	214.065,38
Estadio Olímpico	7.882,20	21.435,16	29.317,36
Santa Eugenia	16.025,40	6.134,44	22.159,84
San Cristóbal	6.525,00	9.969,84	16.494,84
Villaverde Alto	19.575,00	8.632,88	28.207,88
Villaverde Bajo Cruce	27.060,48	224.487,94	251.548,42
Aviación Española	39.150,00	14.954,76	54.104,76
Colonia Jardín	52.200,00	346.432,00	398.632,00

Fuente: Elaboración propia

Número de plazas (C10).

Las valoraciones de las alternativas respecto al criterio de número de plazas de cada aparcamiento disuasorio, se han obtenido de la ficha de características de cada aparcamiento del Programa de Aparcamientos Disuasorios del municipio de Madrid, (Ayuntamiento de Madrid 2016). Las valoraciones obtenidas se han incluido en la tabla 4.22.

Tabla 4.22. Dimensiones (número de plazas) de cada aparcamiento disuasorio

	Número de plazas
Pitis	400
Paco de Lucía	185
Fuente de la Mora	330
Valdebebas	600
Canillejas	537
Estadio Olímpico	1510
Santa Eugenia	307
San Cristóbal	500
Villaverde Alto	375
Villaverde Bajo Cruce	648
Aviación Española	750
Colonia Jardín	1000

Fuente: Programa de Aparcamientos Disuasorios de Madrid, (Ayuntamiento de Madrid 2016)

Población adyacente (C11).

Los datos de población adyacente, y por lo tanto de posibles usuarios, de cada aparcamiento disuasorio, se ha obtenido de los datos de población del Padrón Municipal de los municipios de Madrid del año 2017, (Instituto Nacional de Estadística (INE) n.d.), y del Padrón Municipal de los distritos de la ciudad de Madrid del año 2017, (Ayuntamiento de Madrid 2018b). Para cada aparcamiento se ha determinado la población adyacente como resultado de la suma de la población de los distritos de Madrid próximos a cada aparcamiento y de los municipios situados en el corredor de entrada de cada uno de ellos. Según lo indicado, la población adyacente de cada alternativa se ha incluido en la tabla 4.23.

Tabla 4.23. Población adyacente de cada aparcamiento disuasorio

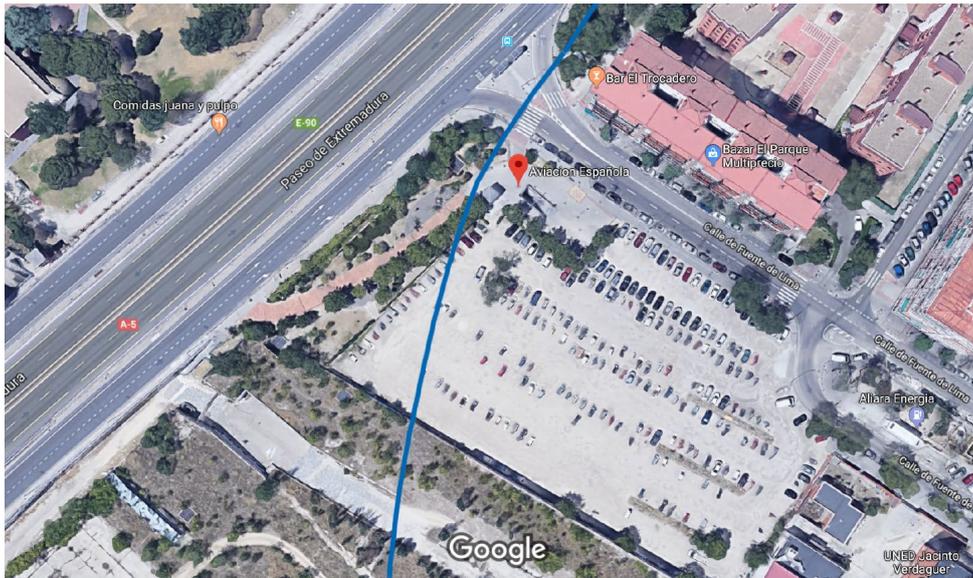
	Número de plazas
Pitis	494.903
Paco de Lucía	490.545
Fuente de la Mora	448.160
Valdebebas	103.883
Canillejas	203.985
Estadio Olímpico	154.413
Santa Eugenia	316.199
San Cristóbal	337.231
Villaverde Alto	427.265
Villaverde Bajo Cruce	340.088
Aviación Española	450.991
Colonia Jardín	98.081

Fuente: Elaboración propia

Demanda prevista (ocupación) (C12):

La demanda prevista de cada aparcamiento disuasorio, es la valoración más difícil de determinar porque, como se indica en la bibliografía, es difícil de estimar al depender directamente del comportamiento de los usuarios. En este sentido, en varias guías se indica que una forma aproximada de cálculo es a través de la población adyacente, de la intermodalidad y por la observación del aparcamiento informal existente en la zona próxima al centro de transferencia de transporte, (Bullard and Christiansen 1983), (Colin Buchanan Consultores 2010), (Chu et al. 2001). En el Programa de Aparcamientos Disuasorios del municipio de Madrid, (Ayuntamiento de Madrid 2016), se fija la demanda prevista para algunas de las alternativas, pero no para todas. Con las consideraciones realizadas, se ha estimado la demanda en los casos en los cuales no había datos previos de demanda y se ha confirmado la demanda prevista en el Programa de Aparcamientos Disuasorios, estudiando el aparcamiento informal en la zona próxima a cada alternativa de aparcamiento disuasorio. Como ejemplo de aparcamiento informal en la zona, se incluye una fotografía del aparcamiento informal en un solar próximo a la alternativa número 11, “Aviación Española”.

Figura 4.3. Aparcamiento informal en un solar próximo a la alternativa 11, “Aviación Española”



Fuente: Google Maps, 2019

La demanda prevista de cada aparcamiento disuasorio se incluye en la tabla 4.24:

Tabla 4.24. Demanda prevista (ocupación) de cada aparcamiento disuasorio

	Demanda prevista (número medio de plazas ocupadas)
Pitis	400
Paco de Lucía	102
Fuente de la Mora	330
Valdebebas	150
Canillejas	537
Estadio Olímpico	151
Santa Eugenia	307
San Cristóbal	125
Villaverde Alto	375
Villaverde Bajo Cruce	518
Aviación Española	750
Colonia Jardín	1000

Fuente: Elaboración propia

Intensidad de tráfico en el corredor de entrada (C13).

La intensidad de tráfico en el corredor de entrada se ha determinado a partir de los estudios de tráfico realizados por la administración regional de carreteras. Para cada alternativa se ha determinado la intensidad del tráfico en el corredor de entrada a partir de la Intensidad Media Diaria, IMD, que es el número de vehículos que circulan de media en un día por la vía, y cuyos datos son publicados anualmente, (Comunidad de Madrid 2019). Según los datos del estudio de Tráfico indicado, la valoración de cada alternativa respecto a este criterio se incluye en la tabla 4.25.

Tabla 4.25. Intensidad de tráfico (IMD) corredor de entrada de cada aparcamiento disuasorio

	IMD (2018) corredor entrada
Pitis	123.840
Paco de Lucía	123.840
Fuente de la Mora	99.584
Valdebebas	52.302
Canillejas	105.269
Estadio Olímpico	82.810
Santa Eugenia	165.456
San Cristóbal	130.490
Villaverde Alto	147.997
Villaverde Bajo Cruce	99.205
Aviación Española	107.194
Colonia Jardín	64.081

Fuente: 2018 Tráfico. Dirección General de Carreteras e Infraestructuras. Comunidad de Madrid

Pérdida media de tiempo por congestión en el corredor de entrada (C14).

La congestión en la vía, en la cual se sitúa cada uno de los aparcamientos disuasorios, se mide como el tiempo medio perdido (en minutos al día) por los usuarios de los vehículos privados con motivo de la congestión de tráfico en dicho corredor de entrada. Para determinar las valoraciones se han utilizado los valores de congestión medidos en cada corredor de entrada de acceso a la ciudad de Madrid realizadas por la Fundación del Real Automóvil Club de Cataluña, RACC, en 2009, (RACC 2009) y se han actualizado con las mediciones realizadas posteriormente e incluidas en el Plan de Movilidad Urbana Sostenible de la ciudad de Madrid, (Ayuntamiento de Madrid 2014).

En el Plan de Movilidad, se indica que desde el año 2004 hasta el 2012 el descenso del tráfico de vehículos privados en el interior de la ciudad de Madrid y en el interior de la M-30 ha sido muy notable. Se estima en un 15%, debido a las políticas de disuasión del vehículo privado realizadas. De esta forma, de los 0,98 millones de desplazamientos diarios que se realizan en el interior de la M-30, solo un 25% de ellos se realizan en transporte privado. Sin embargo, en relación con el tráfico externo (número de vehículos que entran o salen diariamente de la ciudad), la reducción ha sido únicamente del 5%, esto quiere decir que 1,08 millones de vehículos privados entran y salen de la ciudad de Madrid diariamente. Además, el 5,9% de los kilómetros que se realizan en coche está afectado por importantes demoras. Concretamente, los mayores conflictos se registran en las principales vías de la ciudad: la M-30 y la M-40. En el primer caso destaca el arco este, especialmente el tramo comprendido entre la A2 y la A3, y el nudo norte. También son significativos los niveles de congestión en los corredores de entrada de la A1, la A2 y la A5, (Ayuntamiento de Madrid 2014).

Según los datos de los informes comentados, la valoración de cada alternativa según la pérdida de tiempo por congestión en el corredor de entrada es la siguiente.

Tabla 4.26. Pérdida de tiempo en min/día por congestión en el corredor de entrada

	Corredor de entrada	Pérdida de tiempo en min/día por congestión en corredor de entrada
Pitis	M-40, salida 54	18,07
Paco de Lucía	M-40, salida 54	18,07
Fuente de la Mora	A-1, M-11	8,93
Valdebebas	M-11	8,93
Canillejas	A-2	11,78
Estadio Olímpico	M-40, salida 10	12,88
Santa Eugenia	A-3	9,51
San Cristóbal	A-4	9,07
Villaverde Alto	A-42, M-45	13,46
Villaverde Bajo Cruce	A-4	9,07
Aviación Española	A-5	7,76
Colonia Jardín	M-501	5,27

Fuente: Elaboración propia

Intermodalidad (C15).

Para estudiar la intermodalidad de cada aparcamiento disuasorio evaluado, se ha observado el número de conexiones con la red de transporte público. Para ello, se ha contabilizado la existencia de: estación de metro, tren de cercanías y el número de líneas de autobuses interurbanos y urbanos. De esta forma, se otorga una valoración de diez puntos por cada estación de metro y de tren de cercanías, y un punto por cada línea de autobuses interurbanos y urbanos que tienen conexión desde el punto intermodal próximo al aparcamiento disuasorio. Según esto se obtienen las siguientes valoraciones para las diferentes alternativas.

Tabla 4.27. Evaluación de la Intermodalidad de cada aparcamiento disuasorio

	Puntuación de Intermodalidad
Pitis	21
Paco de Lucía	22
Fuente de la Mora	32
Valdebebas	11
Canillejas	33
Estadio Olímpico	13
Santa Eugenia	23
San Cristóbal	12
Villaverde Alto	25
Villaverde Bajo Cruce	32
Aviación Española	21
Colonia Jardín	24

Fuente: Elaboración propia

Proximidad a la red ciclista de Madrid (C16).

La proximidad a la red de ciclista de Madrid se ha determinado para cada alternativa tomando como referencia el Mapa de la Infraestructura Ciclista de la ciudad de Madrid, desarrollado en la aplicación ArcGIS, (software sobre los Sistemas de Información Geográfica o SIG), (Ayuntamiento de Madrid n.d.). Esta aplicación funciona de forma interactiva y proporciona información de cada una de las rutas ciclistas. Para el cálculo de la distancia se han tenido en cuenta aquellos tramos de la red ya existentes o en ejecución, sin considerar los

tramos proyectados o planificados. En la tabla 4.28 se incluye la valoración de cada alternativa como la distancia expresada en metros desde cada aparcamiento disuasorio a la red ciclista.

Tabla 4.28. Proximidad a la red ciclista de Madrid de cada aparcamiento disuasorio

	Proximidad a la red ciclista (m)
Pitis	200
Paco de Lucía	400
Fuente de la Mora	800
Valdebebas	30
Canillejas	210
Estadio Olímpico	300
Santa Eugenia	300
San Cristóbal	750
Villaverde Alto	600
Villaverde Bajo Cruce	300
Aviación Española	2700
Colonia Jardín	400

Fuente: Elaboración propia

Accidentalidad en corredor de entrada (C17).

Para valorar el primer criterio, dentro del grupo de los criterios sociales, accidentalidad, se ha estimado el “Índice de Peligrosidad”, IP, de la vía principal próxima a cada alternativa de aparcamiento disuasorio, (Ministerio de Fomento. Gobierno de España 2016). Este índice IP se calcula a partir del número de accidentes con víctimas que se han producido en un determinado tramo de carretera durante un año, en función del tráfico registrado en esa carretera medido a través de la Intensidad Media Diaria, IMD, definida anteriormente. La ecuación (4.4) es la fórmula de cálculo utilizada por el Ministerio de Fomento, para el cálculo de IP para cada vía de la red de carreteras de España, y los datos son publicados anualmente.

$$IP = \frac{N^{\circ} \text{ de accidentes con víctimas} \cdot 10^8}{IMD \cdot 365 \cdot \text{longitud en km}} \quad (4.4)$$

De esta forma, la valoración de cada alternativa respecto al criterio de accidentalidad, es la siguiente.

Tabla 4.29. Índice de peligrosidad (accidentalidad) del corredor de entrada de cada aparcamiento disuasorio

	Índice de peligrosidad (accidentalidad)
Pitis	9,1
Paco de Lucía	9,1
Fuente de la Mora	11,4
Valdebebas	4,2
Canillejas	14,9
Estadio Olímpico	9,1
Santa Eugenia	14,6
San Cristóbal	9,7
Villaverde Alto	13,1
Villaverde Bajo Cruce	9,7
Aviación Española	15,2
Colonia Jardín	17,04

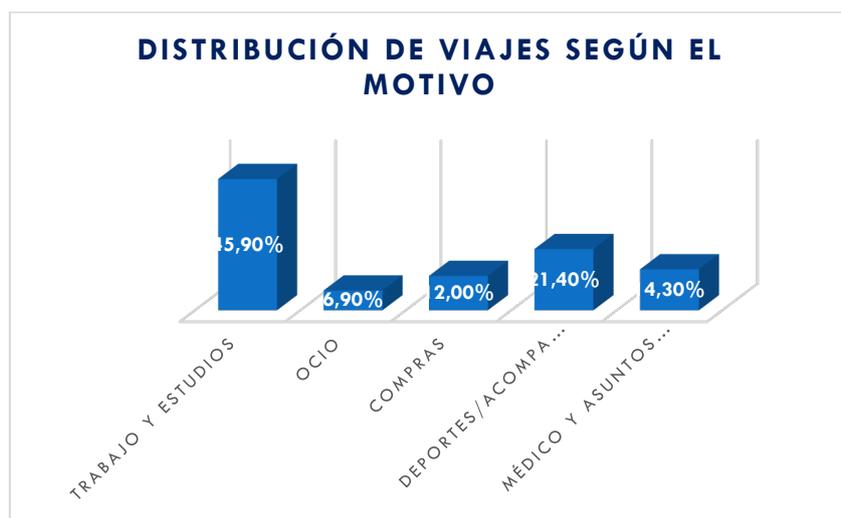
Fuente: Elaboración propia

Mejora en calidad de vida (percepción del usuario) (C18).

La valoración de alternativas según el criterio de mejora de calidad de vida, como *percepción de los usuarios*, se ha determinado como el ahorro de tiempo en el desplazamiento desde el aparcamiento disuasorio al centro. Para ello, se contrasta el tiempo empleado si el desplazamiento se hace en transporte público respecto al hacerlo en vehículo privado en momentos de alta intensidad de tráfico, expresado en términos económicos, (€). A través de la aplicación Google Maps se ha medido el tiempo empleado en realizar el trayecto desde cada alternativa de aparcamiento al centro en transporte público y el tiempo empleado al hacer en vehículo privado en hora punta de tráfico y se calcula la diferencia de tiempo en minutos.

Para la valoración del tiempo en términos económicos, se ha tenido en cuenta que los usuarios no valoran igual el tiempo cuando el desplazamiento se realiza por motivos de trabajo o por ocio, tal y como se indica en el documento de Prescripciones y Recomendaciones Técnicas Relativas a los Contenidos Mínimos a incluir en los Estudios de Rentabilidad de los Estudios Informativos o Anteproyectos, del Ministerio de Fomento, (Ministerio de Fomento. Gobierno de España 2014), e indentificado por otros autores (Lent, Holleyman, and Ajayi 2001). En el siguiente gráfico se incluye la distribución de los viajes en la Comunidad de Madrid según el motivo principal del mismo, a partir de los datos de encuesta de movilidad realizada de forma periódica por la administración regional, (Comunidad de Madrid 2014).

Figura 4.4. Gráfico de distribución de viajes según el motivo del desplazamiento



Fuente: Elaboración propia

La valoración de los ahorros en tiempo de viaje representa un elemento clave para la evaluación de los proyectos de transportes, al ser uno de los principales beneficios que se

derivan de una nueva infraestructura, (Ministerio de Fomento. Gobierno de España 2014). El valor del tiempo para los vehículos privados podría estimarse utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Valor tiempo vehículo privado} = A * V_{\text{trabajo}} + B * V_{\text{ocio}} \quad (4.5)$$

Donde,

A = % desplazamientos por motivo de trabajo (incluye trabajo y estudios)

B = % desplazamientos por motivo de ocio (incluye ocio, compras, visitas, paseos, otros)

Vtrabajo = Valor del tiempo por motivo de trabajo

Vocio = Valor del tiempo por motivo de ocio

Para la estimación del valor del tiempo, de la hora de trabajo y de la hora de ocio el Ministerio de Fomento del Gobierno de España propone la utilización los valores determinados en el Proyecto Europeo Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (HEATCO), (Odgaard, Kelly, and Laird 2005). En este proyecto se valora el ahorro de tiempo para trabajo y ocio en función del modo de transporte, y se estimó que, en el año 2002, para el caso de España el valor del tiempo de trabajo es de 25,95 euros y el de ocio, de 9,90 euros. Aplicando la ecuación (4.5), los datos de distribución de desplazamientos según el motivo recogidos en la encuesta de movilidad del año 2014 (figura 4.4) y actualizando estos valores a importes correspondientes al año 2018, según el incremento de que han sufrido los precios desde el año 2002 al año 2018, se obtiene un valor, en términos económicos, del tiempo en vehículo privado de 23,71 euros a la hora. Aplicando este valor se obtienen los valores de ahorro de tiempo en cada alternativa de aparcamiento disuasorio son los incluidos en la tabla 4.30.

Tabla 4.30. Mejora de calidad de vida (percepción del usuario), valoración económica por ahorro de tiempo

	Tiempo en transporte público (minutos)	Tiempo en vehículo privado (minutos)	Valoración económica del ahorro de tiempo
Pitis	27	40	5,14
Paco de Lucía	23	40	6,72
Fuente de la Mora	25	45	7,90
Valdebebas	34	50	6,32
Canillejas	31	45	5,53
Estadio Olímpico	43	50	2,77
Santa Eugenia	32	40	3,16
San Cristóbal	32	45	5,14
Villaverde Alto	18	45	10,67
Villaverde Bajo Cruce	26	50	9,48
Aviación Española	26	40	5,53
Colonia Jardín	25	45	7,90

Fuente: Elaboración propia

A partir de las estimaciones realizadas, en los puntos anteriores, se puede construir la matriz de decisión, con la valoración de cada alternativa respecto a cada criterio de selección, tabla 4.31.

Tabla 4.31 Matriz decisión aparcamientos disuasorios

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18
Pitis (1)	1.317.906,82	1.535,04	0,3733	17,7480	8.500,00	4.050,00	1.540.000,00	10.710.000,00	29.354,36	400	494.903	400	123.840	18,0732	21	200	9,10	5,1372
Paco de Lucía (2)	358.881,44	418,01	0,1017	10,7803	5.163,00	1.030,22	647.500,00	6.505.380,00	14.804,43	185	490.545	102	123.840	18,0732	22	400	9,10	6,7178
Fuente de la Mora (3)	1.254.545,92	1.461,24	0,3554	13,7808	6.600,00	3.341,25	1.755.000,00	8.910.000,00	23.806,09	330	448.160	330	99.584	8,9268	32	800	11,40	7,9033
Valdebebas (4)	662.121,46	771,21	0,1876	42,8040	20.500,00	1.518,75	2.100.000,00	27.675.000,00	51.758,17	600	103.883	150	52.302	8,9268	11	30	4,20	6,3227
Canillejas (5)	1.565.141,07	1.823,01	0,4433	389,6140	3.150,00	5.437,13	8.383.500,00	2.992.500,00	214.065,38	537	203.985	537	105.269	11,7805	33	210	14,90	5,5323
Estadio Olímpico (6)	446.483,18	520,04	0,1265	44,8920	21.500,00	1.528,88	6.913.000,00	9.395.500,00	100.257,16	1.510	154.413	151	82.810	12,8780	13	300	9,10	2,7662
Santa Eugenia (7)	661.361,12	770,32	0,1873	12,8475	6.153,00	3.108,38	1.074.500,00	3.138.030,00	22.159,84	307	316.199	307	165.456	9,5122	23	300	14,60	3,1613
San Cristobal (8)	446.166,37	519,68	0,1264	20,8800	10.000,00	1.265,63	2.050.000,00	3.600.000,00	36.069,84	500	337.231	125	130.490	9,0732	12	750	9,70	5,1372
Villaverde Alto (9)	990.014,14	1.153,13	0,2804	18,0800	8.659,00	3.796,88	1.312.500,00	3.117.240,00	28.207,88	375	427.265	375	147.997	13,4634	25	600	13,10	10,6695
Villaverde Bajo cruce (10)	1.127.722,73	1.313,52	0,3194	470,1488	8.112,00	5.248,80	13.413.600,00	5.029.440,00	258.313,54	648	340.088	518	99.205	9,0732	32	300	9,70	9,4840
Avicación Española (11)	1.473.141,04	1.715,85	0,4173	31,3200	15.000,00	7.593,75	2.625.000,00	10.875.000,00	54.104,76	750	450.991	750	107.194	7,7561	21	2.700	15,20	5,5323
Colonia Jardín (12)	2.006.428,65	2.337,00	0,5683	725,5382	6.250,00	10.125,00	21.325.000,00	2.350.000,00	398.632,00	1.000	98.081	1.000	64.081	5,2683	24	400	17,04	7,9033

Fuente: Elaboración propia

4.3. VERIFICACIÓN DE LA ESTABILIDAD Y ROBUSTEZ DE LAS SOLUCIONES.

Como se ha comentado en epígrafes anteriores, los métodos de decisión son herramientas muy útiles que permiten sistematizar el proceso de decisión. Pero presentan el inconveniente de que las variables de entrada están sujetas a cierta incertidumbre. Por ello, es necesario conocer la estabilidad de las soluciones obtenidas. En este sentido, es necesario recordar que el análisis de sensibilidad mide la estabilidad o el comportamiento de la solución ante pequeños cambios en las preferencias ocurridos durante el proceso de resolución o ante pequeños cambios en los valores tomados por los parámetros. En un contexto de toma de decisiones, el análisis de sensibilidad tiene gran importancia porque las variaciones en las entradas del método pueden afectar la recomendación dada por el decisor en la toma de decisiones multicriterio. Uno de los aspectos a considerar, en el análisis de sensibilidad, es el cambio en la ponderación de los criterios, aunque se utilicen métodos objetivos de ponderación, como es este caso, porque permiten conocer la estabilidad de la solución.

Ya se ha indicado que en la literatura hay diferentes clasificaciones y tipos de análisis de sensibilidad. Entre los principales métodos que se han destacado en la revisión bibliográfica se hace hincapié en dos de ellos: el método de variación de pesos en un determinado intervalo y el método del criterio crítico. Para el análisis de sensibilidad del **método VIKOR modificado** desarrollado se emplea el primero de ellos y los resultados se han comparado con los resultados obtenidos con el método VIKOR tradicional. No se aplica el método del criterio crítico, porque como se comentó en el apartado correspondiente, no es aplicable a todos los métodos de decisión.

Para determinar la sensibilidad de la metodología desarrollada, el peso de cada criterio se modifica (incrementándose y disminuyéndose) en un pequeño porcentaje, por ejemplo, 5%. Igualmente se modifica (incrementándose y disminuyendo) en un gran porcentaje (50%), y, por último, en un 95% (cambio muy grande), manteniendo constantes el peso del resto de los criterios. Para el resto de criterios, solo hay que tener en cuenta que las ponderaciones se incrementan o disminuyen según proceda, y en la misma medida, para mantener que la suma de los pesos de todos los criterios siga siendo igual a 1. De esta forma, se pueden calcular los coeficientes relativos de sensibilidad de cada criterio como el número de cambios en la clasificación de alternativas debido al cambio (pequeño, gran porcentaje o cambio muy grande) en las ponderaciones de los criterios. Este método permite monitorear cómo cambian las clasificaciones de las soluciones para cada caso, y no solo determinar el criterio con mayor sensibilidad. El método es fácilmente programable en cualquier software de programación. Para la presente tesis, se ha utilizado Matlab™, para la programación del análisis de sensibilidad.

Por otra parte, los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad, es decir, la estabilidad de la solución, del método VIKOR modificado, son comparados con los obtenidos

en el análisis de sensibilidad si se aplica el método VIKOR tradicional, sin tener en cuenta la correlación entre variables.



CAPÍTULO 5: RESULTADOS

5.1. RESULTADOS

5.1.1. MUROS DE CONTENCIÓN

Una vez determinada la matriz de decisión, para la selección de tipologías de muros de contención, tabla 4.7, para lo cual se han valorado las diferentes alternativas respecto a los criterios de selección, es necesario calcular los pesos de los diferentes criterios de selección, según la metodología descrita en el capítulo anterior. Tal y como se ha indicado, para ello, se han utilizado métodos objetivos de ponderación de criterios, en concreto el **método de entropía**. El **método de entropía** determina el peso de cada criterio a partir del análisis del comportamiento de las diferentes alternativas respecto a ese criterio. De manera que, se mide la entropía (desorden) de cada criterio, según se ha descrito en el epígrafe 3.2.2.2. Métodos Objetivos de Ponderación. De esta forma, aquellos criterios que muestran menor entropía, o lo que es lo mismo mayor dispersión o desviación, se le asigna un peso mayor, según las ecuaciones (3.29) a (3.31). Pero, previamente, hay que normalizar la matriz de decisión, para eliminar el efecto de las diferentes unidades, y convertir los valores de la matriz de decisión en valores comprendidos entre [0,1], según las ecuaciones (3.27) y (3.28), es decir, se utiliza un método de normalización lineal (máximo-mínimo). Los resultados se incluyen a continuación:

Tabla 5.1. Valores normalizados matriz decisión muros. Método objetivo de ponderación de entropía

Coste construcción C_1	Rendimiento construcción C_2	Integración paisajística C_3	Cultura y costumbre C_4	Residuos RCD C_5	Emisiones GEI C_6	Coste mantenimiento anual C_7
0,00000	0,24615	0,28002	0,21144	0,86002	0,00000	1,00000
0,52273	0,75385	0,41095	0,40161	0,00000	0,49945	0,85415
1,00000	0,96154	1,00000	0,00000	1,00000	0,70806	0,00000
0,59545	1,00000	0,69097	0,21144	0,28445	1,00000	0,91792

Fuente: Elaboración propia

Una vez aplicadas las ecuaciones (3.29), (3.30) y (3.31), obtenemos el vector de pesos, w_j , de los diferentes criterios de selección para la selección de tipologías de muros, siendo j , el número de criterios, que para este caso, varía de 1 a 7. A continuación, se incluye el vector de pesos calculado.

Tabla 5.2. Vector de pesos de los criterios de selección de tipologías de muros. Método objetivo de ponderación de entropía

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7
0,12110	0,20441	0,20127	0,11818	0,09715	0,12228	0,13561

Fuente: Elaboración propia

Una vez determinado el vector de pesos de los diferentes criterios de selección y, continuando con el proceso de decisión, según se ha descrito en el capítulo anterior, figura 4.1, es necesario determinar si existe correlación entre las variables de decisión. El objetivo es establecer el método de decisión a aplicar: método VIKOR modificado o método VIKOR tradicional. Para determinar la correlación entre variables se calcula el coeficiente de Pearson y los niveles de significancia de los valores obtenidos. Los resultados se exponen a continuación.

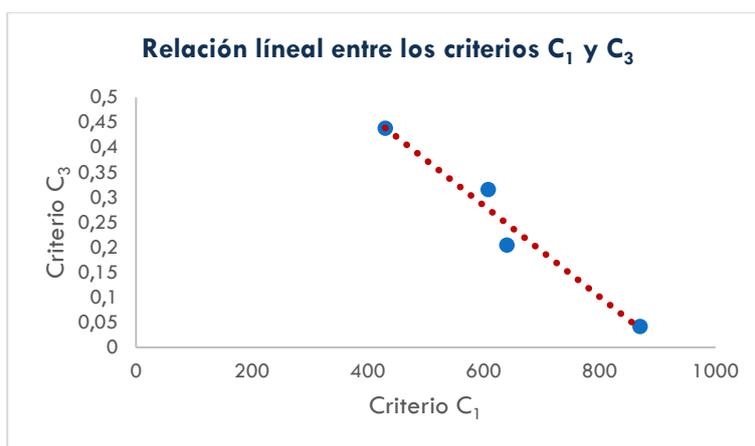
Tabla 5.3. Coeficientes de correlación matriz decisión tipologías de muros

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
C ₁	1,00000	-0,89495	-0,98000 (*)	0,97755 (*)	0,05797	0,76202	-0,82724
C ₂	-0,89495	1,00000	0,90257	-0,96694 (*)	0,31780	-0,95011 (*)	0,49208
C ₃	-0,98000 (*)	0,90257	1,00000	-0,97789	-0,11556	-0,82711	0,79370
C ₄	0,97755 (*)	-0,96694 (*)	-0,97789	1,00000	-0,09072	0,87918	-0,69713
C ₅	0,05797	0,31780	-0,11556	-0,09072	1,00000	-0,31952	-0,55234
C ₆	0,76202	-0,95011 (*)	-0,82711	0,87918	-0,31952	1,00000	-0,31472
C ₇	-0,82724	0,49208	0,79370	-0,69713	-0,55234	-0,31472	1,00000

Fuente: Elaboración propia

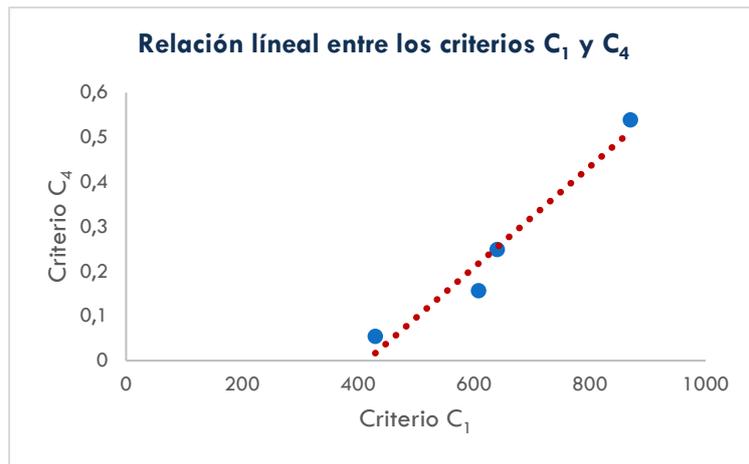
Los elementos marcados con (*), en la matriz de coeficientes de correlación de Pearson, indican una correlación fuerte y con un nivel de significancia inferior a 0,05, lo que indica que, a pesar de que el número de la muestra es pequeño, n=4, es probable que la correlación no es debida al azar. Si representamos la relación lineal entre los criterios correlacionados, obtenemos las siguientes gráficas que muestran la correlación lineal entre variables.

Figura 5.1. Correlación lineal entre los criterios C₁ y C₃, en selección de tipologías de muros



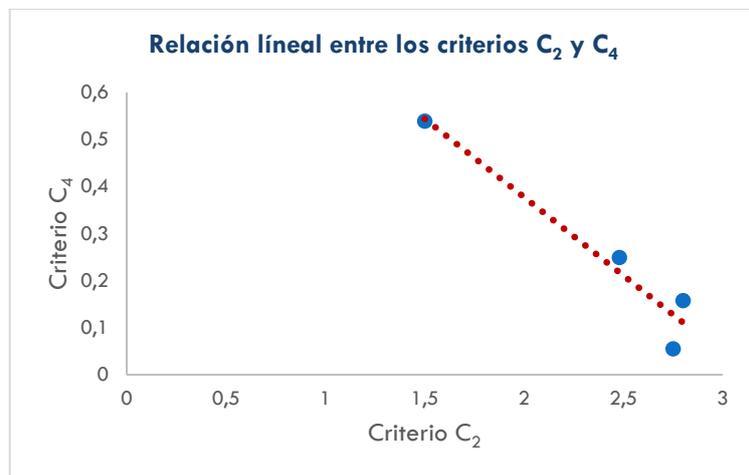
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.2. Correlación lineal entre los criterios C₁ y C₄, en selección de tipologías de muros



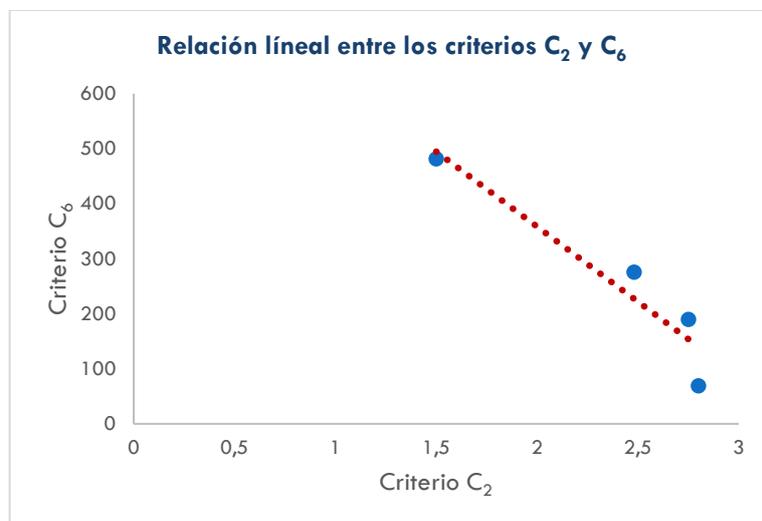
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.3. Correlación lineal entre los criterios C_2 y C_4 , en selección de tipologías de muros



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.4. Correlación lineal entre los criterios C_2 y C_6 , en selección de tipologías de muros



Fuente: Elaboración propia

Las gráficas anteriores, junto con la matriz de coeficientes de correlación, indican que existe correlación entre las variables de selección, por lo que se infiere la necesidad de utilizar un método de decisión que considere la correlación entre variables. Debido a ello, se aplica la metodología de selección indicada en el capítulo 4, método VIKOR modificado con la utilización de la distancia de Mahalanobis. El proceso a seguir será el siguiente:

- En primer lugar, se calculan los valores de Q_i del método VIKOR tradicional calculando los valores de S_i aplicando la distancia de Mahalanobis
- Posteriormente, se calculan los valores de Q_i calculando los valores de R_i aplicando la distancia de Mahalanobis.

Esto, permite obtener dos clasificaciones diferentes de las alternativas de tipologías que son comparados con el ranking obtenido con el método VIKOR tradicional. Se incluyen, en la tabla siguiente, los resultados tras aplicar el método VIKOR modificado según las ecuaciones (4.3) y (4.4), y lo descrito en el epígrafe 4.1.

Tabla 5.4. Resultados método VIKOR modificado, S_i distancia de Mahalanobis, selección tipologías muros de contención

	S_i (distancia Mahalanobis)	R_i	Q_i	Clasificación (posición)
Muro de Hormigón Armado	0,31660	0,20441	1,00000	4
Muro Jardinera	0,30070	0,11856	0,56491	3
Muro Vegetal	0,15487	0,13561	0,19068	2
Muro de Escollera	0,18364	0,09320	0,08894	1

Fuente: Elaboración propia.

Si se analizan los resultados, según las dos condiciones del método VIKOR, para que las soluciones obtenidas sean aceptables y estables, que son las siguientes:

- Condición 1: Ventaja aceptable.

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

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

La alternativa A (1) también será la mejor clasificada de acuerdo con la lista de valores de S y/o R. Esta solución de compromiso es estable en un proceso de toma de decisiones.

Se debe recordar, que si no se cumple alguna de las condiciones, el método sugiere un conjunto de soluciones de compromiso, que puede consistir en: Alternativas A(1) y A(2), si no se cumple la condición 2; Alternativas A(1), A(2),..., A(M), si no se cumple la condición 1; A(M) se establecerá teniendo en cuenta la relación $Q(A(M)) - Q(A(1)) < DQ$. Estas alternativas se consideran dentro de la "cercanía a la solución ideal".

La solución mejor clasificada es la solución de muro de escollera, al obtenerse el valor más bajo de Q_i , sin embargo, si se observa el valor de Q_i de la segunda alternativa mejor clasificada, muro vegetal, no se cumple la condición (1) de ventaja aceptable, al ser en este caso el valor de $DQ = 0,3333$, por lo cual, la solución al problema de selección es un conjunto de soluciones de compromiso formado por las alternativas 4 y 3, y que serían el caso de muro de escollera y de muro vegetal, respectivamente. Nótese que, en cualquier caso, la alternativa de muro de escollera sí cumple la condición (2) de estabilidad aceptable, al ser la opción mejor clasificada según la lista de valores de R, aunque no es así según la lista de S, (que lo es la alternativa de muro vegetal). Esto reafirma que el conjunto de soluciones de compromiso propuesto es estable, y formado por las alternativas “más cercanas” a la solución ideal.

Si se incluyen en una tabla los resultados obtenidos, al aplicar el método de VIKOR modificado, al aplicar la distancia de Mahalanobis para el cálculo de R_i , manteniendo el cálculo de S_i , según el método VIKOR tradicional, se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 5.5. Resultados método VIKOR modificado, R_i distancia de Mahalanobis, selección tipologías muros de contención

	S_i	R_i (distancia Mahalanobis)	Q_i	Clasificación (posición)
Muro de Hormigón Armado	0,66266	0,31660	1,00000	4
Muro Jardinera	0,47553	0,30070	0,70309	3
Muro Vegetal	0,29735	0,15487	0,01632	1
Muro de Escollera	0,28503	0,18364	0,08894	2

Fuente: Elaboración propia.

En este caso, la solución mejor clasificada es la solución de muro vegetal, al obtenerse el valor más bajo de Q_i , pero igual que en el caso anterior, si se observa el valor de Q_i de la segunda alternativa mejor clasificada, muro escollera, no se cumple la condición (1) de ventaja aceptable. La solución al problema de selección es un conjunto de soluciones de compromiso formado por las alternativas 3 y 4, muro vegetal y muro de escollera, respectivamente. La alternativa de muro vegetal sí cumple la condición (2) de estabilidad aceptable, al ser la opción mejor clasificada según la lista de valores de R, aunque no así según la lista de S, que lo es la alternativa de muro escollera, lo que reafirma que el conjunto de soluciones de compromiso propuesto es estable.

En el primer caso, se tiene en cuenta el comportamiento individual y la utilidad de la mayoría en el cálculo de los valores de Q_i , al calcularse R_i a partir de la distancia de Chebyshev, que considera solo el máximo del valor de la diferencia de las coordenadas, o valoraciones de cada alternativa para cada criterio de selección, respecto a los elementos de la solución ideal. Mientras que en el segundo caso se prima en la decisión la utilidad de la mayoría, al ser, a su vez, los dos componentes de la suma que conforman los valores Q_i un sumatorio de la diferencia de las coordenadas de cada alternativa respecto a las coordenadas

de la solución ideal. Esto hace que no se prime, en ningún sumando, el comportamiento individual de un elemento de una alternativa respecto al resto.

A continuación, se incluyen los resultados de aplicar el método VIKOR tradicional a la selección de tipologías de muros de contención, obviando la correlación de variables.

Tabla 5.6. Resultados método VIKOR tradicional, selección tipologías muros de contención

	S_i	R_i	Q_i	Clasificación (posición)
Muro de Hormigón Armado	0,66266	0,20441	1,00000	4
Muro Jardinera	0,47553	0,11856	0,36627	3
Muro Vegetal	0,29735	0,13561	0,20699	2
Muro de Escollera	0,28503	0,09320	0,00000	1

Fuente: Elaboración propia.

En este caso, la solución mejor clasificada es la solución de muro de escollera, al obtenerse el valor más bajo de Q_i , al igual que en el caso del método VIKOR modificado calculando S_i por la distancia Mahalanobis. Al no cumplirse la condición (1) de ventaja aceptable, la solución al problema de selección también es un conjunto de soluciones de compromiso formado por las alternativas 4 y 3, muro de escollera y muro vegetal. La alternativa de muro de escollera es la alternativa con menor valor de S_i y R_i . Según esto, no se habrían obtenido resultados muy diferentes a considerar la correlación entre variables y no considerarla, por lo cual, estos resultados hay que contrastarlos con otro caso de estudio, en el cual haya un número mayor de requerimientos o criterios de selección y de alternativas. El cálculo, con estos condicionantes, se realiza en el epígrafe siguiente. Por otra parte, es necesario estudiar, a través del análisis de sensibilidad, cómo se comportan las soluciones obtenidas ante cambios en la ponderación de los criterios si no se considera la correlación de variables o, por el contrario, sí se hace. Para ello a continuación se analizan los cambios en la clasificación de alternativas y se determinan los criterios con mayor sensibilidad.

5.1.1.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA SELECCIÓN TIPOLOGÍAS DE MUROS DE CONTENCIÓN

Como se ha descrito en el epígrafe 4.3, para determinar la sensibilidad de la metodología desarrollada se modifica el peso de cada criterio (incrementándose y disminuyéndose) en un pequeño porcentaje, 5%, igualmente se modifica (incrementándose y disminuyendo) en un gran porcentaje (50%), y, por último, en un 95% (cambio muy grande), manteniendo constantes el peso del resto de los criterios. Pero hay que tener en cuenta que las ponderaciones de los diferentes criterios se incrementan o disminuyen según proceda, y en la misma medida, para mantener que la suma de los pesos de todos los criterios sigue siendo igual a 1. De esta forma, se pueden calcular los coeficientes relativos de sensibilidad de cada criterio como el número de cambios en la clasificación de alternativas debido al cambio

(pequeño, gran porcentaje o cambio muy grande) en las ponderaciones de los criterios. Como se ha indicado anteriormente, se ha utilizado MATLAB®, para la programación del análisis de sensibilidad.

En las tablas siguientes se incluyen el número de cambios que se producen en la clasificación de alternativas cuando se incrementa o disminuye un 5%, 50% y 95% cada criterio de selección, tanto en la aplicación del método VIKOR tradicional como en la aplicación del método VIKOR modificado, para el cálculo de S o R con la distancia de Mahalanobis. De manera que esto permite comparar la sensibilidad de la metodología desarrollada y determinar el criterio que produce el mayor número de cambios en la clasificación, que es el criterio con mayor sensibilidad relativa. Es necesario analizar, no solo el número de cambios en la clasificación de alternativas sino también cambios en el conjunto de soluciones de compromiso.

Tabla 5.7. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR modificado S -Mahalanobis, selección tipologías muros de contención

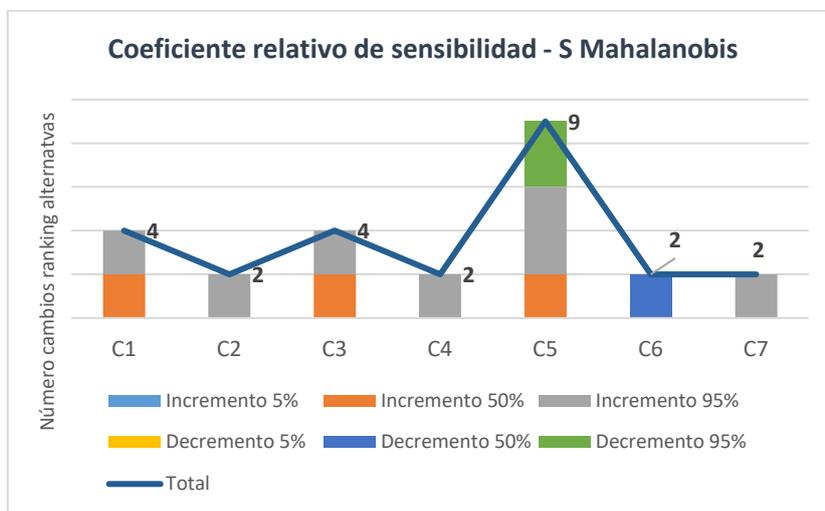
Porcentaje	Método VIKOR modificado S Mahalanobis											
	Incremento						Decremento					
	5%		50%		95%		5%		50%		95%	
Criterio	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso
C1	0	No	2	Sí	2	Sí	0	No	0	No	0	No
C2	0	No	0	No	2	No	0	No	0	No	0	No
C3	0	No	2	No	2	No	0	No	0	No	0	No
C4	0	No	0	Sí	2	Sí	0	No	0	No	0	No
C5	0	No	2	No	4	No	0	No	0	Sí	3	Sí
C6	0	No	0	No	0	No	0	No	2	Sí	0	Sí
C7	0	No	0	Sí	2	Sí	0	No	0	No	0	No

Fuente: Elaboración propia

Si se analizan los resultados incluidos en la tabla 5.7, lo primero que se observa es que para cambios pequeños en la ponderación de los criterios (5%) las soluciones obtenidas y la clasificación de alternativas no sufren ningún cambio, siendo estable la solución. No es hasta cambios grandes en la ponderación (50%), o cambios muy grandes (95%), para los cuales se producen cambios en el ranking de alternativas o en el conjunto de soluciones de compromiso. Respecto a cambios en el conjunto de soluciones de compromiso, hay que destacar un aspecto significativo, y es que estos solo se producen en 10 ocasiones frente a las 13 veces en las que ocurre en el método VIKOR tradicional, como se verá más adelante. De estos 10 cambios, en el conjunto de soluciones de compromiso, solo en 4 ocasiones ocurren sin cambio en la clasificación de alternativas.

Por otra parte, el criterio C_5 , *generación de residuos de construcción y demolición* es el criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad, ya que este criterio provoca mayor número de cambios en la clasificación de alternativas. Si se representan gráficamente los datos de la tabla 5.7, se obtiene el siguiente gráfico.

Figura 5.5. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR modificado S-Mahalanobis, en selección de tipologías de muros



Fuente: Elaboración propia

Se incluyen en la tabla 5.8 los resultados del análisis de sensibilidad del método VIKOR modificado para el cálculo de *R* con la distancia de Mahalanobis.

Tabla 5.8. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR modificado R-Mahalanobis, selección tipologías muros de contención

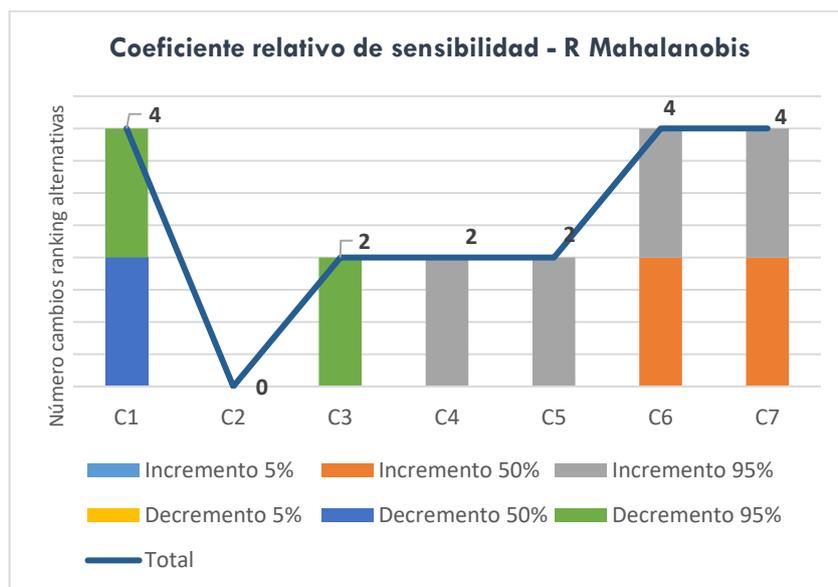
Porcentaje	Método VIKOR modificado R Mahalanobis											
	Incremento						Decremento					
	5%		50%		95%		5%		50%		95%	
Criterio	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso
C1	0	No	0	No	0	No	0	No	2	No	2	No
C2	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No
C3	0	No	2	No								
C4	0	No	0	No	2	No	0	No	0	No	0	No
C5	0	No	0	No	2	No	0	No	0	Sí	0	Sí
C6	0	No	2	No	2	No	0	No	0	No	0	No
C7	0	No	2	No	2	No	0	No	0	No	0	No

Fuente: Elaboración propia

A partir del análisis de los datos de la tabla anterior se puede indicar que, como en el caso anterior, para cambios pequeños en la ponderación de los criterios (5%) las soluciones obtenidas y la clasificación de alternativas no sufren ningún cambio, siendo estable la solución. Se producen modificaciones en el ranking de alternativas para cambios grandes en la ponderación (50%) o cambios muy grandes (95%). Respecto a cambios en el conjunto de soluciones de compromiso, hay que destacar un aspecto significativo, y es que estos solo se producen en 2 ocasiones frente a las 13 veces en las que ocurre en el método VIKOR tradicional, y en todos los casos ocurren sin cambio en la clasificación de alternativas.

Por otra parte, en este caso son los criterios C_1 , *coste de construcción*, C_6 , *emisiones de GEI*, y C_7 , *costes mantenimiento anual*, los criterios con mayor coeficiente relativo de sensibilidad, como se observa en la siguiente gráfica.

Figura 5.6. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR modificado R-Mahalanobis, en selección de tipologías de muros



Fuente: Elaboración propia

Si se comparan estos resultados con los obtenidos con el método VIKOR tradicional, se observan algunas diferencias notables. A continuación, se incluyen los resultados obtenidos con el método VIKOR tradicional.

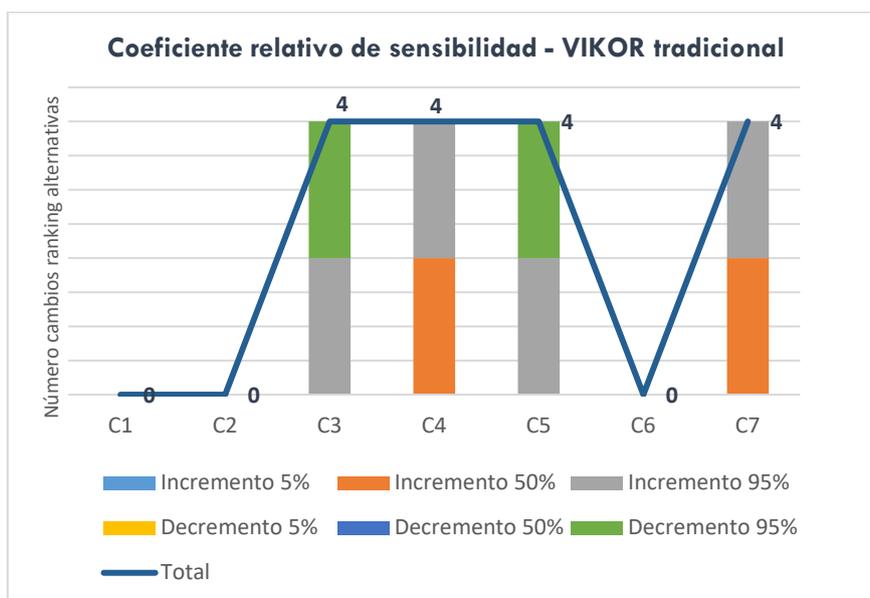
Tabla 5.9. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR tradicional, selección tipologías muros de contención

Porcentaje	Método VIKOR tradicional											
	Incremento						Decremento					
	5%		50%		95%		5%		50%		95%	
Criterio	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso
C1	0	No	0	No	0	Sí	0	No	0	No	0	No
C2	0	No	0	Sí	0	Sí	0	No	0	No	0	No
C3	0	No	0	No	2	No	0	No	0	Sí	2	Sí
C4	0	No	2	Sí	2	Sí	0	No	0	No	0	No
C5	0	No	0	No	2	No	0	No	0	Sí	2	Sí
C6	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No
C7	0	No	2	Sí	2	Sí	0	No	0	Sí	0	Sí

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior, se puede observar que, con la aplicación del método VIKOR tradicional, que no tiene en cuenta la correlación entre variables, el número de cambios totales en la clasificación de alternativas cuando varía la ponderación de los criterios un 50% ó 95%, es menor, 12 en total, frente a los obtenidos en los casos anteriores. Sin embargo, el número de cambios en el conjunto de soluciones de compromiso es muy superior: 13, frente a 10 en el caso del método VIKOR modificado, S-Mahalanobis, y 2 en el caso del método VIKOR modificado, R-Mahalanobis. En este caso de estudio, con el método VIKOR tradicional no se puede establecer un criterio o criterios con mayor coeficiente relativo de sensibilidad, ya que 4 criterios obtienen el mismo coeficiente relativo de sensibilidad. Estos criterios son C₃, *integración paisajística*, C₄, *cultura y costumbre*, C₅, *emisiones de GEI*, y C₇, *coste de mantenimiento anual*, y el resto de criterios tienen un coeficiente relativo de sensibilidad nulo. Esto se puede apreciar en el siguiente gráfico.

Figura 5.7. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR tradicional, en selección de tipologías de muros



Fuente: Elaboración propia

5.1.2. APARCAMIENTOS DISUASORIOS

Como se ha indicado anteriormente, la metodología desarrollada y descrita en el capítulo 4, y como parte de la investigación desarrollada para la presente tesis, se aplica a dos casos de estudio: el primero a selección de muros de contención y el segundo a la selección de la localización de aparcamientos disuasorios, teniendo en cuenta, en ambos casos, requisitos de sostenibilidad. En el epígrafe anterior se han descrito los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología a la selección tipologías de muros de contención, y a continuación se exponen los resultados obtenidos para la selección sostenible de aparcamientos disuasorios.

En la descripción del caso de estudio, se han definido las alternativas y los criterios de selección y se ha determinado la matriz de decisión, tabla 4.31, para la selección de aparcamientos disuasorios. Una vez definida la matriz de decisión es necesario determinar el vector de pesos a partir el *método de entropía*, y tal como se ha descrito anteriormente. Para ello, en primer lugar, se normaliza la matriz de decisión con el objetivo de eliminar el efecto de las diferentes unidades y convertir los valores de la matriz de decisión en valores comprendidos entre [0,1], según las ecuaciones (3.27) y (3.28), método de normalización lineal (máximo-mínimo). A continuación, según las ecuaciones de (3.29) a (3.31), se calcula el peso de cada criterio, asignando a aquellos criterios que muestran menor entropía, o lo que es lo mismo mayor dispersión o desviación, un peso mayor, y viceversa. Los resultados se incluyen a continuación en la tabla siguiente.

Tabla 5.10. Vector de pesos criterios de decisión de aparcamientos disuasorios, método de entropía

Reducción emisiones (CO ₂) en el centro	Reducción emisiones (NOx) en el centro	Eficiencia energética: ahorro en toneladas equivalentes de petróleo	Emisiones tCO ₂ /año explotación aparcamiento	Ocupación suelo aparcamiento superficie parcela	Ocupación suelo no utilizada en centro	Coste construcción	Coste terreno parcela aparcamiento	Coste anual explotación aparcamiento
C ₁ W ₁	C ₂ W ₂	C ₃ W ₃	C ₄ W ₄	C ₅ W ₅	C ₆ W ₆	C ₇ W ₇	C ₈ W ₈	C ₉ W ₉
0,08240	0,08240	0,08240	0,03138	0,04598	0,11938	0,02875	0,02461	0,03089

Número de plazas aparcamiento	Población adyacente	Demanda prevista /Ocupación prevista	Intensidad tráfico corredor de entrada (IMD)	Pérdida media de tiempo por congestión corredor entrada (min/día)	Intermodalidad: red de TP	Proximidad a carril bici	Accidentalidad corredor de entrada	Mejora calidad de vida - percepción usuario
C ₁₀ W ₁₀	C ₁₁ W ₁₁	C ₁₂ W ₁₂	C ₁₃ W ₁₃	C ₁₄ W ₁₄	C ₁₅ W ₁₅	C ₁₆ W ₁₆	C ₁₇ W ₁₇	C ₁₈ W ₁₈
0,08326	0,04052	0,10347	0,04918	0,00891	0,06624	0,02305	0,03781	0,05937

Fuente: Elaboración propia

Una vez determinado el vector de pesos, de los diferentes criterios de selección, continuando con el proceso de decisión, es necesario determinar si existe correlación entre las

variables de decisión. La razón de esto es establecer el método de decisión a aplicar, el método VIKOR modificado o el método VIKOR tradicional. Para determinar la correlación entre variables se calcula el coeficiente de Pearson y los niveles de significancia de los valores obtenidos, de esta forma, los resultados se exponen a continuación.

Tabla 5.11. Coeficientes de correlación matriz decisión aparcamientos disuasorios

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈
C ₁	1,0000	1,0000	1,0000	0,6719	-0,3640	0,9236	0,6039	-0,2174	0,6473	0,1118	-0,1068	0,9236	-0,2899	-0,3858	0,5735	0,2400	0,6496	0,3409
C ₂	1,0000	1,0000	1,0000	0,6719	-0,3640	0,9236	0,6039	-0,2174	0,6473	0,1118	-0,1068	0,9236	-0,2899	-0,3858	0,5735	0,2400	0,6496	0,3409
C ₃	1,0000	1,0000	1,0000	0,6719	-0,3640	0,9236	0,6039	-0,2174	0,6473	0,1118	-0,1068	0,9236	-0,2899	-0,3858	0,5735	0,2400	0,6496	0,3409
C ₄	0,6719	0,6719	0,6719	1,0000	-0,3378	0,7348	0,9633	-0,3450	0,9893	0,3343	-0,5203	0,7348	-0,4544	-0,4619	0,4353	-0,2072	0,4459	0,3378
C ₅	-0,3640	-0,3640	-0,3640	-0,3378	1,0000	-0,2859	-0,1525	0,7083	-0,2205	0,6222	-0,3704	-0,2859	-0,4817	-0,1240	-0,7382	0,1545	-0,5281	-0,3299
C ₆	0,9236	0,9236	0,9236	0,7348	-0,2859	1,0000	0,7066	-0,3106	0,7267	0,2441	-0,1625	1,0000	-0,2500	-0,5059	0,4572	0,3666	0,7507	0,2990
C ₇	0,6039	0,6039	0,6039	0,9633	-0,1525	0,7066	1,0000	-0,3074	0,9871	0,5425	-0,5827	0,7066	-0,5352	-0,4924	0,2917	-0,1750	0,3981	0,2545
C ₈	-0,2174	-0,2174	-0,2174	-0,3450	0,7083	-0,3106	-0,3074	1,0000	-0,3102	0,0859	-0,2249	-0,3106	-0,5588	-0,0092	-0,5053	-0,0268	-0,7051	-0,1355
C ₉	0,6473	0,6473	0,6473	0,9893	-0,2205	0,7267	0,9871	-0,3102	1,0000	0,4681	-0,5862	0,7267	-0,5167	-0,4813	0,3562	-0,1858	0,4255	0,2705
C ₁₀	0,1118	0,1118	0,1118	0,3343	0,6222	0,2441	0,5425	0,0859	0,4681	1,0000	-0,6357	0,2441	-0,5861	-0,3121	-0,3357	0,0545	0,0481	-0,2992
C ₁₁	-0,1068	-0,1068	-0,1068	-0,5203	-0,3704	-0,1625	-0,5827	-0,2249	-0,5862	-0,6357	1,0000	-0,1625	0,6534	0,5065	0,2785	0,3978	0,0149	0,2110
C ₁₂	0,9236	0,9236	0,9236	0,7348	-0,2859	1,0000	0,7066	-0,3106	0,7267	0,2441	-0,1625	1,0000	-0,2500	-0,5059	0,4572	0,3666	0,7507	0,2990
C ₁₃	-0,2899	-0,2899	-0,2899	-0,4544	-0,4817	-0,2500	-0,5352	-0,5588	-0,5167	-0,5861	0,6534	-0,2500	1,0000	0,3862	0,1772	0,0994	0,2715	-0,0774
C ₁₄	-0,3858	-0,3858	-0,3858	-0,4619	-0,1240	-0,5059	-0,4924	-0,0092	-0,4813	-0,3121	0,5065	-0,5059	0,3862	1,0000	-0,0483	-0,3025	-0,3667	-0,1085
C ₁₅	0,5735	0,5735	0,5735	0,4353	-0,7382	0,4572	0,2917	-0,5053	0,3562	-0,3357	0,2785	0,4572	0,1772	-0,0483	1,0000	-0,0022	0,5143	0,4954
C ₁₆	0,2400	0,2400	0,2400	-0,2072	0,1545	0,3666	-0,1750	-0,0268	-0,1858	0,0545	0,3978	0,3666	0,0994	-0,3025	-0,0022	1,0000	0,3896	-0,0033
C ₁₇	0,6496	0,6496	0,6496	0,4459	-0,5281	0,7507	0,3981	-0,7051	0,4255	0,0481	0,0149	0,7507	0,2715	-0,3667	0,5143	0,3896	1,0000	0,0751
C ₁₈	0,3409	0,3409	0,3409	0,3378	-0,3299	0,2990	0,2545	-0,1355	0,2705	-0,2992	0,2110	0,2990	-0,0774	-0,1085	0,4954	-0,0033	0,0751	1,0000

Fuente: Elaboración propia

Los elementos señalados en azul de la tabla 5.11 indican una correlación fuerte entre las variables. Además, entre los criterios C₁, C₂ y C₃, existe una correlación perfecta positiva. A continuación, se incluye la tabla de significancia que indica la probabilidad de que la correlación no se deba al azar.

Tabla 5.12. Nivel de significancia de correlación entre variables, matriz decisión aparcamientos disuasorios

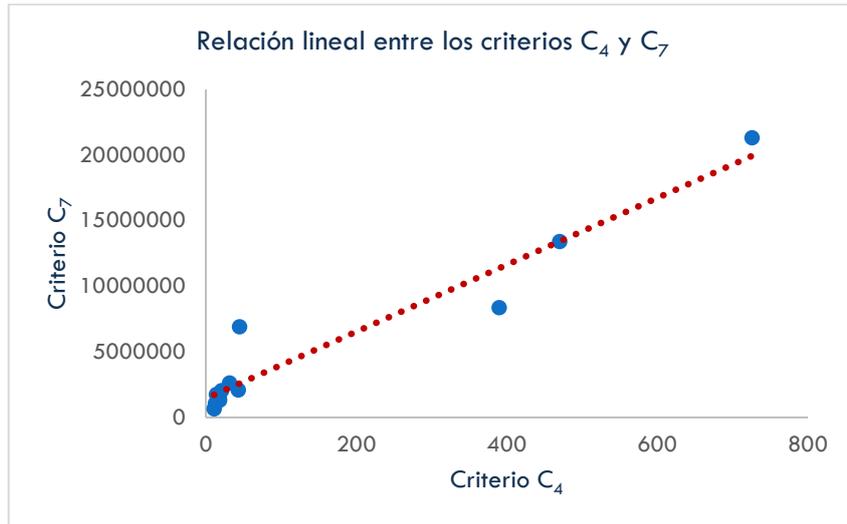
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈
C ₁	1,0000	0,0000	0,0000	0,0167	0,2448	0,0000	0,0376	0,4973	0,0229	0,7293	0,7411	0,0000	0,3608	0,2154	0,0512	0,4525	0,0222	0,2783
C ₂	0,0000	1,0000	0,0000	0,0167	0,2448	0,0000	0,0376	0,4973	0,0229	0,7293	0,7411	0,0000	0,3608	0,2154	0,0512	0,4525	0,0222	0,2783
C ₃	0,0000	0,0000	1,0000	0,0167	0,2448	0,0000	0,0376	0,4973	0,0229	0,7293	0,7411	0,0000	0,3608	0,2154	0,0512	0,4525	0,0222	0,2783
C ₄	0,0167	0,0167	0,0167	1,0000	0,2828	0,0065	0,0000	0,2721	0,0000	0,2883	0,0829	0,0065	0,1378	0,1306	0,1573	0,5182	0,1463	0,2828
C ₅	0,2448	0,2448	0,2448	0,2828	1,0000	0,3676	0,6361	0,0099	0,4910	0,0307	0,2360	0,3676	0,1128	0,7010	0,0061	0,6317	0,0776	0,2950
C ₆	0,0000	0,0000	0,0000	0,0065	0,3676	1,0000	0,0102	0,3259	0,0074	0,4445	0,6139	0,0000	0,4333	0,0933	0,1351	0,2412	0,0049	0,3451
C ₇	0,0376	0,0376	0,0376	0,0000	0,6361	0,0102	1,0000	0,3310	0,0000	0,0684	0,0468	0,0102	0,0729	0,1039	0,3575	0,5864	0,2000	0,4247
C ₈	0,4973	0,4973	0,4973	0,2721	0,0099	0,3259	0,3310	1,0000	0,3264	0,7908	0,4821	0,3259	0,0589	0,9775	0,0938	0,9341	0,0104	0,6745
C ₉	0,0229	0,0229	0,0229	0,0000	0,4910	0,0074	0,0000	0,3264	1,0000	0,1249	0,0452	0,0074	0,0854	0,1131	0,2558	0,5631	0,1679	0,3952
C ₁₀	0,7293	0,7293	0,7293	0,2883	0,0307	0,4445	0,0684	0,7908	0,1249	1,0000	0,0263	0,4445	0,0452	0,3233	0,2860	0,8665	0,8820	0,3448
C ₁₁	0,7411	0,7411	0,7411	0,0829	0,2360	0,6139	0,0468	0,4821	0,0452	0,0263	1,0000	0,6139	0,0212	0,0929	0,3808	0,2004	0,9633	0,5103
C ₁₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0065	0,3676	0,0000	0,0102	0,3259	0,0074	0,4445	0,6139	1,0000	0,4333	0,0933	0,1351	0,2412	0,0049	0,3451
C ₁₃	0,3608	0,3608	0,3608	0,1378	0,1128	0,4333	0,0729	0,0589	0,0854	0,0452	0,0212	0,4333	1,0000	0,2150	0,5816	0,7585	0,3933	0,8111
C ₁₄	0,2154	0,2154	0,2154	0,1306	0,7010	0,0933	0,1039	0,9775	0,1131	0,3233	0,0929	0,0933	0,2150	1,0000	0,8816	0,3393	0,2411	0,7372
C ₁₅	0,0512	0,0512	0,0512	0,1573	0,0061	0,1351	0,3575	0,0938	0,2558	0,2860	0,3808	0,1351	0,5816	0,8816	1,0000	0,9945	0,0872	0,1014
C ₁₆	0,4525	0,4525	0,4525	0,5182	0,6317	0,2412	0,5864	0,9341	0,5631	0,8665	0,2004	0,2412	0,7585	0,3393	0,9945	1,0000	0,2106	0,9919
C ₁₇	0,0222	0,0222	0,0222	0,1463	0,0776	0,0049	0,2000	0,0104	0,1679	0,8820	0,9633	0,0049	0,3933	0,2411	0,0872	0,2106	1,0000	0,8167
C ₁₈	0,2783	0,2783	0,2783	0,2828	0,2950	0,3451	0,4247	0,6745	0,3952	0,3448	0,5103	0,3451	0,8111	0,7372	0,1014	0,9919	0,8167	1,0000

Fuente: Elaboración propia

La tabla 5.12 indica que las variables correlacionadas, según la tabla 5.11, tienen un nivel de significancia inferior a 0,05, por lo cual, se puede decir que la correlación entre variables no se debe al azar.

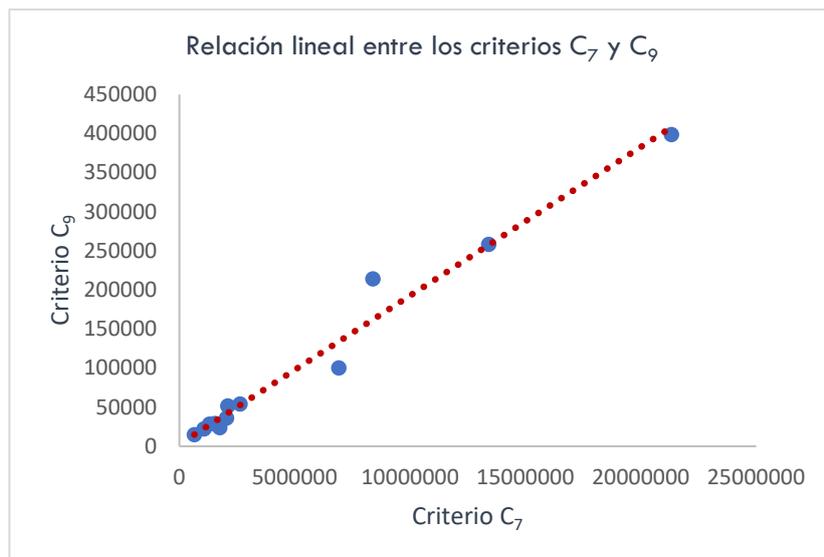
Si se representa gráficamente la relación entre algunos de los criterios que están fuertemente correlacionados, se puede apreciar esta relación lineal.

Figura 5.8. Correlación lineal entre los criterios C_4 y C_7 , en selección de aparcamientos disuasorios



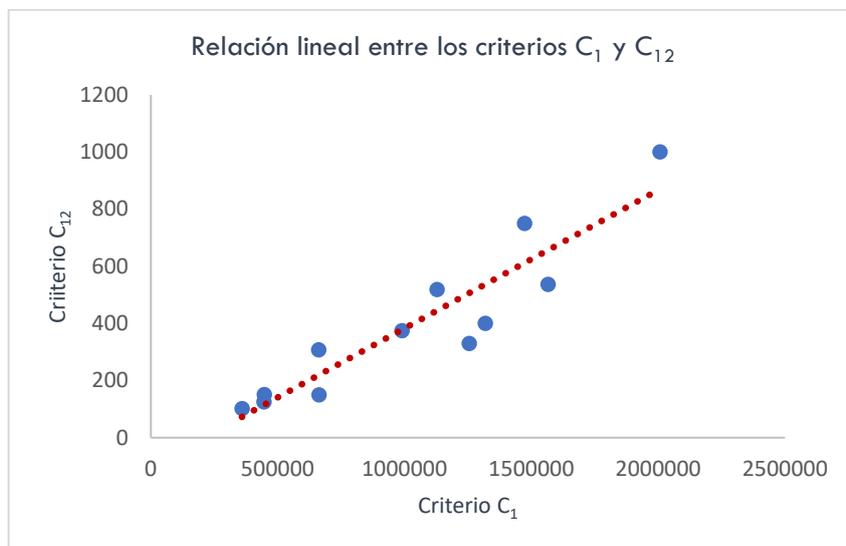
Fuente: Elaboración propia

Figura 5.9. Correlación lineal entre los criterios C_7 y C_9 , en selección de aparcamientos disuasorios



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.10. Correlación lineal entre los criterios C_7 y C_9 , en selección de aparcamientos disuasorios



Fuente: Elaboración propia

Las tablas 5.11 y 5.12, junto con las gráficas de 5.8 a 5.10, indican que existe correlación entre variables, lo que hace necesario aplicar en el proceso de decisión un método que considere esta correlación. Al igual que se ha realizado en el caso de estudio de selección de tipologías de muros de contención, se aplica la metodología de selección indicada en el capítulo 4, método VIKOR modificado con la utilización de la distancia de Mahalanobis. Para ello, en primer lugar, se calculan los valores de Q_i del método VIKOR tradicional calculando los valores de S_i aplicando la distancia de Mahalanobis y posteriormente, se calculan los valores de Q_i calculando los valores de R_i aplicando la distancia de Mahalanobis. Esto permite obtener dos clasificaciones diferentes de las alternativas de aparcamientos disuasorios, que son comparados con el ranking obtenido con el método VIKOR tradicional. A continuación, se incluyen los resultados tras aplicar el método VIKOR modificado, según las ecuaciones (4.3) y (4.4), y lo descrito en el epígrafe 4.1.

Tabla 5.13. Resultados método VIKOR modificado, S_i distancia de Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios

Alternativas	S_i (distancia Mahalanobis)	R_i	Q_i	Clasificación (según Q_i)	Clasificación de alternativas
Pitis (1)	1.4990	0.1194	0.7742	8	Alternativa 10
Paco de Lucía (2)	1.6879	0.1191	0.9478	12	Alternativa 5
Fuente de la Mora (3)	1.6053	0.1055	0.7807	9	11
Valdebebas (4)	1.7419	0.1109	0.9434	11	12
Canillejas (5)	1.2685	0.0632	0.1868	2	6
Estadio Olímpico (6)	1.2040	0.0978	0.3567	5	9
Santa Eugenia (7)	1.4348	0.0946	0.5497	7	7
San Cristóbal (8)	1.7007	0.1151	0.9334	10	1

Resultados

Villaverde Alto (9)	1.4742	0.0853	0.5247	6	3
Villaverde Bajo cruce (10)	1.2483	0.0555	0.1169	1	8
Aviación Española (11)	1.4520	0.0478	0.2550	3	4
Colonia Jardín (12)	1.5482	0.0441	0.3200	4	2

Fuente: Elaboración propia.

En este caso, al no cumplirse las condiciones del método VIKOR tradicional, condiciones 1) y 2), se propone como solución al problema de decisión un conjunto de soluciones de compromiso formado por la alternativa 10 y la alternativa 5. Hay que recordar que este conjunto de soluciones de compromiso cumple la condición de ser las más cercanas a la solución ideal. La medida de esta cercanía es una combinación de la distancia de Mahalanobis, que considera la correlación de las variables, y la distancia de Chebyshev que considera solo aquellas valoraciones de las diferentes alternativas para cada criterio de selección que es el máximo de la fila de la matriz de decisión, o que es lo mismo, solo se tiene en cuenta el criterio que determina la mayor distancia de cada alternativa a la solución ideal, primando de esta forma el comportamiento individual de cada criterio de selección frente a la utilidad de la mayoría.

Se incluyen los resultados obtenidos al aplicar la metodología de decisión del método VIKOR modificado al aplicar la distancia de Mahalanobis para el cálculo de R_i , manteniendo el cálculo de S_i , según el método VIKOR tradicional.

Tabla 5.14. Resultados método VIKOR modificado, R_i distancia de Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios

Alternativas	S_i	R_i (distancia Mahalanobis)	Q_i	Clasificación (según Q_i)	Clasificación de alternativas
Pitis (1)	0.5063	1.4990	0.5060	7	Alternativa 5
Paco de Lucía (2)	0.6700	1.6879	0.8461	10	Alternativa 10
Fuente de la Mora (3)	0.4738	1.6053	0.5722	9	12
Valdebebas (4)	0.7734	1.7419	1.0000	12	11
Canillejas (5)	0.3947	1.2685	0.1798	1	6
Estadio Olímpico (6)	0.6927	1.2040	0.4190	5	9
Santa Eugenia (7)	0.5816	1.4348	0.5220	8	1
San Cristóbal (8)	0.7059	1.7007	0.8940	11	7
Villaverde Alto (9)	0.4561	1.4742	0.4326	6	3
Villaverde Bajo cruce (10)	0.4489	1.2483	0.2154	2	2
Aviación Española (11)	0.3751	1.4520	0.3306	4	8
Colonia Jardín (12)	0.2754	1.5482	0.3200	3	4

Fuente: Elaboración propia.

En este caso, al primar la utilidad de la mayoría en ambos sumandos del cálculo del valor de Q_i , obtenemos como solución un conjunto de soluciones de compromiso formado las alternativas 5 y 10. Siendo la alternativa 5 la alternativa mejor clasificada según el valor de Q_i .

Resultados

Los resultados anteriores deben ser comparados con los obtenidos al aplicar el método VIKOR tradicional. Los valores obtenidos se han incluido en la tabla siguiente.

Tabla 5.15. Resultados método VIKOR tradicional, selección aparcamientos disuasorios

Alternativas	S_i	R_i	Q_i	Clasificación (según Q_i)	Clasificación de alternativas
Pitis (1)	0.5063	0.1194	0.7318	8	Alternativa 12
Paco de Lucía (2)	0.6700	0.1191	0.8942	10	11
Fuente de la Mora (3)	0.4738	0.1055	0.6069	6	5
Valdebebas (4)	0.7734	0.1109	0.9434	12	10
Canillejas (5)	0.3947	0.0632	0.2467	3	9
Estadio Olímpico (6)	0.6927	0.0978	0.7757	9	3
Santa Eugenia (7)	0.5816	0.0946	0.6426	7	7
San Cristóbal (8)	0.7059	0.1151	0.9040	11	1
Villaverde Alto (9)	0.4561	0.0853	0.4550	5	6
Villaverde Bajo cruce (10)	0.4489	0.0555	0.2500	4	2
Aviación Española (11)	0.3751	0.0478	0.1247	2	8
Colonia Jardín (12)	0.2754	0.0441	0.0000	1	4

Fuente: Elaboración propia.

Si se aplica el método VIKOR tradicional, es decir, sin considerar la correlación entre variables, se obtiene como solución al problema de decisión la alternativa 12, en solitario, al cumplirse las condiciones 1) y 2) de ventaja aceptable y estabilidad en el proceso de decisión. En este caso de estudio, si no se considera la correlación de variables, se adopta una solución al problema de decisión obviando otras soluciones que también resuelven el problema de decisión, al cumplir la condición de ser las más cercanas a la solución ideal.

5.1.2.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA SELECCIÓN DE APARCAMIENTOS DISUASORIOS.

Como se ha comentado anteriormente, el desarrollo y la aplicación de cualquier método de selección se debe completar con el análisis de sensibilidad para determinar la estabilidad de las soluciones obtenidas. Al igual que en el caso de estudio anterior, el análisis de sensibilidad realizado consiste en analizar cómo se comportan las soluciones obtenidas ante cambios en la ponderación de los criterios. Para ello, el peso de cada criterio se modifica (incrementándose y disminuyéndose) en un pequeño porcentaje, 5%, igualmente se modifica (incrementándose y disminuyendo) en un gran porcentaje (50%), y, por último, en un 95% (cambio muy grande), manteniendo constantes el peso del resto de los criterios. Este proceso también permite determinar el coeficiente relativo de sensibilidad de cada criterio de selección, a partir del número de cambios que se producen en la clasificación de alternativas al modificar la ponderación de dicho criterio.

En las tablas siguientes se incluyen los resultados obtenidos, para los cambios que se producen en la clasificación de alternativas cuando se incrementa o disminuye un 5%, un 50%

Resultados

y un 95% el peso de cada criterio de selección, tanto en la aplicación del método VIKOR tradicional como en la aplicación del método VIKOR modificado para el cálculo de S o R con la distancia de Mahalanobis.

Tabla 5.16. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR modificado S_i -Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios

Porcentaje	Método VIKOR modificado S-Mahalanobis											
	Incremento						Decremento					
	5%		50%		95%		5%		50%		95%	
Critería	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso
C1	4	No	8	No	9	Sí	2	No	11	Sí	9	Sí
C2	0	No	4	No	6	No	0	No	0	No	2	No
C3	0	No	4	No	6	No	0	No	0	No	2	No
C4	0	No	0	No	2	No	0	No	0	No	0	No
C5	2	No	9	No	12	No	2	No	6	Sí	11	Sí
C6	2	Sí	8	Sí	11	Sí	4	No	7	Sí	9	Sí
C7	0	No	7	Sí	8	Sí	2	No	4	No	10	Sí
C8	2	No	4	Sí	4	Sí	2	No	6	No	2	No
C9	0	No	4	No	11	Sí	0	No	2	No	6	Sí
C10	0	No	9	Sí	9	Sí	3	No	8	No	10	Sí
C11	0	No	4	No	5	Sí	0	No	2	No	4	No
C12	0	No	2	No	2	No	0	No	5	No	5	No
C13	2	No	8	No	9	No	0	No	11	No	11	Sí
C14	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No
C15	0	No	5	No	10	No	0	No	0	No	2	No
C16	0	No	4	Sí	6	Sí	0	No	7	No	6	No
C17	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No
C18	0	No	2	No	2	Sí	0	No	0	No	2	No

Fuente: Elaboración propia

Si se analizan los resultados del análisis de sensibilidad, incluidos en la tabla 5.16, se puede observar que para cambios pequeños en la ponderación de los criterios (5%) se producen un número reducido de cambios en la clasificación de alternativas, y solo en un caso, criterio C_6 , *Ocupación de suelo no utilizado en el centro*, se produce un cambio en el conjunto de soluciones de compromiso. Sin embargo, cuando se incrementa o disminuye en un porcentaje grande (50%) o muy grande (95%) el peso de los criterios de selección, sí se producen importantes cambios en la clasificación de alternativas. No obstante, en ningún caso las soluciones que conforman el conjunto de soluciones de compromiso se sitúan en una posición inferior al 6º puesto, en la clasificación de alternativas, situándose siempre en los cinco primeros puestos, salvo en un caso (6ª posición).

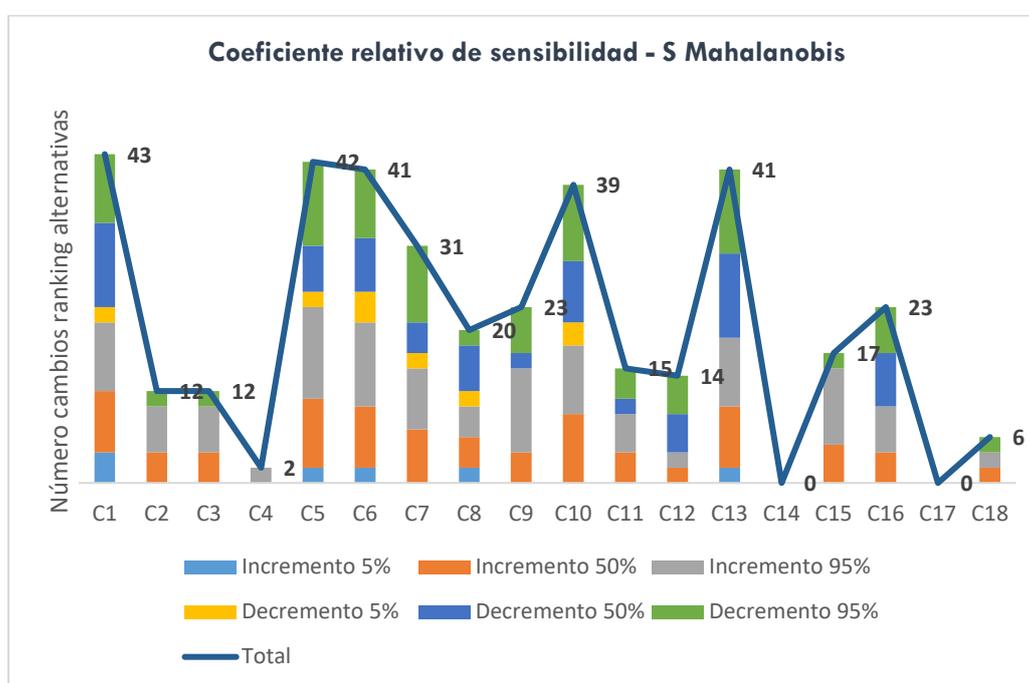
Si se repasan los resultados obtenidos para el coeficiente de correlación entre criterios, entre los criterios C_1 , *Reducción de emisiones de CO₂ en el centro*, C_2 , *Reducción de emisiones de NOx en el centro* y C_3 , *Eficiencia energética: ahorro en toneladas equivalentes de petróleo*, existe una correlación positiva perfecta. Al aplicar el método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis, para considerar la correlación entre variables, en el análisis de sensibilidad, estos criterios se comportan de forma diferente, lo que no ocurre en el método VIKOR tradicional, en el cual las clasificaciones obtenidas en el análisis de sensibilidad de estos tres criterios, son exactas al no considerar la correlación entre variables.

Resultados

Otro aspecto a destacar del análisis de sensibilidad es que, aunque con el método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis el número absoluto de cambios en la clasificación de alternativas es mayor que con el método VIKOR tradicional, como se verá más adelante, sin embargo, la relación entre el número de cambios en el conjunto de soluciones de compromiso respecto al número total de cambios en la clasificación de alternativas es menor en el caso del método VIKOR modificado, un 6,6% frente a un 7,4%.

Para determinar el criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad, se representan gráficamente los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad.

Figura 5.11. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR modificado S-Mahalanobis, en selección de aparcamientos disuasorios



Fuente: Elaboración propia

Se aprecia que el criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad es el criterio C₁, Reducción de emisiones de CO₂ en el centro, seguido de los criterios C₅, Ocupación suelo aparcamiento superficie parcela, y C₆, Ocupación suelo no utilizada en centro, y C₁₃, Intensidad tráfico corredor de entrada (IMD), estos dos últimos con el mismo coeficiente relativo de sensibilidad. Como quinto criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad, el criterio C₁₀, Número de plazas aparcamiento. Por otra parte, los criterios C₁₄, Pérdida media de tiempo por congestión corredor de entrada (min/día), y C₁₇, Accidentalidad en el corredor de entrada, presentan un coeficiente relativo de sensibilidad igual a cero. Esto significa, que en el proceso de decisión tienen gran importancia los cambios en la ponderación que pueden otorgar el decisor/los decisores a los criterios con mayor coeficiente de sensibilidad. Es necesario

Resultados

recordar que en este caso el peso de cada criterio se ha determinado por métodos objetivos, pero, en otros casos, los pesos de los criterios son asignados de forma subjetiva por el decisor. Por el contrario, cambios en la ponderación de los criterios C_{14} y C_{17} no van a influir en la solución del problema de decisión.

Si se analiza el análisis de sensibilidad, para el método VIKOR modificado, aplicando la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores R_i , es decir, primando la utilidad de la mayoría, se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 5.17. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR modificado R_i - Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios

Método VIKOR modificado R-Mahalanobis												
Porcentaje	Incremento						Decremento					
	5%		50%		95%		5%		50%		95%	
Criterio	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso
C1	0	No	8	Si	8	Si	2	No	8	Si	8	Si
C2	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No	2	No
C3	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No	2	No
C4	0	No	2	No	4	No	0	No	0	No	0	No
C5	0	No	7	Si	8	Si	2	No	8	Si	9	Si
C6	4	No	10	Si	11	Si	0	No	10	Si	9	Si
C7	0	No	5	Si	8	Si	2	No	5	No	7	Si
C8	2	No	2	No	3	Si	0	No	2	No	5	Si
C9	2	No	3	No	7	Si	0	No	0	No	2	No
C10	0	No	9	Si	10	Si	4	No	6	No	9	No
C11	0	No	2	No	7	No	0	No	4	No	4	No
C12	0	No	2	No	0	No	0	No	0	No	2	No
C13	2	No	5	No	8	Si	0	No	9	Si	8	Si
C14	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No
C15	0	No	2	No	5	No	0	No	0	No	2	No
C16	0	No	2	No	3	Si	0	No	2	No	5	No
C17	0	No	0	No	2	No	0	No	0	No	0	No
C18	0	No	2	No	4	No	0	No	0	No	0	No

Fuente: Elaboración propia

De la misma forma que en el caso anterior, si se analizan los resultados del análisis de sensibilidad incluidos en la tabla 5.17, se puede observar que para cambios pequeños en la ponderación de los criterios (5%) se producen un número reducido de cambios en la clasificación de alternativas, y en ningún caso, se produce un cambio en el conjunto de soluciones de compromiso. Sin embargo, cuando se incrementa o disminuye en un porcentaje grande (50%) o muy grande (95%) el peso de los criterios de selección, sí se producen importantes cambios en la clasificación de alternativas. No obstante, el número total de cambios es inferior al caso del método VIKOR modificado con la utilización de la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores de S_i . Esto implica que, si se prima la utilidad de la mayoría, se reduce la sensibilidad del método de decisión. Por otra parte, las soluciones que conforman el conjunto de soluciones de compromiso se sitúan siempre en una posición superior (5º puesto en la clasificación de alternativas), salvo en el caso de incremento del 95% del peso del criterio C_1 , en el que una de las alternativas, que conforman el conjunto de soluciones de compromiso, se sitúa en la 7ª posición. En la mayoría de los casos, las alternativas que conforman el conjunto de soluciones de compromiso en el problema de

Resultados

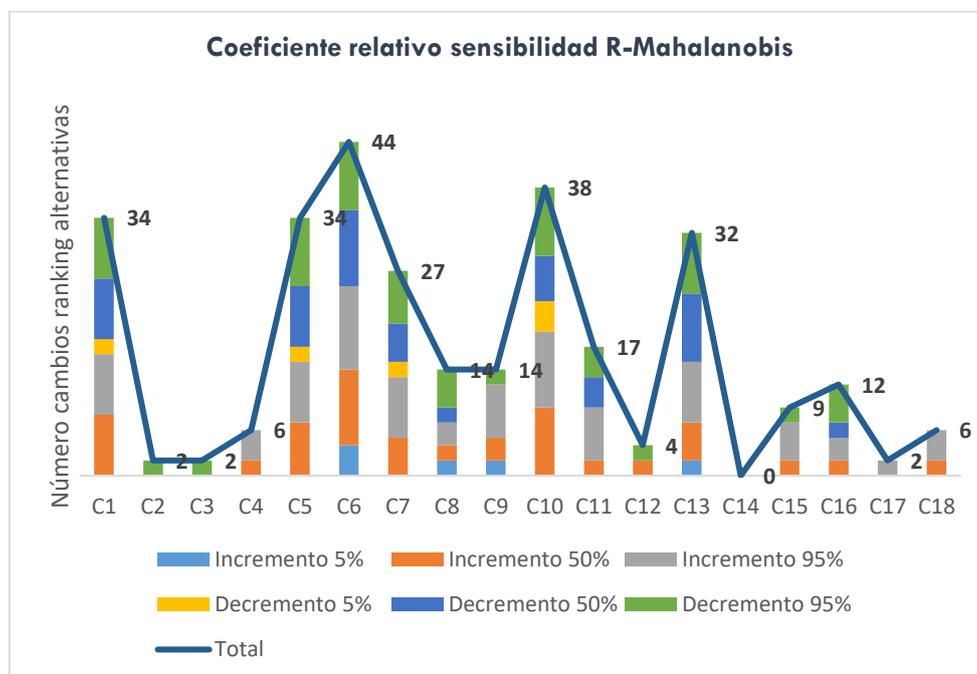
decisión se sitúan en los tres primeros puestos en todos los casos analizados en el análisis de sensibilidad.

Al igual que en el caso anterior, los criterios C_1 , *Reducción de emisiones de CO₂ en el centro*, C_2 , *Reducción de emisiones de NO_x en el centro* y C_3 , *Eficiencia energética: ahorro en toneladas equivalentes de petróleo*, que presentan una correlación positiva perfecta, se comportan de forma diferente en el análisis de sensibilidad al aplicar un método de decisión que considera la correlación entre variables.

En este caso, al ser menor el número total de cambios en la clasificación de alternativas y el número de cambios en la solución de compromiso muy parecido (24 frente a 25), la relación entre el número de cambios en el conjunto de soluciones de compromiso respecto al número total de cambios en la clasificación de alternativas es algo mayor, un 8,1%, por lo cual, está más próximo al método VIKOR tradicional.

El criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad es el criterio C_6 , *Ocupación suelo no utilizada en centro*, lo cual se puede apreciar con mayor claridad si se representan gráficamente los resultados del análisis de sensibilidad.

Figura 5.12. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR modificado R-Mahalanobis, en selección de aparcamientos disuasorios



Fuente: Elaboración propia

Resultados

Como se ha indicado, el criterio C_6 , *Ocupación suelo no utilizada en centro*, es el que presenta un mayor coeficiente relativo de sensibilidad, seguido de los criterios C_{10} , *Número de plazas aparcamiento*, y C_1 , *Reducción emisiones (CO₂) en el centro*, y C_5 , *Ocupación suelo aparcamiento superficie parcela*, estos dos últimos con el mismo coeficiente relativo de sensibilidad. En este caso, el criterio C_{13} , *Intensidad tráfico corredor de entrada (IMD)*, es el quinto criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad. Tanto en el método VIKOR modificado, con la aplicación de la distancia de Mahalanobis para el cálculo de S_i , como si se utiliza la distancia de Mahalanobis para el cálculo de R_i , los criterios con mayor coeficiente relativo de sensibilidad coinciden, aunque en orden diferente según se prima la utilidad de la mayoría o individual.

Al igual que en el caso anterior, los criterios C_{14} , *Pérdida media de tiempo por congestión corredor de entrada (min/día)*, y C_{17} , *Accidentalidad en el corredor de entrada*, son los criterios con un menor coeficiente relativo de sensibilidad. Aunque en este caso, también se incluyen los criterios C_2 , *Reducción emisiones (NO_x) en el centro*, y C_3 , *Eficiencia energética: ahorro en toneladas equivalentes de petróleo*.

Para poder comprobar cómo influye considerar la correlación entre variables, en el proceso de decisión, se incluyen los resultados del análisis de sensibilidad del método VIKOR tradicional. Para ello, como en los casos anteriores y, en primer lugar, se incluyen los cambios que se producen en la clasificación de alternativas y en las soluciones de compromiso cuando se incrementan o disminuyen los pesos de los criterios un 5%, 50% y 95%.

Tabla 5.18. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR tradicional, selección aparcamientos disuasorios

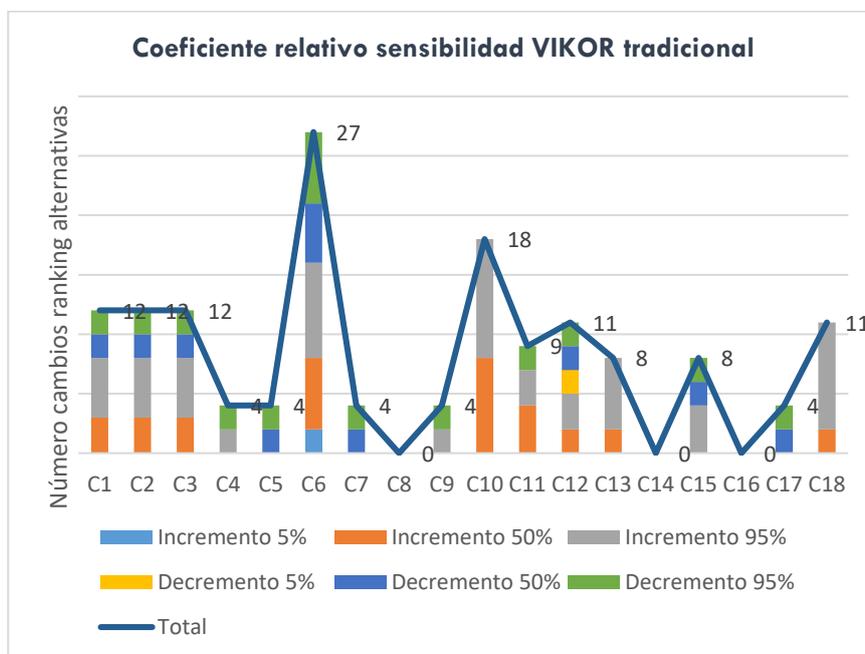
Porcentaje	Método VIKOR tradicional											
	Incremento						Decremento					
	5%		50%		95%		5%		50%		95%	
Critería	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso
C1	0	No	3	No	5	No	0	No	2	No	2	No
C2	0	No	3	No	5	No	0	No	2	No	2	No
C3	0	No	3	No	5	No	0	No	2	No	2	No
C4	0	No	0	Sí	2	Sí	0	No	0	No	2	No
C5	0	No	0	No	0	No	0	No	2	No	2	No
C6	2	No	6	No	8	No	0	No	5	No	6	Sí
C7	0	No	0	No	0	Sí	0	No	2	No	2	No
C8	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No
C9	0	No	0	No	2	Sí	0	No	0	No	2	No
C10	0	No	8	No	10	No	0	No	0	Sí	0	Sí
C11	0	No	4	Sí	3	Sí	0	No	0	No	2	No
C12	0	No	2	No	3	No	2	No	2	No	2	No
C13	0	No	2	Sí	6	Sí	0	No	0	No	0	No
C14	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No
C15	0	No	0	No	4	No	0	No	2	No	2	No
C16	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No
C17	0	No	0	No	0	No	0	No	2	No	2	No
C18	0	No	2	No	9	No	0	No	0	No	0	No

Fuente: Elaboración propia

A la vista de los resultados incluidos en la tabla 5.18, el análisis de sensibilidad del método VIKOR tradicional da como resultado un menor número de cambios en la clasificación de alternativas, al incrementar o disminuir los pesos de los diferentes criterios un 5%, 50% y 95%, respecto al método VIKOR modificado con la aplicación de la distancia de Mahalanobis. Sin embargo, la relación entre el número de cambios en la solución de compromiso y el número de cambios totales es un 7,4%, superior al obtenido con el método VIKOR modificado aplicando la distancia de Mahalanobis para el cálculo de S_i , y algo inferior al obtenido si utilizamos la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores de R_i .

Si se representan gráficamente los resultados anteriores, se puede apreciar, de una forma más sencilla, el criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad.

Figura 5.13. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR tradicional, en selección de aparcamientos disuasorios



Fuente: Elaboración propia

Al no considerar la correlación entre variables en la aplicación del método VIKOR tradicional, se producen algunos cambios en los criterios con mayor coeficiente relativo de sensibilidad. Así, el criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad es el criterio C_6 , *Ocupación suelo no utilizada en centro*, seguido del criterio C_{10} , *Número de plazas aparcamiento*, al igual que ocurre en el método VIKOR modificado cuando para calcular los valores de R_i aplicamos la distancia de Mahalanobis. Los siguientes criterios con mayor coeficiente relativo de sensibilidad son los criterios C_1 , *Reducción emisiones (CO₂) en el centro*, C_2 , *Reducción emisiones (NOx) en el centro*, y C_3 , *Eficiencia energética: ahorro en toneladas equivalentes de petróleo*. Estos tres criterios se comportan de la misma forma en el análisis de

sensibilidad y tienen el mismo coeficiente relativo de sensibilidad. Esto ocurre porque entre ellos existe una correlación positiva perfecta y el método de decisión no considera la correlación entre variables.

5.1.2.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA SELECCIÓN DE APARCAMIENTOS DISUASORIOS, CASO PARTICULAR DE CRITERIOS DE SELECCIÓN.

Dados los resultados obtenidos del coeficiente de correlación de Pearson entre variables, incluidos en la tabla 5.11, y el nivel de significancia, tabla 5.12, se aprecia que entre los criterios C_1 , *Reducción emisiones (CO₂) en el centro*, C_2 , *Reducción emisiones (NOx) en el centro* y C_3 , *Eficiencia energética: ahorro en toneladas equivalentes de petróleo*, existe una correlación positiva perfecta, por lo cual, se propone aplicar la metodología de decisión desarrollada y el análisis de sensibilidad, a las alternativas definidas anteriormente pero eliminando dos de los tres criterios indicados. Estos tres criterios están incluidos en el mismo grupo de criterios de sostenibilidad (medioambientales), por lo cual, la eliminación de los criterios indicados en el proceso de decisión no supone dejar de considerar un grupo de criterios de sostenibilidad. De esta forma, se trata de determinar cómo influye la correlación entre variables en los resultados obtenidos.

Para ello, se eliminan los criterios C_1 , *Reducción emisiones (CO₂) en el centro*, y C_3 , *Eficiencia energética: ahorro en toneladas equivalentes de petróleo*, y se aplica la metodología de decisión considerando los dieciséis criterios restantes definidos anteriormente. Esto obliga a recalcular el vector de pesos, la nueva ponderación de los criterios de selección se incluye a continuación:

Tabla 5.19. Vector de pesos criterios de decisión de aparcamientos disuasorios, método de entropía, caso particular 16 criterios selección

Reducción emisiones (NOx) en el centro	Emisiones tCO ₂ /año explotación aparcamiento	Ocupación suelo aparcamiento superficie parcela	Ocupación suelo no utilizada en centro	Coste construcción	Coste terreno parcela aparcamiento	Coste anual explotación aparcamiento	Número de plazas aparcamiento
C_2 w_2	C_4 w_4	C_5 w_5	C_6 w_6	C_7 w_7	C_8 w_8	C_9 w_9	C_{10} w_{10}
0,09866	0,03757	0,05506	0,14294	0,03442	0,02946	0,03699	0,09969
Población adyacente	Demanda prevista /Ocupación prevista	Intensidad tráfico corredor de entrada (IMD)	Pérdida media de tiempo por congestión corredor entrada	Intermodalidad: red de TP	Proximidad a carril bici	Accidentalidad corredor de entrada	Mejora calidad de vida - percepción usuario

Resultados

(min/día)							
C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈
W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃	W ₁₄	W ₁₅	W ₁₆	W ₁₇	W ₁₈
0,04851	0,12388	0,05889	0,01066	0,07931	0,02759	0,04527	0,07109

Fuente: Elaboración propia

Al igual que en los casos anteriores, una vez obtenido el vector de pesos de los diferentes criterios y a partir de la matriz de decisión que valora cada alternativa según cada uno de los criterios de selección, se aplica la metodología de decisión. Se aplica la metodología de selección indicada en el capítulo 4, método VIKOR modificado con la utilización de la distancia de Mahalanobis. En primer lugar, se calculan los valores de Q_i del método VIKOR tradicional calculando los valores de S_i aplicando la distancia de Mahalanobis, ecuación (4.3), y posteriormente, se calculan los valores de Q_i calculando los valores de R_i aplicando la distancia de Mahalanobis, ecuación (4.4). Como resultado se obtienen dos clasificaciones diferentes de las alternativas de aparcamientos disuasorios que se comparan con la clasificación que se obtiene con la aplicación del método VIKOR tradicional, al igual que se hizo sin suprimir ningún criterio de selección.

En la siguiente tabla se recogen los resultados del primer caso descrito, método VIKOR modificado con los valores de S_i aplicando la distancia de Mahalanobis.

Tabla 5.20. Resultados método VIKOR modificado, S_i distancia de Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección

Alternativas	S_i (distancia Mahalanobis)	R_i	Q_i	Clasificación (según Q_i)	Clasificación de alternativas (16 criterios)	Clasificación de alternativas (18 criterios)
Pitis (1)	1,7946	0,1429	0,7742	8	Alternativa 10	Alternativa 10
Paco de Lucía (2)	2,0207	0,1426	0,9478	12	Alternativa 5	Alternativa 5
Fuente de la Mora (3)	1,9218	0,1263	0,7807	9	11	11
Valdebebas (4)	2,0854	0,1327	0,9434	11	12	12
Canillejas (5)	1,5187	0,0756	0,1869	2	6	6
Estadio Olímpico (6)	1,4414	0,1171	0,3567	5	9	9
Santa Eugenia (7)	1,7178	0,1132	0,5497	7	7	7
San Cristóbal (8)	2,0360	0,1378	0,9333	10	1	1
Villaverde Alto (9)	1,7650	0,1021	0,5248	6	3	3
Villaverde Bajo cruce (10)	1,4946	0,0664	0,1171	1	8	8
Aviación Española (11)	1,7385	0,0572	0,2551	3	4	4
Colonia Jardín (12)	1,8537	0,0528	0,3201	4	2	2

Fuente: Elaboración propia.

En este caso los resultados indicados en la tabla anterior coinciden con los obtenidos al aplicar el método VIKOR modificado con los valores de S_i aplicando la distancia de Mahalanobis y considerando los dieciocho criterios de selección originales. Se obtiene el mismo conjunto de soluciones de compromiso formado por las alternativas 10 y 5, pero de igual forma se obtiene la misma clasificación de alternativas. Esto indica que al aplicar un método de decisión que considera la correlación entre variables, la solución obtenida no está influenciada por los criterios con una correlación perfecta. O lo que es lo mismo, se puede

Resultados

prescindir de estos criterios que muestran una correlación perfecta y considerar en el proceso solamente uno de ellos, lo cual simplifica el proceso de decisión.

Si se realiza el mismo proceso para la aplicación del método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis para el cálculo de R_i , se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 5.21. Resultados método VIKOR modificado, R_i distancia de Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección

Alternativas	S_i	R_i (distancia Mahalanobis)	Q_i	Clasificación (según Q_i)	Clasificación de alternativas (16 criterios)	Clasificación de alternativas (18 criterios)
Pitis (1)	0,5237	1,7946	0,4971	8	Alternativa 10	Alternativa 5
Paco de Lucía (2)	0,6049	2,0207	0,7659	10	Alternativa 5	Alternativa 10
Fuente de la Mora (3)	0,4772	1,9218	0,5424	9	11	12
Valdebebas (4)	0,7650	2,0854	1,0000	12	12	11
Canillejas (5)	0,4198	1,5187	0,1635	2	6	6
Estadio Olímpico (6)	0,6426	1,4414	0,3594	5	9	9
Santa Eugenia (7)	0,5352	1,7178	0,4506	7	7	1
San Cristóbal (8)	0,6583	2,0360	0,8391	11	1	7
Villaverde Alto (9)	0,4244	1,7650	0,3599	6	3	3
Villaverde Bajo cruce (10)	0,4322	1,4946	0,1591	1	2	2
Aviación Española (11)	0,3853	1,7385	0,2944	3	8	8
Colonia Jardín (12)	0,3297	1,8537	0,3201	4	4	4

Fuente: Elaboración propia.

En este caso, en el que se ha aplicado el método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis para el cálculo de R_i , se obtiene el mismo conjunto de soluciones de compromiso formado por las alternativas 10 y 5. La única diferencia con los resultados obtenidos al considerar los dieciocho criterios de selección originales es que la alternativa 5 es la mejor clasificada según los valores de Q_i , y se consideran solo dieciséis la alternativa 10 es la mejor clasificada según los valores de Q_i . En la clasificación completa de alternativas se producen dos cambios, al intercambiarse las posiciones de las alternativas 11 y 12 y de las alternativas 1 y 7, coincidiendo las posiciones del resto de alternativas.

A continuación, se incluyen los resultados del método VIKOR tradicional para los dieciséis criterios indicados y cuyo vector de pesos se ha incluido en la tabla 5.19.

Tabla 5.22. Resultados método VIKOR tradicional, selección aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección

Alternativas	S_i	R_i	Q_i	Clasificación (según Q_i)	Clasificación de alternativas (16 criterios)	Clasificación de alternativas (18 criterios)
Pitis (1)	0,5237	0,1429	0,7228	9	Alternativa 12	Alternativa 12
Paco de Lucía (2)	0,6049	0,1426	0,8141	10	Alternativa 11	11
Fuente de la Mora (3)	0,4772	0,1263	0,5772	7	10	5
Valdebebas (4)	0,7650	0,1327	0,9434	12	5	10
Canillejas (5)	0,4198	0,0756	0,2303	4	9	9
Estadio Olímpico (6)	0,6426	0,1171	0,7161	8	7	3

Resultados

Santa Eugenia (7)	0,5352	0,1132	0,5712	6	3	7
San Cristóbal (8)	0,6583	0,1378	0,8492	11	6	1
Villaverde Alto (9)	0,4244	0,1021	0,3823	5	1	6
Villaverde Bajo cruce (10)	0,4322	0,0664	0,1935	3	2	2
Aviación Española (11)	0,3853	0,0572	0,0883	2	8	8
Colonia Jardín (12)	0,3297	0,0528	0,0000	1	4	4

Fuente: Elaboración propia.

Al aplicar el método VIKOR tradicional, considerando solo los dieciséis criterios de selección, se produce un cambio en el conjunto de soluciones de compromiso, al no cumplirse la condición 1) de ventaja aceptable del método VIKOR, respecto a la aplicación del método con dieciocho criterios. La alternativa 12 sí cumple la condición 2) del método VIKOR, al ser la que presenta menor valor de S y R. Por otra parte, el número de cambios en la clasificación de alternativas es superior a los que se producen cuando se aplica el método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis, al considerar este último la correlación entre variables.

Es necesario llevar a cabo el análisis de sensibilidad para el caso en el que en el problema de decisión intervienen dieciséis criterios, al eliminar los criterios con correlación perfecta. A continuación, se incluyen los resultados de este análisis de sensibilidad, tanto el número de cambios que se producen en la clasificación de alternativas al incrementar o disminuir un 5%, un 50% y un 95% la ponderación de los diferentes criterios de selección como la determinación del criterio con mayor coeficiente de sensibilidad, según se explicó en el epígrafe 4.3, y como se ha aplicado en los casos anteriores.

Los resultados del análisis de sensibilidad del método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis son comparados con los obtenidos con el método VIKOR tradicional, para analizar cómo se comportan las soluciones del problema de decisión y las clasificaciones de alternativas según la metodología aplicada.

Tabla 5.23. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR modificado S_r -Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección

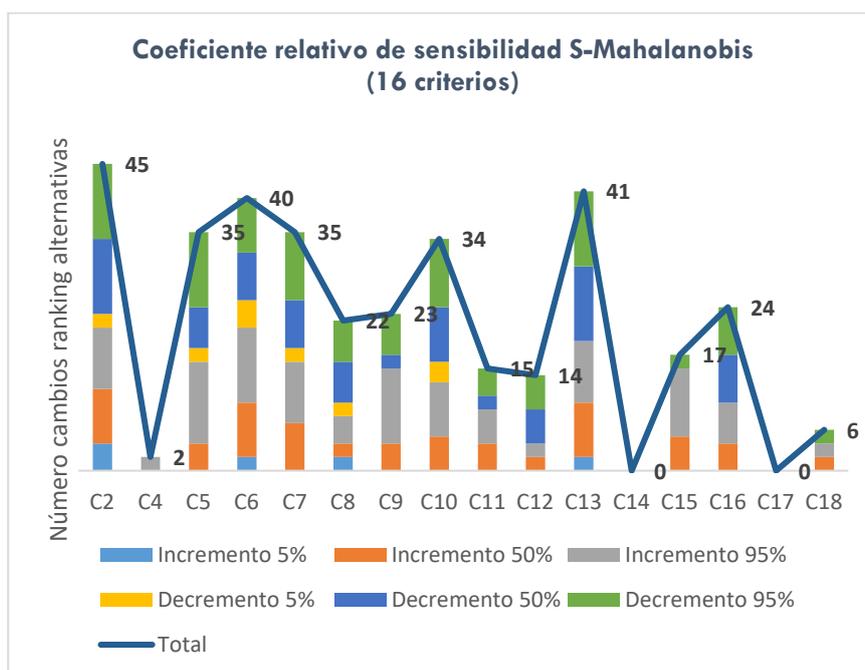
Método VIKOR modificado S-Mahalanobis (16 criterios)												
Porcentaje	Incremento						Decremento					
	5%		50%		95%		5%		50%		95%	
Criterios	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso
C2	4	No	8	No	9	Si	2	No	11	Si	11	Si
C4	0	No	0	No	2	No	0	No	0	No	0	No
C5	0	No	4	No	12	Si	2	No	6	Si	11	Si
C6	2	Si	8	Si	11	Si	4	No	7	Si	8	Si
C7	0	No	7	Si	9	Si	2	No	7	No	10	Si
C8	2	No	2	Si	4	Si	2	No	6	No	6	Si
C9	0	No	4	No	11	Si	0	No	2	No	6	Si
C10	0	No	5	Si	8	Si	3	No	8	Si	10	Si
C11	0	No	4	Si	5	Si	0	No	2	No	4	No
C12	0	No	2	No	2	Si	0	No	5	No	5	Si
C13	2	No	8	No	9	No	0	No	11	Si	11	Si
C14	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No
C15	0	No	5	No	10	No	0	No	0	No	2	No
C16	0	No	4	Si	6	Si	0	No	7	No	7	No
C17	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No
C18	0	No	2	No	2	Si	0	No	0	No	2	No

Fuente: Elaboración propia

Si se analizan los resultados obtenidos, y se comparan con los obtenidos al aplicar la metodología con dieciocho criterios, recogidos en la tabla 5.16, el número total de cambios en la clasificación de alternativas es algo superior cuando se tienen en cuenta todos los criterios originales. Sin embargo, la relación entre los cambios en el conjunto de las soluciones de compromiso respecto a los cambios totales es mayor cuando solo se consideran dieciséis criterios, un 9,1%. Ante estos resultados, se aprecia una mayor inestabilidad en el análisis de sensibilidad para este último caso. En cualquier caso, este porcentaje es inferior al obtenido con el método VIKOR tradicional si se aplica considerando solo dieciséis criterios, como se verá más adelante.

Para poder visualizar de forma más clara el criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad, los datos de la tabla 5.23, se representan a continuación gráficamente.

Figura 5.14. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR modificado S-Mahalanobis, en selección de aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección



Fuente: Elaboración propia

En este caso, se obtiene que el criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad es el criterio C₂, Reducción emisiones (NO_x) en el centro, seguido de los criterios C₁₃, Intensidad tráfico corredor de entrada (IMD) y C₆, Ocupación suelo no utilizada en centro. Si se repasan los resultados obtenidos en el epígrafe anterior, para la aplicación de la metodología con los dieciocho criterios de selección originales, los criterios con mayor coeficiente relativo de sensibilidad obtenidos fueron los criterios: C₁, Reducción de emisiones de CO₂ en el centro,

Resultados

seguido de los criterios C_5 , *Ocupación suelo aparcamiento superficie parcela*, y C_6 , *Ocupación suelo no utilizada en centro*, y C_{13} , *Intensidad tráfico corredor de entrada (IMD)*. Hay que recordar que para la selección con dieciséis criterios se eliminaron los criterios C_1 y C_3 al existir entre ellos y el criterio C_2 una correlación positiva perfecta, por lo cual, al eliminar estos criterios, el criterio C_2 se convierte en el criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad en sustitución del criterio C_1 . Esto indica que, en caso de correlación perfecta entre variables y con la aplicación del método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores de S_i , para la selección sostenible de aparcamientos disuasorios se obtienen los mismos resultados tanto en la solución al problema de decisión como en la determinación del criterios con mayor coeficiente relativo de sensibilidad si se eliminan aquellos criterios entre los cuales existe una correlación perfecta, dejando solo uno de ellos.

Po otra parte, los criterios C_{14} , *Pérdida media de tiempo por congestión corredor de entrada (min/día)*, y C_{17} , *Accidentalidad en el corredor de entrada*, presentan un coeficiente relativo de sensibilidad igual a cero. Lo que indica que la variación en la ponderación de estos criterios no influye en la solución del problema de decisión y la clasificación de alternativas. Estos resultados coinciden con los obtenidos en la aplicación del método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores de S_i con los dieciocho criterios de selección originales.

A continuación, se analiza el análisis de sensibilidad para el método VIKOR modificado aplicando la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores R_i , primando la utilidad de la mayoría y considerando solo los dieciséis criterios indicados. Para ello, se incluye en primer lugar, el número de cambios que se producen cuando el peso de los criterios se incrementan o disminuyen un 5%, un 50% y un 95% y, en segundo lugar, la determinación del coeficiente relativo de sensibilidad para cada criterio de selección.

Tabla 5.24. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR modificado R_i -Mahalanobis, selección aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección

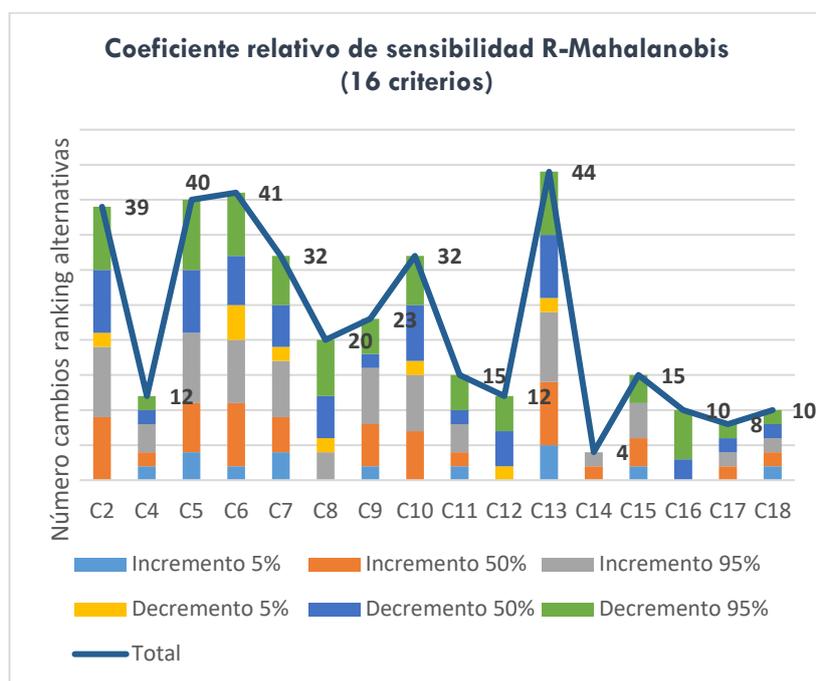
Porcentaje	Método VIKOR modificado R-Mahalanobis (16 criterios)											
	Incremento						Decremento					
	5%		50%		95%		5%		50%		95%	
Criterio	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso
C2	0	No	9	Si	10	Si	2	No	9	Si	9	Si
C4	2	No	2	No	4	No	0	No	2	No	2	No
C5	4	No	7	No	10	Si	0	No	9	Si	10	Si
C6	2	No	9	Si	9	Si	5	No	7	Si	9	Si
C7	4	No	5	Si	8	Si	2	No	6	Si	7	Si
C8	0	No	0	No	4	Si	2	No	6	No	8	Si
C9	2	No	6	No	8	Si	0	No	2	No	5	Si
C10	0	No	7	Si	8	Si	2	No	8	No	7	Si
C11	2	No	2	No	4	No	0	No	2	No	5	No
C12	0	No	0	No	0	No	2	No	5	No	5	No
C13	5	No	9	Si	10	Si	2	No	9	Si	9	Si
C14	0	No	2	No	2	No	0	No	0	No	0	No
C15	2	No	4	No	5	No	0	No	0	No	4	Si
C16	0	No	0	No	0	Si	0	No	3	No	7	No
C17	0	No	2	No	2	No	0	No	2	No	2	No
C18	2	No	2	No	2	No	0	No	2	No	2	No

Fuente: Elaboración propia

De la comparación de los resultados obtenidos, incluidos en la tabla 5.24, con los obtenidos al aplicar la metodología con dieciocho criterios, recogidos en la tabla 5.17, se observa que el número total de cambios en la clasificación de alternativas es superior cuando se tienen en cuenta solo dieciséis criterios. Sin embargo, el número de cambios en el conjunto de las soluciones de compromiso es sensiblemente inferior si se consideran solo dieciséis criterios, 19, frente a los 24 cambios que se producen cuando se consideran los dieciocho criterios originales aplicando el método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores de R_i . Este número de cambios es muy inferior al número de cambios que se producen al aplicar el método VIKOR tradicional considerando solo dieciséis criterios como se verá más adelante.

Al igual que en los casos anteriores, para determinar el criterio con mayor o menor coeficiente relativo de sensibilidad, se representan gráficamente los resultados de la tabla 5.24.

Figura 5.15. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR modificado R-Mahalanobis, en selección de aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección



Fuente: Elaboración propia

En este caso, en el que se han considerado solo dieciséis criterios, el criterio C_{13} , *Intensidad tráfico corredor de entrada (IMD)*, es el criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad. Sin embargo, al considerar todos los criterios definidos al inicio, este criterio es el quinto con mayor coeficiente relativo de sensibilidad al calcular los valores de R_i a partir de la

Resultados

distancia de Mahalanobis. Y el criterio C_6 , *Ocupación suelo no utilizada en centro*, es el segundo criterio con mayor sensibilidad, sin embargo, si se consideran todos los criterios, este criterio es que tiene mayor sensibilidad. Los siguientes criterios con mayor sensibilidad son los criterios C_5 , *Ocupación suelo aparcamiento superficie parcela*, y C_2 , *Reducción emisiones (NOx) en el centro*, sin embargo, al considerar los dieciocho criterios lo era el criterio C_1 , *Reducción de emisiones de CO₂ en el centro*, pero al ser eliminado este criterio, el criterio C_2 , se comporta de la misma forma que el criterio C_1 , al existir una correlación perfecta entre ambos. Según todo lo anterior, hay que indicar que los resultados obtenidos con el método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis para el cálculo de R_i , considerando solo dieciséis criterios, presentan mayor inestabilidad tanto en la clasificación de alternativas como en el análisis de sensibilidad, que si se aplica el método VIKOR modificado para el cálculo de los valores de S_i .

Al igual que en el caso anterior, los criterios C_{14} , *Pérdida media de tiempo por congestión corredor de entrada (min/día)*, y C_{17} , *Accidentalidad en el corredor de entrada*, son los criterios con un menor coeficiente relativo de sensibilidad, y también lo son si se consideran todos los criterios de selección originales.

Los resultados del análisis de sensibilidad del método VIKOR tradicional cuando se consideran solo dieciséis criterios se incluyen en la tabla siguiente.

Tabla 5.25. Resultados análisis de sensibilidad método VIKOR tradicional, selección aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección

Método VIKOR tradicional (16 criterios)												
Porcentaje	Incremento						Decremento					
	5%		50%		95%		5%		50%		95%	
Criterio	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso	Número de cambios en la clasificación de alternativas	Cambios en el conjunto de soluciones de compromiso
C2	0	No	6	Si	9	Si	0	No	0	No	0	No
C4	0	No	0	No	2	Si	0	No	0	Si	0	Si
C5	0	No	2	Si	4	Si	0	No	0	No	2	No
C6	0	No	3	Si	3	Si	2	No	4	No	5	No
C7	0	No	2	No	4	No	0	No	0	Si	0	Si
C8	0	No	0	Si	0	Si	0	No	4	No	4	No
C9	0	No	0	No	2	No	0	No	0	Si	0	Si
C10	0	Si	5	Si	7	Si	0	No	2	No	5	No
C11	0	No	6	No	8	Si	0	No	0	No	0	Si
C12	2	No	5	Si	5	Si	0	No	2	No	2	No
C13	0	No	2	Si	4	Si	0	Si	2	Si	2	Si
C14	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No	0	No
C15	0	No	2	Si	8	Si	0	No	0	No	0	No
C16	0	No	0	Si	0	Si	0	No	0	No	0	No
C17	0	No	0	Si	0	Si	0	No	4	No	4	No
C18	0	No	2	Si	8	Si	0	No	0	No	2	No

Fuente: Elaboración propia

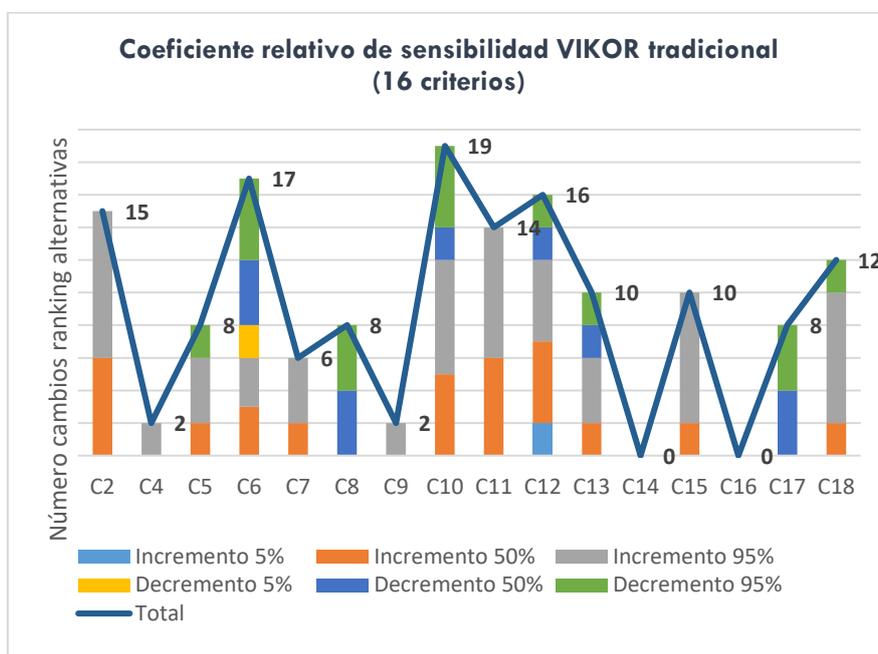
Del análisis de los resultados incluidos en la tabla anterior se deduce que el número total de cambios en la clasificación de alternativas, al modificar la ponderación de los criterios, es inferior al aplicar el método VIKOR tradicional que si se aplica el método VIKOR modificado. Sin embargo, el número de cambios en el conjunto de soluciones de compromiso es superior, en concreto, se producen 35 cambios en el conjunto de soluciones de compromiso, frente a 19 y 32 que se producen al aplicar el método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis

Resultados

para el cálculo de los valores R_i y S_i , respectivamente. Además, esta diferencia es mayor, si el número de cambios en la solución de compromiso se comparan con los cambios totales en la clasificación de alternativas, suponiendo estos 35 cambios en el conjunto de soluciones de compromiso un 23,8% respecto a la totalidad de los cambios.

De igual forma que en casos anteriores, se determina cuál el criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad, para ello se representan gráficamente los resultados de la tabla 5.25.

Figura 5.16. Coeficiente relativo de sensibilidad método VIKOR tradicional, en selección de aparcamientos disuasorios, caso particular 16 criterios de selección



Fuente: Elaboración propia

Al aplicar el método VIKOR tradicional con dieciséis criterios en lugar de los dieciocho criterios originales, se producen importantes cambios en los coeficientes relativos de sensibilidad de los diferentes criterios. En este caso, el criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad es el criterio C_{10} , *Número de plazas aparcamiento*, seguido del criterio C_6 , *Ocupación suelo no utilizada en centro*. Si se consideran todos los criterios de selección el resultado es inverso, pero además con una gran diferencia en el valor del coeficiente. El tercer criterio con mayor sensibilidad es el criterio C_{12} , *Demanda prevista*, sin embargo, este criterio en ningún otro caso se sitúa entre los cinco primeros criterios con mayor sensibilidad. Por el contrario, el criterio C_2 , se sitúa en cuarta posición, sin embargo, al considerar dieciocho criterios este criterio ocupa la tercera posición, junto con los criterios C_1 , *Reducción emisiones (CO2) en el centro*, y C_3 , *Eficiencia energética: ahorro en toneladas equivalentes de petróleo*, que en este caso han sido eliminados en el proceso de decisión.

Respecto a los criterios con menor coeficiente relativo de sensibilidad también se producen cambios si se consideran todos los criterios o si se eliminan los dos criterios que presentan correlación perfecta con el criterio C_2 . En este caso, se obtiene que los criterios con menor sensibilidad son los criterios C_{14} , *Pérdida media de tiempo por congestión corredor de entrada (min/día)*, y C_{16} , *Proximidad a carril bici*, al presentar un valor nulo. Sin embargo, si se aplica el método VIKOR tradicional con dieciocho criterios de selección, además de los criterios C_{14} y C_{16} , el criterio C_8 , *Coste terreno parcela aparcamiento*, también presenta un coeficiente relativo de sensibilidad igual a cero.



CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

6.1. DISCUSIÓN

A la vista de los resultados obtenidos en la presente investigación, se puede indicar que los criterios de selección que intervienen en la metodología de decisión sostenible de alternativas de infraestructuras a menudo se encuentran correlacionados. Aspecto que ha quedado acreditado a través del coeficiente de correlación de Pearson de los criterios de selección de dos tipos de infraestructuras diferentes que se han estudiado, por una parte, selección de tipologías de muros de contención y, por otra parte, selección de infraestructuras de aparcamientos disuasorios.

A partir de los resultados obtenidos, e incluidos en los epígrafes 5.1.1. y 5.1.2., se aprecia que al aplicar una metodología de decisión, que considera la correlación entre variables a la hora de determinar la distancia de cada alternativa a la “solución ideal” se determinan como soluciones al problema de decisión alternativas de que de otra forma no se considerarían. Se obtiene como solución al problema de decisión un conjunto de alternativas que conforman un conjunto de soluciones de compromiso, siendo éstas las que se encuentran “más cerca” de la solución de ideal. Variando la alternativa, dentro del conjunto de soluciones de compromiso, como mejor clasificada (primera posición) según se considera el análisis la utilidad de la mayoría o el comportamiento individual de cada alternativa respecto al criterio que se podría llamar como dominante o preferente, al ser éste el que determina la mayor distancia con la solución ideal, cuando se utiliza la distancia Chebyshev.

Si, en caso de correlación entre variables, y para tenerla en cuenta, aplicamos el método VIKOR modificado con la aplicación de la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores de S_i del método VIKOR tradicional, en el cálculo de los valores Q_i se prima la utilidad de la mayoría en uno de los sumando, al intervenir todos los criterios, y en el otro, se calculan los valores de R_i según la distancia de Chebyshev, se tiene en cuenta solo el comportamiento de cada alternativa respecto al criterio que representa la mayor distancia de cada alternativa a la solución ideal. Por el contrario, al aplicar el método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis para el cálculo de R_i , y calcular los valores de S_i según el método VIKOR tradicional, es decir, según la distancia Manhattan, se prima la utilidad de la mayoría en ambos sumandos para el cálculo de los valores de Q_i . Esto explica que se produzca una alternancia en la primera posición en la clasificación de alternativas entre las alternativas que conforman el conjunto de soluciones de compromiso, alternativas 10 y 5 en el caso de estudio de selección de aparcamientos disuasorios, y alternativas de muro de escollera y de muro vegetal para el caso de selección de tipologías de muros de contención.

Como se ha comentado anteriormente, un aspecto importante a tener en cuenta en la aplicación de cualquier método de decisión es la estabilidad de las soluciones obtenidas cuando se producen cambios en las condiciones de partida, especialmente en la importancia relativa de cada criterio que aplica el decisor, es decir, un cambio en la ponderación de los criterios. Por lo cual, es necesario estudiar cómo se comportan las soluciones ante estos cambios a través del análisis de sensibilidad. En esta investigación para llevar a cabo el análisis

de sensibilidad se han modificado los pesos de los criterios, incrementándose o disminuyéndose un 5% (cambio pequeño), un 50% (cambio grande) o un 95% (cambio muy grande) y se han determinado el número de cambios que se producen en la clasificación de alternativas y en el conjunto de soluciones de compromiso. Por otra parte, se ha determinado el criterio con mayor coeficiente relativo de sensibilidad, siendo éste el que provoca un mayor número de cambios en la clasificación de alternativas al variar su ponderación.

De manera general, se puede indicar que los resultados obtenidos con el método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores S_i y R_i presentan una mayor sensibilidad cuando se producen cambios en la ponderación de los criterios, frente a los resultados que se obtienen con el método VIKOR tradicional, al producirse un mayor número de cambios en la clasificación de alternativas, para cambios grandes (50%) y muy grandes (95%) en la ponderación de criterios de selección. Sin embargo, es necesario realizar varias puntualizaciones sobre esto, aunque el número total de cambios en la clasificación de alternativas es mayor, el número de cambios en el conjunto de soluciones de compromiso es menor al considerar la correlación entre variables con la aplicación del método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis, tanto en valor absoluto en el caso de muros de contención y en términos relativos en el caso de aparcamientos disuasorios. También hay que indicar, que con el método VIKOR tradicional, que no considera la correlación entre variables, no es posible determinar de forma cierta y precisa los criterios con mayor coeficiente relativo de sensibilidad, al comportarse los criterios que presentan correlación lineal entre ellos de la misma manera en el análisis de sensibilidad.

El hecho de que el método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis presenta mayor sensibilidad al producirse un mayor número de cambios en la clasificación de alternativas, puede deberse a que la distancia de Mahalanobis no requiere normalización al ser invariante a la escala, por lo cual, se ha aplicado sin normalizar los valores de la matriz de decisión. Sin embargo, para el caso de la distancia de Manhattan y Chebyshev se ha aplicado sobre valores normalizados. Para futuras investigaciones sería interesante estudiar si influye, y en caso afirmativo, cómo influye la normalización de los valores de la matriz de decisión en el método VIKOR modificado, y además cuál sería el método de normalización más adecuado de los incluidos en la tabla 3.3., para disminuir la sensibilidad.

Por otra parte, en el epígrafe 5.1.2.2. se ha incluido el caso particular de que exista correlación perfecta entre algunas de las variables y se eliminen estos criterios salvo uno en la aplicación del método de decisión VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis y el método VIKOR tradicional, lo cual simplifica el proceso. En este caso y que se ha aplicado para el caso de estudio de aparcamientos disuasorios, en el que existe una correlación perfecta entre los criterios los criterios C_1 , *Reducción emisiones (CO₂) en el centro*, C_2 , *Reducción emisiones (NOx) en el centro* y C_3 , *Eficiencia energética: ahorro en toneladas equivalentes de petróleo*, se aprecia que los resultados obtenidos con el método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores S_i , son idénticos a los obtenidos si no se simplifican los criterios de selección que intervienen en el proceso. Se obtienen los mismos

resultados tanto, para el conjunto de soluciones de compromiso y para la clasificación de alternativas, como en la determinación de los criterios con mayor coeficiente relativo de sensibilidad a través del análisis de sensibilidad. Sin embargo, con la aplicación del método VIKOR tradicional a este caso particular, se obtienen resultados diferentes tanto, en el conjunto de soluciones de compromiso y en la clasificación de alternativas, como en la determinación de los criterios con mayor coeficiente relativo al aplicarlo sin simplificar el número de criterios de selección (sin eliminar ninguno de los criterios entre los que existe una correlación perfecta).

Por todo lo comentado anteriormente, y a partir de los resultados obtenidos, lo más adecuado es aplicar el método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis en el caso de que exista correlación entre variables. Y de manera concreta, si existe correlación perfecta entre algunas variables que intervienen en el proceso de decisión es mejor aplicar el método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores de S_i . Por el contrario, si hay correlación entre variables, pero en ningún caso existe correlación perfecta, es mejor aplicar el método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores de R_i , que presente menor sensibilidad, respecto al cambio en la clasificación de alternativas y al conjunto de soluciones de compromiso, que si se aplica la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores de S_i . Para el caso en el que no existe correlación entre variables es mejor aplicar el método VIKOR tradicional que es menos sensible ante cambios en la ponderación de los criterios.

Otro aspecto a destacar de los resultados obtenidos, es que en todos los análisis de sensibilidad realizados en ningún caso las alternativas que conforman el conjunto de soluciones de compromiso se sitúan en la clasificación de alternativas en las últimas posiciones, ni siquiera en la mitad inferior, salvo en un caso puntual, en el cual la solución mejor clasificada pasa a la séptima posición.

Un aspecto no estudiado, en la presente investigación, y que se propone como futura línea de investigación, es si con la metodología de decisión desarrollada ocurre el proceso denominado "inversión de rango", *rank reversal*. En este fenómeno, el orden de preferencia de las alternativas cambia cuando se agrega o se elimina una alternativa en el problema de decisión. En algunos casos, esto puede llevar a lo que se denomina inversión total de rango, donde el orden de preferencias se invierte totalmente, es decir, la alternativa considerada como mejor clasificada, con la inclusión o eliminación de una alternativa en el proceso, se convierte en la alternativa peor, (García-Cascales and Lamata 2012). Este efecto fue detectado por primera vez en la aplicación de método AHP, que a pesar de uso extendido por muchos autores en numerosos problemas de decisión, ha sido considerablemente criticado por su posible fenómeno de inversión de rango, lo que significa que la clasificación relativa de dos alternativas de decisión podría revertirse cuando se agrega o elimina una alternativa de decisión, (Wang and Luo 2009). Belton y Gear, (Belton and Gear 1983) apreciaron y señalaron un fenómeno de este tipo por primera vez, lo que provocó un debate de larga duración sobre la validez del AHP y la legitimidad de la inversión de rango. Posteriormente, se descubrió que

casi todos los métodos de decisión multicriterio son susceptibles al fenómeno de reversión de rango debido a la existencia de una relación mutua entre las alternativas, que surge del proceso de normalización, (Wang and Luo 2009). Actualmente, el estudio de inversión de rango es considerado como un testeo para saber si el método de decisión es robusto, (García-Cascales and Lamata 2012).

6.2. CONCLUSIONES

La selección sostenible de alternativas en proyectos de infraestructuras requiere un proceso sistemático que incluya la identificación de todos los criterios y requisitos de sostenibilidad que puedan influir en el proceso de decisión y de todas las alternativas que puedan dar solución al problema de decisión. De igual forma es necesario valorar cada alternativa respecto a los criterios de selección, tanto si éstos son cualitativos o cuantitativos, y determinar la importancia relativa de cada criterio de selección que éstos tienen para el decisor, bien por métodos subjetivos o por métodos objetivos. Los métodos de decisión ayudan en el proceso de selección de alternativas en proyectos de infraestructuras, pero hay que tener en cuenta que presentan ciertas limitaciones: algunos de ellos están influenciados por la subjetividad del decisor y, la mayor parte de ellos, no consideran la correlación entre variables.

En la investigación desarrollada, se ha realizado, en primer lugar, un estudio completo, por una parte, de los criterios o indicadores de sostenibilidad que hay que considerar en cualquier proyecto de infraestructuras, y por otra parte, de los métodos de decisión multicriterio que son de aplicación para la selección de infraestructuras. En segundo lugar, se propone un método de decisión multicriterio basado en el concepto de distancia matemática considerando la correlación de variables, para ello, se aplica la distancia de Mahalanobis para desarrollar una modificación del método VIKOR. La distancia de Mahalanobis mide la distancia de un conjunto de puntos a un punto común, y presenta la particularidad, respecto a otras medidas de distancia, que considera las correlaciones del conjunto de datos. Dicha distancia, además ofrece la ventaja de que es una distancia invariante de escala. El método de decisión multicriterio desarrollado como método VIKOR por la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores S o R del método VIKOR tradicional se ha aplicado a dos tipos de infraestructuras: a la selección de tipologías de muros de contención y a la planificación de aparcamientos disuasorios. El estudio se ha completado con el análisis de sensibilidad de la metodología de decisión desarrollada. De la investigación realizada se pueden determinar las siguientes conclusiones:

- Los criterios de sostenibilidad que intervienen en la selección de alternativas en infraestructuras pueden agruparse en cuatro grupos principales: medioambientales, económicos, funcionales y sociales.
- Los criterios de selección deben ser ponderados para reflejar la importancia relativa de los mismos en el proceso de decisión, este proceso debe ser realizado de manera que se reduzca la subjetividad del decisor.
- Los criterios de selección a menudo están correlacionados y la mayor parte de los métodos de decisión multicriterio no consideran la correlación entre variables. Esto implica que ante de aplicar cualquier metodología de decisión es necesario comprobar si las variables están correlacionadas.

- Algunos métodos de decisión, como el método AHP, comparaciones pareadas, permiten además de determinar la solución que mejor responde al problema, valorar las diferentes alternativas respecto a criterios cualitativos.
- El análisis de sensibilidad permite determinar la estabilidad de las soluciones proporcionadas por la metodología de decisión cuando varía la ponderación de los criterios de selección.

De la metodología de decisión desarrollada, método de VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores de S o R se puede concluir que:

- En caso de correlación entre variables, la metodología de selección desarrollada proporciona un conjunto de soluciones de compromiso que cumplen la condición de ser las más cercanas a la solución ideal y dan como solución, al problema de decisión, un conjunto de alternativas que no se considerarían si aplicáramos un método de decisión que no considera la correlación entre variables.
- Ante pequeños cambios en la ponderación de los criterios, la clasificación de alternativas facilitada por la metodología de decisión desarrollada se mantiene estable en el análisis de sensibilidad. Para cambios grandes o muy grandes en la ponderación de los criterios el número de cambios en el conjunto de soluciones de compromiso respecto al número de cambios totales es menor que en el método VIKOR tradicional.
- En el caso de correlación perfecta entre variables, el método VIKOR modificado con la distancia de Mahalanobis para el cálculo de los valores S_i , permite simplificar el proceso y considerar en el proceso de selección solamente uno de los criterios que se encuentran correlacionados de manera perfecta.
- La metodología desarrollada permite ser aplicada a la selección de alternativas en otros proyectos de infraestructuras en los cuales las variables que intervienen en el proceso de decisión están correlacionadas.



CAPÍTULO 7: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A lo largo de la investigación se han ido indicando qué aspectos deberían ser objeto de una futura investigación. De esta forma, uno de estos aspectos a estudiar en futuras investigaciones es la influencia de la normalización en la sensibilidad de la metodología desarrollada. En la metodología desarrollada se ha aplicado la distancia de Mahalanobis a los valores de la matriz de decisión, sin normalizar los mismos, al ser invariante esta distancia con la escala. Sin embargo, el otro sumando en la fórmula para el cálculo de los valores de Q para cada alternativa se aplica a los valores de la matriz de decisión normalizada. Por lo cual, se debería estudiar si la normalización puede influir en el proceso de decisión y en el análisis de sensibilidad de la metodología desarrollada, y al mismo tiempo, cuál sería la técnica de normalización, de las estudiadas, que es más adecuada.

Por otra parte, como se ha comentado anteriormente, los métodos de decisión multicriterio presentan numerosas ventajas porque permiten resolver problemas complejos de una forma sistemática y sencilla, pero presentan varios inconvenientes, entre ellos el ya mencionado fenómeno de orden inverso, *rank reversal*. En este fenómeno, el orden de preferencia de las alternativas cambia cuando se agrega o se elimina una alternativa en el problema de decisión. En algunos casos, esto puede llevar a lo que se denomina inversión total de rango, donde el orden de preferencias se invierte totalmente, es decir, la alternativa considerada como mejor clasificada, con la inclusión o eliminación de una alternativa en el proceso, se convierte en la alternativa peor, (García-Cascales and Lamata 2012). Aunque en un primer momento, este inconveniente se asociaba al método AHP, posteriormente se ha visto que casi todos los métodos de decisión multicriterio están afectados en más o menos medida por el fenómeno de reversión de rango debido a la existencia de una relación mutua entre las alternativas, que surge del proceso de normalización, (Wang and Luo 2009). Teniendo en cuenta que en la metodología desarrollada la aplicación de la distancia de Mahalanobis se realiza sobre los valores de la matriz de decisión sin normalizar, en futuras investigaciones se debería estudiar si se produce este fenómeno cuando se elimina alguna de las alternativas en los casos de estudio realizados o en otros a los que se aplique la metodología desarrollada en un futuro. Esto permitirá testar la robustez del método de decisión.



CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS

- AASHTO. 2004. *Guide for Park-and-Ride Facilities*. edited by A. A. of S. H. and T. Officials.
- Abajo, Lucía López De, Ana Patricia Pérez-Fortes, Marcos G. Alberti, Jaime C. Gálvez, and Tomás Ripa. 2020. "Sustainability Analysis of the M-30 Madrid Tunnels and Madrid Río after 14 Years of Service Life." *Applied Sciences (Switzerland)* 10(20):1–20. doi: 10.3390/app10207368.
- Abdullah, Hannah, Valeria Bernardo, Cardama Maruxa, Carla Gómez Castellví, Degen. Annika, Carles Fábregas, Albert Gragera, Peter Jones, Jeremy Leach, Lukas Reichel, Eloi Serrano Robles, Caspar Sluiter, Emilia Smeds, Margarita Triguero-Mas, and Arnau Vilardell. 2021. *Urban Mobility after COVID-19 Long-Term Strategies for the Sustainable Mobility Transition in European Cities*. edited by CIDOB edicions. Barcelona.
- Acuña, Mario Alberto, María del Pilar Díaz Salcedo, Andrés Eduardo Fernández, Fabián Galindo Beltrán, Johanna Ximena Hostos, Alexander Matallana, Luis Ernesto Peña, Luisa Fernanda Popayan, Javier Armando Rocha Gil, and Juan Camilo Rodríguez Celis. 2012. "Informe de Exposición Estructuras de Contención." Retrieved April 15, 2021 (<https://es.slideshare.net/johannaximena1/muros-de-contencion>).
- Aguaza Ortega, Bienvenido. 2012. "Análisis Coste-Beneficio." *EXtoikos* 5:147–49.
- Ahn, Byeong Seok. 2011. "Compatible Weighting Method with Rank Order Centroid: Maximum Entropy Ordered Weighted Averaging Approach." *European Journal of Operational Research* 212(3):552–59. doi: 10.1016/j.ejor.2011.02.017.
- Alberti, Marcos G., Jaime C. Gálvez, Alejandro Enfedaque, Ana Carmona, Cristina Valverde, and Gabriel Pardo. 2018. "Use of Steel and Polyolefin Fibres in the La Canda Tunnels: Applying MIVES for Assessing Sustainability Evaluation." *Sustainability (Switzerland)* 10(12):1–11. doi: 10.3390/su10124765.
- Anderson, Sara. 2012. "Chapter 62 Types of Retaining Walls." Pp. 959–68 in *ICE Manuals*.
- Anderson, Scott A., Daniel Alzamora, and Matthew J. Demarco. 2008. "Asset Management Systems for Retaining Walls." Pp. 162–77 in *Geo-Velopment: The Role of Geological and Geotechnical Engineering in New and Redevelopment Projects - Proceedings of the 2008 Biennial Geotechnical Seminar*.
- Anido, Souto, Marquez Sánchez, and Marrero Ancizar. 2019. "Procedimiento Para La Selección Del Personal Basado En La Teoría de Los Subconjuntos Borrosos y Operadores OWA." *Revista Espacios* 40(34):9–38.
- Anon. n.d. "ACE Geosynthetic Park." Retrieved May 12, 2021 (<https://www.acegeosyntheticsecopark.com/es/begreen#Objeto de Evaluación>).
- Aragonés Beltrán, Pablo. 1997. "Aproximación a La Toma de Decisiones Multicriterio En Proyectos. Implementación de Una Metodología Multicriterio y Multiexperto: Pres II."
- Arce Ruiz, Rosa M., Carmen Palomino Monzón, and Julio García Durango. 2006. "Propuesta de Indicadores Para La Sostenibilidad de Las Infraestructuras."
- Arrow, Kenneth J., and Hervé Raynaud. 1986. *Social Choice and Multicriterion Decision-Making*.
- Awasthi, Anjali, Hichem Omrani, and Philippe Gerber. 2018. "Investigating Ideal-Solution Based Multicriteria Decision Making Techniques for Sustainability Evaluation of Urban Mobility

- Projects." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 116:247–59. doi: 10.1016/j.tra.2018.06.007.
- Ayuntamiento de Madrid. Area de Gobierno Medio Ambiente y Movilidad. 2019. *Avance de La Estrategia de Sostenibilidad Ambiental MADRID 360*.
- Ayuntamiento de Madrid. 2000. *Instrucción de Vía Pública*.
- Ayuntamiento de Madrid. 2013. *Informe de Sostenibilidad Ambiental. Tomo I*.
- Ayuntamiento de Madrid. 2014. *Plan de Movilidad Urbana Sostenible de La Ciudad de Madrid*.
- Ayuntamiento de Madrid. 2016. *Programa de Aparcamientos Disuasorios*.
- Ayuntamiento de Madrid. 2017a. *Estudio Del Parque Circulante de La Ciudad de Madrid*.
- Ayuntamiento de Madrid. 2017b. *Plan A: Plan de Calidad Del Aire y Cambio Climático de La Ciudad de Madrid*.
- Ayuntamiento de Madrid. 2018a. *Ordenanza de Movilidad Sostenible, de 5 de Octubre de 2018*.
- Ayuntamiento de Madrid. 2018b. *Padrón Municipal de Habitantes 2017*.
- Ayuntamiento de Madrid. 2018c. *Protocolo de Actuación Para Episodios de Contaminación Por Dióxido de Nitrógeno En La Ciudad de Madrid*.
- Ayuntamiento de Madrid. 2021. "Modificaciones de La Ordenanza de Movilidad Sostenible." Retrieved November 23, 2021 (<https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Movilidad-y-transportes/Ordenanza-de-Movilidad-Sostenible/?vgnnextfmt=default&vgnnextoid=d73fff17a1151610VgnVCM1000001d4a900aR CRD&vgnnextchannel=220e31d3b28fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD&idCapitulo=10610196>).
- Ayuntamiento de Madrid. n.d. "Mapa de La Bici. Infraestructura Ciclista de La Ciudad de Madrid." Retrieved November 14, 2019 (<https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=304e79ab11cb403cbd4469a60a48cdeb>).
- Ayuntamiento de Sevilla. n.d. "Tabla de Indicadores de Emisiones GEI Del Transporte." Retrieved November 23, 2021 (<https://www.sevilla.org/servicios/planificacion-estrategica/agencia-energia-sostenibilidad/plataforma-de-sostenibilidad>).
- Aznar Bellver, Jeronimo, and Francisco Guijarro Martinez. 2013. *Nuevos Métodos de Valoración. Modelos Multicriterio*.
- Azzini, I., G. Listorti, T. A. Mara, and R. Rosati. 2020. *Uncertainty and Sensitivity Analysis for Policy Decision Making. An Introductory Guide*.
- Badi, Ibrahim, Mohamed Ballem, and Ali Shetwan. 2018. "Site Selection of Desalination Plant in Libya by Using Combinative Distance-Based Assessment (CODAS) Method." *International Journal for Quality Research* 12(3):609–24. doi: 10.18421/IJQR12.03-04.
- Baker, Dennis, Donald Bridges, Regina Hunter, Gregory Johnson, Joseph Krupa, James Murphy, and Ken Sorenson. 2001. *Guidebook to Decision-Making Methods*.
- Balaji, K., and V. S. Senthil Kumar. 2018. "Evaluation and Selection of Lean Resourced Employee in the Manufacturing Industries Using the TOPSIS-Simos Method." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*

- 232(1):162–71. doi: 10.1177/0954405416635069.
- Barford, M. B., and Steen Leleur. 2014. *Multi-Criteria Decision Analysis for Use in Transport Decision Making*. DTU Transport.
- Barrios Córdova, Abel, Humberto Vaquera Huerta, Juan Manuel Romero Padilla, José Crossa, and Esteban Burguete Hernández. 2020. “Estudio Comparativo de Técnicas de Optimización Multirespuesta En Diseños Experimentales.” *Ingeniería Investigación y Tecnología* 21(2):1–12. doi: 10.22201/fi.25940732e.2020.21n2.016.
- Barros, María J., Alicia E. Rendina, and Martha F. Bargiela. 2002. “Aplicación Del Método ELECTRE Para La Evaluación de Alternativas En La Realización de Un Estudio de Impacto Ambiental.” *Revista Facultad de Agronomía* 22(1):69–77.
- Baviera-Puig, Amparo, Gabriel García-Martínez, and Tomás Gómez-Navarro. 2014. “Propuesta Metodológica Mediante ANP Para La Evaluación de Las Memorias de Sostenibilidad Del Sector Agroalimentario Español.” *Economía Agraria y Recursos Naturales* 14(1):81–101. doi: 10.7201/earn.2014.01.04.
- Belošević, Ivan, Milana Kosijer, Miloš Ivić, and Norbert Pavlović. 2018. “Group Decision Making Process for Early Stage Evaluations of Infrastructure Projects Using Extended VIKOR Method under Fuzzy Environment.” *European Transport Research Review* 10(2). doi: 10.1186/s12544-018-0318-4.
- Belton, Valerie, and Tony Gear. 1983. “On a Short-Coming of Saaty’s Method of Analytic Hierarchies.” *Omega* 11(3):228–30. doi: 10.1016/0305-0483(83)90047-6.
- Benítez Leyva, Lázaro Ventura. 2015. “Procedimiento Multicriterio-Multiobjetivo de Planificación Energética a Comunidades Rurales Aisladas.”
- Birch, Jennifer C., Adrian C. Newton, Claudia Alvarez Aquino, Elena Cantarello, Cristian Echeverría, Thomas Kitzberger, Ignacio Schiappacasse, and Natalia Tejedor Garavito. 2010. “Cost-Effectiveness of Dryland Forest Restoration Evaluated by Spatial Analysis of Ecosystem Services.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(50):21925–30. doi: 10.1073/pnas.1003369107.
- Bouyssou, Denis. 2008. “Outranking Methods.” Pp. 2887–93 in *Encyclopedia of Optimization*.
- Boyce, D.E.; Allen, B.; Desfor, G.; Zuker, R. 1972. *Impact of Access Distance and Parking Availability on Suburban Rapid Transit Station Choice; Analysis of the Philadelphia – Lindenwold High-Speed Line*. Philadelphia, Springfield.
- Br Sembiring, Berti Sari, Muhammad Zarlis, Sawaluddin, Alfian Agusnady, and Titin Qowidho. 2019. “Comparison of SMART and SAW Methods in Decision Making.” in *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1255.
- Brans, Jean-Pierre, and Yves De Smet. 2016. *PROMETHEE Methods*.
- Brauers, Willem Karel M., and Edmundas Kazimieras Zavadskas. 2006. “The MOORA Method and Its Application to Privatization in a Transition Economy.” *Control and Cybernetics* 35(2):445–69.
- Brauers, Willem Karel M., and Edmundas Kazimieras Zavadskas. 2010. “Project Management by Multimoora as an Instrument for Transition Economies.” *Technological and Economic Development of Economy* 16(1):5–24. doi: 10.3846/tede.2010.01.
- Brundtland, Gro Harlem. 1987. *Informe de La Comisión Mundial Sobre El Medio Ambiente y El Desarrollo “Nuestro Futuro Común”*. Naciones Unidas.

- Bueno Cadena, Paola Carolina, and José Manuel Vassallo Magro. 2015. "Setting the Weights of Sustainability Criteria for the Appraisal of Transport Projects." *Transport* 30(3):298–306. doi: 10.3846/16484142.2015.1086890.
- Bullard, Diane L., and Dennis L. Christiansen. 1983. *Guidelines for Planning, Designing and Operating Park-and-Ride Lots in Texas*.
- Cables Pérez, Elio Higinio. 2011. "Selección de Personal Con Técnicas de Soft Computing. Propuesta de Desarrollo y de Software."
- Camargo Pérez, Johanna, Martha Helena Carrillo, and Jairo R. Montoya-Torres. 2014. "Multi-Criteria Approaches for Urban Passenger Transport Systems: A Literature Review." *Annals of Operations Research* 226(1):69–87. doi: 10.1007/s10479-014-1681-8.
- Cárdenas-Montes, Miguel. 2017. "Medidas de Distancia." 4.
- Ceballos, Blanca, M. Teresa Lamata, David Pelta, and J. Miguel Sanchez. 2013. "El Método TOPSIS Relativo vs. Absoluto." *Rect@: Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA, ISSN-e 1575-605X, Vol. 14, N°. 1, 2013, Págs. 181-192* 14(1):181–92.
- Ceballos, Blanca, David A. Pelta, and María T. Lamata. 2018. "Rank Reversal and the VIKOR Method: An Empirical Evaluation." *International Journal of Information Technology and Decision Making* 17(2):513–25. doi: 10.1142/S0219622017500237.
- Ceballos Martín, Blanca Alejandra. 2016. "Modelos de Decisión Multi-Criterio En Entornos Con Incertidumbre: Estudio Comparativo y Aplicación."
- Çelen, Aydin. 2014. "Comparative Analysis of Normalization Procedures in TOPSIS Method: With an Application to Turkish Deposit Banking Market." *Informatica (Netherlands)* 25(2):185–208. doi: 10.15388/Informatica.2014.10.
- Choi, Myungseok, and Ghang Lee. 2010. "Decision Tree for Selecting Retaining Wall Systems Based on Logistic Regression Analysis." *Automation in Construction* 19(7):917–28. doi: 10.1016/j.autcon.2010.06.005.
- Chu, Xuehao, Laurel Land, and Ram Pendyala. 2001. "Site Selection, Demand and Facility Size Estimation, and Economic Analysis and Project Justification." *Update of Fdot State Park & Ride Lot Program Planning Manual (April)*:1–59.
- Colin Buchanan Consultores. 2010. *Guía Para La Implantación de Aparcamientos Disuasorios En Andalucía*. Seville, Spain.
- Comunidad de Madrid. 2014. *Encuesta Sintética de Movilidad En La Comunidad de Madrid ESM14*.
- Comunidad de Madrid. 2019. *2018 Tráfico*.
- Conte, Mariana, and Vanesa D'elia. 2018. *Desarrollo Sostenible y Conceptos "Verdes"*. Vol. 192.
- Costa, Carlos A. Ban. E., Ana C. L. Vieira, Mónica Nóbrega, António Quintino, Mónica D. Oliveira, and João Bana E. Costa. 2019. "Collaborative Value Modelling in Corporate Contexts with MACBETH." Pp. 786–94 in *Procedia Computer Science*. Vol. 162. Elsevier B.V.
- Cruz Trejos, Eduardo, and Carmen Bazzani C. 2008. "Análisis de Riesgo En Proyectos de Inversión Un Caso de Estudio." *Scientia et Technica* 1(38):309–14. doi: 10.22517/23447214.3771.
- Cuadras, Carles M. 1989. "Distancias Estadísticas." *Estadística Española* 30(119):295–378.

- Cyert, Richard M., Herbert A. Simon, and Donald B. Trow. 1956. *Observation of a Business Decision*. Vol. 29.
- CYPE Ingenieros, S. A. n.d. "Generador de Precios de La Construcción. España. CYPE Ingenieros, S.A." Retrieved May 8, 2021 (<http://www.generadordeprecios.info/#gsc.tab=0>).
- Dalkey, Norman, and Olaf Helmer. 1963. "An Experimental Application of the DELPHI Method to the Use of Experts." *Management Science* 9(3):458–67. doi: 10.1287/mnsc.9.3.458.
- Davies, Oluwafemi, Pedro Mendes, Kiera Smallbone, and Naglis Malys. 2012. "Characterisation of Multiple Substrate-Specific (d)ITP/(d)XTPase and Modelling of Deaminated Purine Nucleotide Metabolism." *BMB Reports* 45(4):259–64. doi: 10.5483/BMBRep.2012.45.4.259.
- de Brito, Mariana Madruga, and Mariele Evers. 2016. "Multi-Criteria Decision-Making for Flood Risk Management: A Survey of the Current State of the Art." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16(4):1019–33. doi: 10.5194/nhess-16-1019-2016.
- Deepa, N., and K. Ganesan. 2018. "Multi-Class Classification Using Hybrid Soft Decision Model for Agriculture Crop Selection." *Neural Computing and Applications* 30(4):1025–38. doi: 10.1007/s00521-016-2749-y.
- Diakoulaki, D., G. Mavrotas, and L. Papayannakis. 1995. "Determining Objective Weights in Multiple Criteria Problems: The Critic Method." *Computers and Operations Research* 22(7):763–70. doi: 10.1016/0305-0548(94)00059-H.
- Dimić, Srdan, Dragan Pamučar, Srdan Ljubojević, and Boban Dorović. 2016. "Strategic Transport Management Models-the Case Study of an Oil Industry." *Sustainability (Switzerland)* 8(9). doi: 10.3390/su8090954.
- Ebel, Roland, and Susanne Kissmann. 2011. "Desarrollo Sostenible: La Investigación En Un Contexto Intercultural." *Ra Ximhai* 7(1):69–79.
- Edwards, Ward. 1977. "How to Use Multiattribute Utility Measurement for Social Decisionmaking." *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 7(5):326–40. doi: 10.1109/TSMC.1977.4309720.
- Edwards, Ward, and F. Hutton Barron. 1994. "Smarts and Smarter: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement." *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 60(3):306–25. doi: 10.1006/obhd.1994.1087.
- Espada Recarey, Luis, Víctor Manuel Martínez Cacharrón, Pablo Fernández Latorre, Javier Iradiel Sánchez, and Diego Durán. 2009. *Aparcamientos Disuasorios. Propuesta de Aplicación En El Municipio de Vigo*.
- European Council. 1999. *DIRECTIVA 1999/30 Relativa a Los Valores Límite de Dióxido de Azufre, Dióxido de Nitrógeno y Óxidos de Nitrógeno, Partículas y Plomo En El Aire Ambiente*.
- European Environment Agency. 2012. *EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2009, Updated May 2012*.
- European Union, Technical Committee on Transport. Action 342. 2005. *Parking Policies and the Effects on Economy and Mobility. COST Action 342*.
- Faxas Gúzman, Juan Gabriel, and Guido Camilo Guerrero Liquet. 2015. "Análisis de Toma de Decisión Con AHP/ANP de Energías Renovables En República Dominicana." *Anuario de Jóvenes Investigadores* 8:27–29.

- Fenner, Richard, and Charles Ainger. 2020. "A Review of Sustainability in Civil Engineering: Why Much More Commitment Is Needed." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering* 173(2):69–77. doi: 10.1680/jcien.19.00036.
- Fernández-Sánchez, Gonzalo, and Fernando Rodríguez-López. 2010. "A Methodology to Identify Sustainability Indicators in Construction Project Management - Application to Infrastructure Projects in Spain." *Ecological Indicators* 10(6):1193–1201. doi: 10.1016/j.ecolind.2010.04.009.
- Fernández Sánchez, Gonzalo. 2010. "Propuesta de Modelo Para La Evaluación de La Sostenibilidad En La Dirección Integrada de Proyectos de Ingeniería Civil."
- Figueira, José, and Bernard Roy. 2002. "Determining the Weights of Criteria in the ELECTRE Type Methods with a Revised Simos' Procedure." *European Journal of Operational Research* 139(2):317–26. doi: 10.1016/S0377-2217(01)00370-8.
- Fontana, Marcele Elisa, Danielle Costa Morais, and Adiel Teixeira De Almeida. 2011. "A MCDM Model for Urban Water Conservation Strategies Adapting Simos Procedure for Evaluating Alternatives Intra-Criteria." Pp. 564–78 in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Vol. 6576 LNCS. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Frey, H. Christopher, and Sumeet R. Patil. 2002. "Identification and Review of Sensitivity Analysis Methods." Pp. 553–78 in *Risk Analysis*. Vol. 22. John Wiley & Sons, Ltd.
- Fülöp, János. 2005. *Introduction to Decision Making Methods*.
- García-Cascales, M. Socorro, and M. Teresa Lamata. 2012. "On Rank Reversal and TOPSIS Method." *Mathematical and Computer Modelling* 56(5–6):123–32. doi: 10.1016/j.mcm.2011.12.022.
- García-Cascales, María Del Socorro. 2009. "Métodos Para La Comparación de Alternativas Mediante Un Sistema de Ayuda a La Decisión (S.A.D.) y 'Soft Computing.'" M^a del Socorro García Cascales.
- Gento Municio, Angel Manuel, and Alfonso Redondo Castán. 2005. "Comparación Del Método ELECTRE III y PROMETHEE II : Aplicación Al Caso de Un Automóvil." *IX Congreso de Ingeniería de Organización Gijón* (January):1–11.
- Ghorbani, Hamid. 2019. "Mahalanobis Distance and Its Application for Detecting Multivariate Outliers." *Facta Universitatis Series: Mathematics and Informatics* 34(3):583–95. doi: 10.22190/FUMI1903583G.
- Gillis, Dominique, Ivana Semanjski, and Dirk Lauwers. 2016. "How to Monitor Sustainable Mobility in Cities? Literature Review in the Frame of Creating a Set of Sustainable Mobility Indicators." *Sustainability (Switzerland)* 8(1):1–30.
- Ginevičius, Komualdas. 2008. "Normalization of Quantities of Various Dimensions." *Journal of Business Economics and Management* 9(1):79–86. doi: 10.3846/1611-1699.2008.9.79-86.
- Giron, Xavier, and Daniel Madrid. 2008. "Comparación de Dos Métodos de Toma de Decisiones Multicriterio: MACBETH y PROMETHÉE."
- Gobierno de España. 2011. *Real Decreto 102/2011, de 28 de Enero, Relativo a La Mejora de La Calidad Del Aire*.
- Guerrero-Liquet, Guido C., Juan Miguel Sánchez-Lozano, María Socorro García-Cascales, María Teresa Lamata, and José Luis Verdegay. 2016. "Decision-Making for Risk Management in

- Sustainable Renewable Energy Facilities: A Case Study in the Dominican Republic." *Sustainability (Switzerland)* 8(5). doi: 10.3390/su8050455.
- Guillen, ST, MS Trejos, and R. Canales. 1998. "A Robustness Index of Binary Preferences." in *14th International Conference on Multiple Criteria Decision Making*. Charlotte, Virginia.
- Haddad, Malik Jamal. 2019. "Using Sensitivity Analysis to Select Discrete Multiple Criteria Decision Making Methods for Management and Engineering."
- Hajkowicz, Stefan, and Kerry Collins. 2007. "A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management." *Water Resources Management* 21(9):1553–66.
- Hallowell, Matthew R., and John A. Gambatese. 2010. "Qualitative Research: Application of the Delphi Method to CEM Research." *Journal of Construction Engineering and Management* 136(1):99–107. doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000137.
- Hinojo, Joan. 2011. *El Aparcamiento Eficiente Del Siglo XXI*.
- Hwang, Ching-Lai, and Kwangsun Yoon. 1981. "Methods for Multiple Attribute Decision Making." Pp. 58–191 in.
- Hyde, K. M. 2006. "Uncertainty Analysis Methods For Multi-Criteria Decision Analysis."
- Hyde, K. M., H. R. Maier, and C. B. Colby. 2005. "A Distance-Based Uncertainty Analysis Approach to Multi-Criteria Decision Analysis for Water Resource Decision Making." *Journal of Environmental Management* 77(4):278–90. doi: 10.1016/j.jenvman.2005.06.011.
- Hyde, Kylie M., and Holger R. Maier. 2004. "Incorporating a Distance-Based Uncertainty Analysis Approach Into PROMETHEE." in *17th International Conference on Multiple Criteria Decision Making (MCDM 2004)*. Faculty of Business Administration, Simon Fraser University.
- Idealista. n.d. "Idealista." Retrieved November 8, 2019 (<https://www.idealista.com/>).
- IMO, International Maritime Organization. 1972. *Protocol to the Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter*.
- Instituto Energético de Galicia. n.d. "Unidades de Conversión | Información | Inega: Instituto Enerxético de Galicia." Retrieved June 8, 2021 (http://www.inega.gal/informacion/diccionario_de_termos/unidades_de_conversion.html?idioma=es).
- Instituto Nacional de Estadística (INE). n.d. "Madrid: Población Por Municipios y Sexo." Retrieved November 11, 2019 (<https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=2881&L=0>).
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). 2014. *Propuesta de Documento Reconocido: Factores de Emisión de CO2 y Coeficientes de Paso a Energía Primaria de Diferentes Fuentes de Energía Final Consumidas En El Sector Edificios En España*.
- ISO. 2011. "ISO 21929-1:2011 - Sustainability in Building Construction — Sustainability Indicators — Part 1: Framework for the Development of Indicators and a Core Set of Indicators for Buildings." Retrieved April 21, 2020 (<https://www.iso.org/standard/46599.html>).
- Iturbe, CB, AG Marcos, RE García, and JMC Pelayo. 2010. "Indicadores Para La Sostenibilidad de Las Infraestructuras." *Aepro.Com* 1–11.
- Jahan, Ali, and Kevin L. Edwards. 2015. "A State-of-the-Art Survey on the Influence of

- Normalization Techniques in Ranking: Improving the Materials Selection Process in Engineering Design." *Materials and Design* 65:335–42. doi: 10.1016/j.matdes.2014.09.022.
- Jahan, Ali, Faizal Mustapha, S. M. Sapuan, Md Yusof Ismail, and Marjan Bahraminasab. 2012. "A Framework for Weighting of Criteria in Ranking Stage of Material Selection Process." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 58(1–4):411–20. doi: 10.1007/s00170-011-3366-7.
- Jara Mori, Gonzalo Andrés. 2008. "Estudio de La Aplicabilidad de Materiales Compuestos Al Diseño de Estructuras de Contención de Tierras y Su Interacción Con El Terreno, Para Su Empleo En Obras de Infraestructura Viaria." Universidad Politécnica de Madrid.
- Jelokhani-Niaraki, Mohammadreza, and Jacek Malczewski. 2015. "Decision Complexity and Consensus in Web-Based Spatial Decision Making: A Case Study of Site Selection Problem Using GIS and Multicriteria Analysis." *Cities* 45:60–70. doi: 10.1016/j.cities.2015.03.007.
- Karaşan, Ali, Eda Boltürk, and Cengiz Kahraman. 2019. "A Novel Neutrosophic CODAS Method: Selection among Wind Energy Plant Locations." *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems* 36(2):1491–1504. doi: 10.3233/JIFS-181255.
- Keeney, R. L., and H. Raiffa. 1976. *Decision Making with Multiple Objectives Preferences and Value Tradeoffs*. edited by Wiley. New York.
- Kerisel, J. 1993. "History of Retaining Wall Design." in *Retaining structures*, edited by ICE.
- Kumar, Abhishek, Bikash Sah, Arvind R. Singh, Yan Deng, Xiangning He, Praveen Kumar, and R. C. Bansal. 2017. "A Review of Multi Criteria Decision Making (MCDM) towards Sustainable Renewable Energy Development." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69(October 2016):596–609. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.191.
- Lee, Amy H. I., He Yau Kang, and You Jyun Liou. 2017. "A Hybrid Multiple-Criteria Decision-Making Approach for Photovoltaic Solar Plant Location Selection." *Sustainability (Switzerland)* 9(2). doi: 10.3390/su9020184.
- Lee, Hsing-Chen, and Ching-Ter Chang. 2018. "Comparative Analysis of MCDM Methods for Ranking Renewable Energy Sources in Taiwan." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 92:883–96. doi: 10.1016/j.rser.2018.05.007.
- Lent, Linda K., Chris Holleyman, and Olu Ajayi. 2001. *The Economics of Urban Beaches*. Vol. 4.
- Linkov, I., A. Varghese, S. Jamil, T. P. Seager, G. Kiker, and T. Bridges. 2006. "Multi-Criteria Decision Analysis: A Framework for Structuring Remedial Decisions at Contaminated Sites." Pp. 15–54 in *Comparative Risk Assessment and Environmental Decision Making*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Liu, Yanfang, Jiaying Cui, Xuesong Kong, and Chen Zeng. 2016. "Assessing Suitability of Rural Settlements Using an Improved Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution." *Chinese Geographical Science* 26(5):638–55. doi: 10.1007/s11769-016-0821-2.
- Llopis-Albert, Carlos, and Daniel Palacios-Marques. 2017. "Applications of Ordered Weighted Averaging (OWA) Operators in Environmental Problems." *Multidisciplinary Journal for Education, Social and Technological Sciences* 4(1):52. doi: 10.4995/muse.2017.7001.
- Macharis, Cathy, Sara Tori, Alice de Séjournet, Imre Keseru, and Lieselot Vanhaverbeke. 2021. "Can the COVID-19 Crisis Be a Catalyst for Transition to Sustainable Urban Mobility? Assessment of the Medium- and Longer-Term Impact of the COVID-19 Crisis on Mobility

- in Brussels." *Frontiers in Sustainability* 0:64. doi: 10.3389/FRSUS.2021.725689.
- Macías, M., and J. García Navarro. 2010. "Metodología y Herramienta VERDE Para La Evaluación de La Sostenibilidad En Edificios." *Informes de La Construcción* 62(517):87–100. doi: 10.3989/ic.08.056.
- MAGRAMA (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente). 2016. *Factores de Emisión. Registro de Huella de Carbono, Compensación y Proyectos de Absorción de Dióxido de Carbono*.
- Mahalanobis, P. C. 1936. "On the Generalized Distance in Statistics." *Proceedings of the National Institute of Sciences* 2:49–55. doi: 10.1145/1390156.1390302.
- Maliene, Vida, Robert Dixon-Gough, and Naglis Malys. 2018. "Dispersion of Relative Importance Values Contributes to the Ranking Uncertainty: Sensitivity Analysis of Multiple Criteria Decision-Making Methods." *Applied Soft Computing Journal* 67:286–98. doi: 10.1016/j.asoc.2018.03.003.
- Mardani, Abbas, Ahmad Jusoh, Edmundas Zavadskas, Fausto Cavallaro, and Zainab Khalifah. 2015. "Sustainable and Renewable Energy: An Overview of the Application of Multiple Criteria Decision Making Techniques and Approaches." *Sustainability* 7(10):13947–84. doi: 10.3390/su71013947.
- Mardani, Abbas, Edmundas Kazimieras Zavadskas, Zainab Khalifah, Ahmad Jusoh, and Khalil M. D. Nor. 2016. "Multiple Criteria Decision-Making Techniques in Transportation Systems: A Systematic Review of the State of the Art Literature." *Transport* 31(3):359–85. doi: 10.3846/16484142.2015.1121517.
- Martínez Gómez, Javier, Mario Chérrez Troya, Edilberto Antonio Llanes Cedeño, and Diana Peralta Zurita. 2018. "Métodos Multicriterio Aplicados En La Selección de Un Material Para Discos de Freno." *Ingenius* (20):83–95. doi: 10.17163/ings.n20.2018.08.
- Martínez Rodríguez, Elena. 2007. "Aplicación Del Proceso Jerárquico de Análisis En La Selección de La Localización de Una PYME." *Anuario Jurídico y Económico Escurialense* XL:523–42.
- Medeiros, C. P., M. H. Alencar, and A. T. de Almeida. 2017. "Multidimensional Risk Evaluation of Natural Gas Pipelines Based on a Multicriteria Decision Model Using Visualization Tools and Statistical Tests for Global Sensitivity Analysis." *Reliability Engineering and System Safety* 165:268–76. doi: 10.1016/j.ress.2017.04.002.
- De Medina-Salas, Lorena, Eduardo Castillo-González, Mario Rafael Giraldo-Díaz, and Víctor Guzmán-González. 2017. "Analysis of Economical and Environmental Costs for the Selection of Municipal Solid Waste Treatment and Disposal Scenarios through Multicriteria Analysis (ELECTRE Method)." *Sustainability (Switzerland)* 9(11). doi: 10.3390/su9111758.
- Meek, Stuart, Stephen Ison, and Marcus Enoch. 2008. "Role of Bus-Based Park and Ride in the UK: A Temporal and Evaluative Review." *Transport Reviews* 28(6):781–803. doi: 10.1080/01441640802059152.
- Mészáros, Csaba, and Tamás Rapcsák. 1996. "On Sensitivity Analysis for a Class of Decision Systems." *Decision Support Systems* 16(3):231–40. doi: 10.1016/0167-9236(95)00012-7.
- Mingardo, Giuliano. 2013. "Transport and Environmental Effects of Rail-Based Park and Ride: Evidence from the Netherlands." *Journal of Transport Geography* 30:7–16. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2013.02.004.

- Ministerio de Fomento. Gobierno de España. 1999. *Tipologías de Muros de Carreteras*.
- Ministerio de Fomento. Gobierno de España. 2006a. *Código Técnico de La Edificación. Sección HE 3 Eficiencia Energética de Las Instalaciones de Iluminación*.
- Ministerio de Fomento. Gobierno de España. 2006b. *Guía Para El Proyecto y La Ejecución de Muros de Escollera En Obras de Carretera*.
- Ministerio de Fomento. Gobierno de España. 2014. *Prescripciones y Recomendaciones Técnicas Relativas a Los Contenidos Mínimos a Incluir En Los Estudios de Rentabilidad de Los Estudios Informativos o Anteproyectos*.
- Ministerio de Fomento. Gobierno de España. 2016. *Estudio de Accidentes*.
- Ministerio de Fomento. 2010. *Libro Blanco de Sostenibilidad En El Planeamiento Urbanístico Español. Anexo I: Listado de Criterios de Sostenibilidad*.
- Ministerio de Industria. Gobierno de España. 2008. *Reglamento de Eficiencia Energética En Instalaciones de Alumbrado Exterior y Sus Instrucciones Técnicas Complementarias EA-01 a EA-07*.
- Ministerio de la Presidencia. Gobierno de España. 2018. *Orden PCI/810/2018, de 27 de Julio, Por La Que Se Modifican Los Anexos II, XI y XVIII Del Reglamento General de Vehículos, Aprobado Por Real Decreto 2822/1998*.
- Miteco (Ministerio para la Transición Ecológica). 2013a. *Disposición 12913 Del BOE Núm. 296 de 2013. Ley 21/2013, de 9 de Diciembre, de Evaluación Ambiental*.
- Miteco (Ministerio para la Transición Ecológica). 2013b. *Legislación de Evaluación Ambiental*.
- Mohsen, Omidvar, and Nirumand Fereshteh. 2017. "An Extended VIKOR Method Based on Entropy Measure for the Failure Modes Risk Assessment – A Case Study of the Geothermal Power Plant (GPP)." *Safety Science* 92:160–72. doi: 10.1016/j.ssci.2016.10.006.
- Montalbán-Domingo, Laura, Tatiana García-Segura, M. Amalia Sanz, and Eugenio Pellicer. 2019. "Social Sustainability in Delivery and Procurement of Public Construction Contracts." *Journal of Management in Engineering* 35(2). doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000674.
- Moreno-Jiménez, José María, Juan Aguarón Joven, Francisco Cano Sevilla, and María Teresa Escobar Urmeneta. 1998. "Validez, Robustez y Estabilidad En Decisión Multicriterio. Análisis de Sensibilidad En El Proceso Analítico Jerárquico." *Rev.R.Acad. Cien.Exact.Fis.Nat.* 92(4):387–97.
- Mosadeghi, Razieh, Jan Warnken, Rodger Tomlinson, and Hamid Mirfenderesk. 2013. "Uncertainty Analysis in the Application of Multi-Criteria Decision-Making Methods in Australian Strategic Environmental Decisions." *Journal of Environmental Planning and Management* 56(8):1097–1124. doi: 10.1080/09640568.2012.717886.
- Mufazzal, Sameera, and S. M. Muzakkir. 2018. "A New Multi-Criterion Decision Making (MCDM) Method Based on Proximity Indexed Value for Minimizing Rank Reversals." *Computers and Industrial Engineering* 119:427–38. doi: 10.1016/j.cie.2018.03.045.
- Mullur, Anoop, Christopher A. Mattson, and Achille Messac. 2003. "New Decision Matrix Based Approach for Concept Selection Using Linear Physical Programming." in *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*.

- Muñoz-Medina, Belen, Manuel Romana, and Javier Ordóñez. 2015. "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* 34–44.
- Naciones Unidas. 1991. "Protocolo Sobre Evaluación Ambiental Estratégica Al Convenio Sobre La Evaluación Del Impacto En El Medio Ambiente En Un Contexto Transfronterizo." 1–22.
- Naciones Unidas. 1997. "Cumbre Para La Tierra + 5." Pp. 1–9 in *Periodo extraordinario de sesiones de la Asamblea General para el Examen y la Evaluación de la Aplicación del Programa 21*.
- Naciones Unidas. 2008. *Kyoto Protocol Reference Manual*.
- Naciones Unidas. 2013. *Conferencia de Las Partes En Calidad de Reunión de Las Partes En El Protocolo de Kyoto Informe*.
- Naciones Unidas. 2015a. *Marco de Sendai Para La Reducción Del Riesgo de Desastres 2015-2030*.
- Naciones Unidas. 2015b. *Transformar Nuestro Mundo: La Agenda 2030 Para El Desarrollo Sostenible*.
- Naciones Unidas. 2019. *Informe de Los Objetivos de Desarrollo Sostenible*.
- Naciones Unidas. n.d. "La Agenda Para El Desarrollo Sostenible - Desarrollo Sostenible." Retrieved February 24, 2020 (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>).
- Nemoto, Tomoko, and David Beglar. 2014. "Developing Likert-Scale Questionnaires Campus Reference Data." Pp. 1–8 in *JALT2013 Conference Proceedings*.
- Noel, Errol C. 1988. "Park-and-Ride: Alive, Well, and Expanding in the United States." *Journal of Urban Planning and Development* 114(1):2–13. doi: 10.1061/(asce)0733-9488(1988)114:1(2).
- Odgaard, T., C. Kelly, and J. Laird. 2005. *HEATCO. Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment*.
- Odu, G. O. 2019. "Weighting Methods for Multi-Criteria Decision Making Technique." *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* 23(8):1449. doi: 10.4314/jasem.v23i8.7.
- OECD Environment Directorate. 2004. *OECD Key Environmental Indicators*.
- Opricovic, Serafim, and Gwo Hsiung Tzeng. 2004. "Compromise Solution by MCDM Methods: A Comparative Analysis of VIKOR and TOPSIS." *European Journal of Operational Research* 156(2):445–55. doi: 10.1016/S0377-2217(03)00020-1.
- Opricovic, Serafim, and Gwo Hsiung Tzeng. 2007. "Extended VIKOR Method in Comparison with Outranking Methods." *European Journal of Operational Research* 178(2):514–29. doi: 10.1016/j.ejor.2006.01.020.
- Özen, Halit; Saraçoğlu, Abdulsamet; Boz, Fatih Kerem;, and Sümeyye Şeyma Kusakci. 2016. "Evaluation of Park and Ride Facilities in Istanbul Using Geographic Information Systems (GIS)." *Sigma J Eng & Nat Sci* 7(1):79–88.
- Pamučar, Dragan, Željko Stević, and Siniša Sremac. 2018. "A New Model for Determining Weight Coefficients of Criteria in MCDM Models: Full Consistency Method (FUCOM)." *Symmetry* 10(9):393. doi: 10.3390/sym10090393.

- Parkhurst, G. 2000. "Influence of Bus-Based Park and Ride Facilities on Users' Car Traffic." *Transport Policy* 7(2):159–72. doi: 10.1016/S0967-070X(00)00006-8.
- Parkhurst, Graham, and Stuart Meek. 2014. "The Effectiveness of Park-and-Ride as a Policy Measure for More Sustainable Mobility." *Transport and Sustainability* 5:185–211. doi: 10.1108/S2044-994120140000005020.
- Penadés-Plà, Vicent, Tatiana García-Segura, José Martí, and Víctor Yepes. 2016. "A Review of Multi-Criteria Decision-Making Methods Applied to the Sustainable Bridge Design." *Sustainability* 8(12):1295. doi: 10.3390/su8121295.
- Penadés Plá, Vicente. 2017. "Aplicación de La Toma de Decisión Multi-Criterio Al Diseño Sostenible de Puentes de Hormigón."
- Pero, Margherita, Antonella Moretto, Eleonora Bottani, and Barbara Bigliardi. 2017. "Environmental Collaboration for Sustainability in the Construction Industry: An Exploratory Study in Italy." *Sustainability* 9(1):125. doi: 10.3390/su9010125.
- Polyfelt Geosynthetics. 2010. "Geosynthetic Reinforced Retaining Structures. Cost Study." in *Polyfelt Technical Meeting*.
- Pons, Joaquín J., Vicent Penadés-Plà, Víctor Yepes, and José V. Martí. 2018. "Life Cycle Assessment of Earth-Retaining Walls: An Environmental Comparison." *Journal of Cleaner Production* 192:411–20. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.268.
- Pons, Oriol, Albert de la Fuente, and Antonio Aguado. 2016. "The Use of MIVES as a Sustainability Assessment MCDM Method for Architecture and Civil Engineering Applications." *Sustainability (Switzerland)* 8(5). doi: 10.3390/su8050460.
- Pöyhönen, Mari, and Raimo P. Hämäläinen. 2001. "On the Convergence of Multiattribute Weighting Methods." *European Journal of Operational Research* 129(3):569–85. doi: 10.1016/S0377-2217(99)00467-1.
- Qin, Chunxu, Bingdian Li, Bing Shi, Tao Qin, Jiangtao Xiao, and Yuelai Xin. 2019. "Location of Substation in Similar Candidates Using Comprehensive Evaluation Method Base on DHGF." *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 146:152–58. doi: 10.1016/j.measurement.2019.05.081.
- RACC. 2009. *La Congestión En Los Corredores de Acceso a Madrid*.
- Ramezaniyanpour, Ali Akbar, Seyyed Alireza Tabatabaei, Mahyar Poulrak, and Majid Abareshi. 2016. "AHP-VIKOR Bridge Structural System Selection in Urban Areas Tehran Interchanges Case Study." *AMBIENT SCIENCE* 3(02 / Sp1). doi: 10.21276/ambi.2016.03.2.ta05.
- Ranganathan, Janet, Dave Moorcroft, Jasper Koch, and Pankaj Bhatia. 2010. *Protocolo de Gases Efecto Invernadero*.
- Red Eléctrica Española. n.d. "Mercados y Precios | ESIOS Electricidad · Datos · Transparencia." Retrieved June 26, 2021 (<https://www.esios.ree.es/es/mercados-y-precios>).
- Ríos, Sixto. 1998. "Algunos Progresos y Problemas En La Ciencia de La Decisión." *Revista Matemática Complutense* 11(1). doi: 10.5209/rev_rema.1998.v11.n1.17310.
- Rivas, Fabio. 1998. "El Significado de La Significancia." *Biomédica* 18(4):291. doi: 10.7705/biomedica.v18i4.1000.
- Rodríguez, Fernando, and Gonzalo Fernández. 2010. "Sustainable Engineering: New Objectives

- for Construction Projects.” *Revista Ingenieria de Construccion* 25(2):147–60. doi: 10.4067/S0718-50732010000200001.
- Roy, B. 1968. “Classement et Choix En Présence de Points de Vue Multiples.” *RAIRO - Operations Research - Recherche Opérationnelle* 2(V1):57–75.
- Roy, Bernard. 1991. “The Outranking Approach and the Foundations of Electre Methods.” *Theory and Decision* 31(1):49–73. doi: 10.1007/BF00134132.
- RPS Group, Environmental Consulting Company. 2009. “The Effectiveness and Sustainability of Park and Ride.” (June 2009).
- Saaty, Rozann W. 2016. *Decision Making in Complex Environments. The Analytic Network Process (ANP) for Decision Making with Dependence and Feedback.*
- Saaty, T. L. 1996. “Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process.” P. 370 in *RWS Publications, 1996, ISBN 0-9620317-9-8.*
- Saaty, Thomas L. 1990. “How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process.” *European Journal of Operational Research* 48(1):9–26. doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.
- Saaty, Thomas L. 2004. “Fundamentals of the Analytic Network Process — Multiple Networks with Benefits, Costs, Opportunities and Risks.” *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 13(3):348–79. doi: 10.1007/s11518-006-0171-1.
- Salari, M., S. M. Shariat, R. Rahimi, and S. Dashti. 2018. “Land Capability Evaluation for Identifying Industrial Zones: Combination Multi-Criteria Decision-Making Method with Geographic Information System.” *International Journal of Environmental Science and Technology*. doi: 10.1007/s13762-018-1925-2.
- Santabàrbara, Javier. 2019. “Cálculo Del Intervalo de Confianza Para Los Coeficientes de Correlación Mediante Sintaxis En SPSS.” *REIRE Revista d Innovació i Recerca En Educació* 12 (2):1–14. doi: 10.1344/reire2019.12.228245.
- Saura-Calixto, Pilar, and María Angeles Hernández-Prados. 2008. “La Evolución Del Concepto de Sostenibilidad y Su Incidencia En La Educación Ambiental.” *Ediciones Universidad de Salamanca* 20:179–204.
- Schitea, Dorin, Muhammet Deveci, Mihaela Iordache, Kürşad Bilgili, İbrahim Zeki Akyurt, and Ioan Iordache. 2019. “Hydrogen Mobility Roll-up Site Selection Using Intuitionistic Fuzzy Sets Based WASPAS, COPRAS and EDAS.” *International Journal of Hydrogen Energy* 44(16):8585–8600. doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.011.
- Sennaroglu, Bahar, and Gulsay Varlik Celebi. 2018. “A Military Airport Location Selection by AHP Integrated PROMETHEE and VIKOR Methods.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 59:160–73. doi: 10.1016/j.trd.2017.12.022.
- Shahrasbi, Alireza, Mehdi Shamizanjani, M. H. Alavidooost, and Babak Akhgar. 2017. “An Aggregated Fuzzy Model for the Selection of a Managed Security Service Provider.” *International Journal of Information Technology and Decision Making* 16(3):625–84. doi: 10.1142/S0219622017500158.
- Shannon, C. E. 1948. “A Mathematical Theory of Communication.” *The Bell System Technical Journal* XXVII(3):379–423.
- Shumaiza, Muhammad Akram, Ahmad N. Al-Kenani, and José Carlos R. Alcantud. 2019. “Group Decision-Making Based on the VIKOR Method with Trapezoidal Bipolar Fuzzy Information.” *Symmetry* 11(10):1313. doi: 10.3390/sym11101313.

- Siemens plc. 2017. *Madrid 2020-2030: Un Aire Más Limpio En Una Ciudad Centrada En Sus Ciudadanos*.
- Sierra, Leonardo A., Víctor Yepes, Tatiana García-Segura, and Eugenio Pellicer. 2018. "Bayesian Network Method for Decision-Making about the Social Sustainability of Infrastructure Projects." *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.140.
- Sierra, Leonardo A., Víctor Yepes, and Eugenio Pellicer. 2018. "A Review of Multi-Criteria Assessment of the Social Sustainability of Infrastructures." *Journal of Cleaner Production*.
- Sigford, J. V., and R. H. Parvin. 2013. "Project Pattern: A Methodology for Determining Relevance in Complex Decision-Making." *IEEE Transactions on Engineering Management* EM-12(1):9–13. doi: 10.1109/tem.1965.6446433.
- Simos, J. 1989. "L'évaluation Environnementale."
- Siskos, Eleftherios, and Nikos Tsotsolas. 2015. "Elicitation of Criteria Importance Weights through the Simos Method: A Robustness Concern." *European Journal of Operational Research* 246(2):543–53. doi: 10.1016/j.ejor.2015.04.037.
- Solymosi, Tamás, and József Dombi. 1986. "A Method for Determining the Weights of Criteria: The Centralized Weights." *European Journal of Operational Research* 26(1):35–41. doi: 10.1016/0377-2217(86)90157-8.
- Song, Jae Yeol, and Eun Sung Chung. 2016. "Robustness, Uncertainty and Sensitivity Analyses of the TOPSIS Method for Quantitative Climate Change Vulnerability: A Case Study of Flood Damage." *Water Resources Management* 30(13):4751–71. doi: 10.1007/s11269-016-1451-2.
- South Carolina Department of Transportation (SCDOT). 2010. *SCDOT Geotechnical Design Manual*.
- Suarez Galarza, María Belén. 2015. "Definición de Indicadores Para La Selección de Rutas Utilizando El Método Pattern. Caso Estudio Autopista Eje E-25 Entre Huaquillas y La Y de Tillales."
- Suprayoga, Gede B., Martha Bakker, Patrick Witte, and Tejo Spit. 2020. "A Systematic Review of Indicators to Assess the Sustainability of Road Infrastructure Projects." *European Transport Research Review* 12(1):19. doi: 10.1186/s12544-020-0400-6.
- Tecniberia, and Fundación Biodiversidad. n.d. "HueCO2 | Huella de Carbono de La Construcción de Obras Públicas." Retrieved May 10, 2021 (<http://hueco2.tecniberia.es/>).
- Tian, Zhang peng, Jian qiang Wang, and Hong yu Zhang. 2018. "An Integrated Approach for Failure Mode and Effects Analysis Based on Fuzzy Best-Worst, Relative Entropy, and VIKOR Methods." *Applied Soft Computing Journal* 72(3):636–46. doi: 10.1016/j.asoc.2018.03.037.
- Triantaphyllou, Evangelos, and Alfonso Sánchez. 1997. "A Sensitivity Analysis Approach for Some Deterministic Multi-Criteria Decision-Making Methods." *Decision Sciences* 28(1):151–94. doi: 10.1111/j.1540-5915.1997.tb01306.x.
- Ugwu, O. O., M. M. Kumaraswamy, A. Wong, and S. T. Ng. 2006. "Sustainability Appraisal in Infrastructure Projects (SUSAIP): Part 1. Development of Indicators and Computational Methods." *Automation in Construction* 15(2):239–51. doi: 10.1016/j.autcon.2005.05.006.
- UNFCCC. Conference of the Parties (COP). 2015. *ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT - Conference of the Parties COP 21*. Vol. 21932.

- Vafaei, Nazanin, Rita A. Ribeiro, and Luis M. Camarinha-Matos. 2016. "Normalization Techniques for Multi-Criteria Decision Making: Analytical Hierarchy Process Case Study." Pp. 261–68 in *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Vol. 470. Springer New York LLC.
- Vega, Alberto, Juan Aguarón, Jorge García-Alcaraz, and José María Moreno-Jiménez. 2014. "Notes on Dependent Attributes in TOPSIS." *Procedia Computer Science* 31(I tqm):308–17. doi: 10.1016/j.procs.2014.05.273.
- Villacreses, Geovanna, Gabriel Gaona, Javier Martínez-Gómez, and Diego Juan Jijón. 2017. "Wind Farms Suitability Location Using Geographical Information System (GIS), Based on Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods: The Case of Continental Ecuador." *Renewable Energy* 109:275–86. doi: 10.1016/J.RENENE.2017.03.041.
- Villanueva Ponce, Rodrigo, and Jorge Luis García Alcaraz. 2013. "Evaluación de Tecnología Utilizando TOPSIS En Presencia de Multi-Colinealidad En Atributos: ¿Por Qué Usar Distancia de Mahalanobis?" *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia* 67:31–42.
- Wang, Ying Ming, and Ying Luo. 2009. "On Rank Reversal in Decision Analysis." *Mathematical and Computer Modelling* 49(5–6):1221–29. doi: 10.1016/j.mcm.2008.06.019.
- Wang, Zheng Xin, Dan Dan Li, and Hong Hao Zheng. 2018. "The External Performance Appraisal of China Energy Regulation: An Empirical Study Using a TOPSIS Method Based on Entropy Weight and Mahalanobis Distance." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15(2). doi: 10.3390/ijerph15020236.
- Watróbski, Jarosław, Krzysztof Małeck, Kinga Kijewska, Stanisław Iwan, Artur Karczmarczyk, and Russell G. Thompson. 2017. "Multi-Criteria Analysis of Electric Vans for City Logistics." *Sustainability (Switzerland)* 9(8). doi: 10.3390/su9081453.
- Von Winterfeldt, D., and W. Edwards. 1986. *Decision Analysis and Behavioral Research*. edited by Cambridge University Press. Cambridge.
- Wira Trise Putra, Dede, and Adrian Agustian Punggara. 2018. "Comparison Analysis of Simple Additive Weighting (SAW) and Weighed Product (WP) in Decision Support Systems." in *MATEC Web of Conferences*. Vol. 215.
- Wu, Yunna, Ting Zhang, Chuanbo Xu, Xiaoyu Zhang, Yiming Ke, Han Chu, and Ruhang Xu. 2019. "Location Selection of Seawater Pumped Hydro Storage Station in China Based on Multi-Attribute Decision Making." *Renewable Energy* 410–25. doi: 10.1016/j.renene.2019.02.091.
- Yager, Ronald R. 1988. "On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multicriteria Decisionmaking." *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 18(1):183–90. doi: 10.1109/21.87068.
- Yager, Ronald R. 2004. "Generalized OWA Aggregation Operators." *Fuzzy Optimization and Decision Making* 3(1):93–107. doi: 10.1023/B:FODM.0000013074.68765.97.
- Ye, Jun. 2010. "Fuzzy Decision-Making Method Based on the Weighted Correlation Coefficient under Intuitionistic Fuzzy Environment." *European Journal of Operational Research* 205(1):202–4. doi: 10.1016/j.ejor.2010.01.019.
- Zardari, Noorul Hassan, Kamal Ahmed, Sharif Moniruzzaman Shirazi, and Zulkifli Bin Yusop. 2015. *Weighting Methods and Their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management*.

- Zavadskas, Edmundas Kazimieras, Jonas Šaparauskas, and Jurgita Antuheviciene. 2018. "Sustainability in Construction Engineering." *Sustainability (Switzerland)* 10(7):1–7. doi: 10.3390/su10072236.
- Zavadskas, Edmundas Kazimieras, and Zenonas Turskis. 2010. "A New Additive Ratio Assessment (ARAS) Method in Multicriteria Decision-Making." *Technological and Economic Development of Economy* 16(2):159–72. doi: 10.3846/tede.2010.10.
- Zhao, Haoran, Huiru Zhao, and Sen Guo. 2018. "Comprehensive Performance Evaluation of Electricity Grid Corporations Employing a Novel MCDM Model." *Sustainability (Switzerland)* 10(7). doi: 10.3390/su10072130.
- Zhou, Xiang, and Miao Wan. 2014. "Comprehensive Evaluation Research of Low-Carbon Economy Level for Provinces and Cities of China - VIKOR Method Based on Mahalanobis Distance." Pp. 257–62 in *International Conference on Social Science and Management*.
- Zijlstra, Toon, Thomas Vanoutrive, and Ann Verhetsel. 2015. "A Meta-Analysis of the Effectiveness of Park-and-Ride Facilities." *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 15(4):597–612. doi: 10.18757/ejtir.2015.15.4.3099.



ANEXOS

ANEXO 1. ALGORITMO COMPUTACIONAL MÉTODO VIKOR MODIFICADO CON LA DISTANCIA DE MAHALANOBIS CÁLCULO VALORES S_i

```

S=zeros(size(normalizada,1),1);
R=zeros(size(normalizada,1),1);
Q=zeros(size(normalizada,1),1);
w=pesosentropia;
for i=1:size(normalizada,1)
    for j=1:length(pesosentropia)
        normalizadap(i,j)=w(j)*normalizada(i,j);
    end
end

for i=1:size(normalizada,1)
    for j=1:length(pesosentropia)
        distanciaponderada(i,j)=w(j)*(solucionideal(1,j)-
alternativas(i,j));
    end
end

distanciaponderada=distanciaponderada'

for i=1:size(normalizadap,1)

S(i)=sqrt(((distanciaponderada(:,i))')*pinv(cov((alternativas)))
*(distanciaponderada(:,i)));
    R(i)=max(abs(normalizadap(i,:)));

end
Sneg=max(S);
Spos=min(S);
Rneg=max(R);
Rpos=min(R);
for i=1:size(normalizadap,1)
    Q(i)=0.5*((S(i)-Spos)/(Sneg-Spos))+0.5*((R(i)-Rpos)/(Rneg-
Rpos));
end
for i=1:(length(pesosentropia)-1)
    hold on
    scatter(normalizadap(:,i),normalizadap(:,i+1))
    hold off
end
disp(S)
disp(R)
disp(Q)

[RS IS]=sort(S,'ascend')
[RR IR]=sort(R,'ascend')
[RQ IQ]=sort(Q,'ascend')
ranking=IQ

resultados=[S,R,Q]

```

ANEXO 2. ALGORITMO COMPUTACIONAL MÉTODO VIKOR MODIFICADO CON LA DISTANCIA DE MAHALANOBIS CÁLCULO VALORES R_i

```

S=zeros(size(normalizada,1),1);
R=zeros(size(normalizada,1),1);
Q=zeros(size(normalizada,1),1);
w=pesosentropia;
for i=1:(size(normalizada,1))
    for j=1:length(w)
        normalizadap(i,j)=w(j)*normalizada(i,j);
    end
end

for i=1:size(normalizada,1)
    for j=1:length(pesosentropia)
        distanciaponderada(i,j)=w(j)*(solucionideal(1,j)-
alternativas(i,j));
    end
end

distanciaponderada=distanciaponderada'

for i=1:size(normalizadap,1)
    S(i)=sum(normalizadap(i,:));

R(i)=sqrt(((distanciaponderada(:,i))')*pinv(cov((alternativas)))
*(distanciaponderada(:,i))));
end
Sneg=max(S);
Spos=min(S);
Rneg=max(R);
Rpos=min(R);
for i=1:size(normalizadap,1)
    Q(i)=0.5*((S(i)-Spos)/(Sneg-Spos))+0.5*((R(i)-Rpos)/(Rneg-
Rpos));
end
for i=1:(length(w)-1)
    hold on
    scatter(normalizadap(:,i),normalizadap(:,i+1))
    hold off
end
disp(S)
disp(R)
disp(Q)

[RS IS]=sort(S,'ascend')
[RR IR]=sort(R,'ascend')
[RQ IQ]=sort(Q,'ascend')
ranking=IQ

resultados=[S,R,Q]

```

