



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Programa de Doctorado en Ingeniería Civil

Sistema de evaluación y priorización de inversiones públicas

Tesis doctoral realizada por:

David Boix Cots

Dirigida por:

Pablo Pujadas Álvarez

Francesc Pardo Bosch

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Barcelona, Octubre 2023

AGRADECIMIENTOS

Mis mayores agradecimientos debo dirigirlos a Antonio Aguado, Pablo Pujadas y Francesc Pardo. Por Antonio, mi director los dos primeros años, quien se animó a iniciar este camino conmigo, he podido dar mis primeros pasos en el mundo académico. Gracias por compartir tus conocimientos conmigo y ayudarme a perfilar la idea inicial de lo que es hoy esta Tesis Doctoral.

A Pablo Pujadas, quien, sin importar las horas, siempre ha estado dispuesto a ayudarme en lo que necesitase, resolviendo innumerables dudas. Agradezco tu paciencia al aguantar mi cabezonería (que es más grande de lo que me gustaría admitir) y ser un maestro comprensivo en todo momento, guiándome durante todo este viaje y animándome en los momentos más difíciles. Y gracias, también, por ser mi mentor en la universidad y ayudarme a dar mis primeros pasos como profesor, orientándome en mi camino de futuro.

A Francesc Pardo, quien en nuestros debates sobre el contenido de la tesis también ha tenido que lidiar con mi testarudez. Gracias por estar siempre disponible cuando he necesitado ayuda académica o personal, y por tus ánimos y esfuerzos para que pueda seguir este camino. Te aseguro que intentaré evitar los Párrafo-frase.

Tanto Pablo como Francesc han sido los mejores directores que podía haber pedido, pues su orientación, ayuda, comentarios y sugerencias, tanto en el doctorado como en los artículos académicos, han ayudado a hacer de esta Tesis lo que es hoy.

Quiero hacer una mención especial al profesor Alessio Ishizaka y agradecerle que haya compartido sus conocimientos y experiencia conmigo, así como a Vanessa Assumma, a quien considero compañera y amiga. *I would like to thank Professor Alessio Ishizaka for his unbelievable kindness, for giving me the opportunity to work for 6 months at NEOMA and for sharing his knowledge with me in so many subjects. And to you, Vanessa, thank you for so many laughs in the office and during meals, and for being my Rouen buddy. I hope that life has more conferences in store for us together.*

También quiero agradecer todas las gestiones administrativas que han realizado para mí Silvia y Trinidad, siempre atentas, amables y pacientes con mis múltiples dudas desde el primer día.

He dejado para el final de esta sección a las personas más importantes de mi vida, mi madre y mi padre, Marisa y Josep Maria, y mi abuela, Pepita. Gracias por criarme de la mejor forma posible, por vuestro apoyo incondicional, por vuestros consejos y por vuestra ayuda siempre que la he necesitado. Vuestra fortaleza y dedicación siempre me han inspirado a perseguir mis sueños, y sin vosotros esta tesis no hubiera sido posible. Este logro es tanto suyo como mío, y les estaré eternamente agradecido.

A todos, gracias.

RESUMEN

En esta Tesis Doctoral se afronta uno de los desafíos más significativos de la administración española: la selección y gestión eficiente de las inversiones públicas. Con este objetivo, se ha desarrollado y presentado el "Sistema de Evaluación y Priorización de Inversiones Públicas" (SEPIP), diseñado específicamente para satisfacer las necesidades de la administración pública. Con ello se pretende contribuir a abrir el camino definitivo del uso de métodos científicos de toma de decisiones como apoyo a la selección de inversiones y actuaciones públicas, superando, de este modo, las barreras que existen en la actualidad.

Para dar inicio al diseño del SEPIP, se han expuesto y analizado las principales técnicas de priorización de alternativas, con el objetivo de seleccionar un método que sirva como base de cálculo para los índices de sostenibilidad de las inversiones. En este contexto, se ha escogido el método multicriterio MIVES, cuyas propiedades y características han sido analizadas y comparadas con las necesidades de la administración pública, hallándose así cinco propiedades a desarrollar para el SEPIP.

La primera propiedad se refiere a la toma de decisiones en grupo, un aspecto crítico dado el contexto de la administración pública. Tras un análisis exhaustivo de los métodos de agregación de opiniones existentes, se ha llegado a la conclusión de que ninguno satisface completamente las necesidades de la administración. Por lo tanto, se ha desarrollado el método HIVES, un enfoque innovador fundamentado en conceptos de matemática estadística y consideraciones sociales. Este nuevo método ha permitido aumentar la correlación entre los actores de decisión y los resultados finales, asegurando una agregación justa, objetiva y ética.

La segunda propiedad aborda la gestión de la incertidumbre. Se han presentado diversas técnicas para manejar esta incertidumbre y seleccionado un conjunto de ellas para formar el sistema de gestión de incertidumbre del SEPIP. Este sistema, que incluye los métodos de atributos de base lingüística, atributos de base lingüística con membresía y simulación de Monte Carlo, garantiza la aplicabilidad del SEPIP en todos los escenarios que podrían ser relevantes para la administración pública. Además, ante la incertidumbre en las opiniones de los decisores, se ha extendido el método HIVES a HIVES Intervalos.

La tercera y cuarta propiedad se enfocan en la gestión de resultados, adaptándolos a las necesidades de la administración pública. En primer lugar, se ha abordado la clasificación, que implica la asignación de grupos o etiquetas a cada inversión según sus índices de sostenibilidad. Con este objetivo, se ha desarrollado MIVES Sorting, un nuevo método de clasificación de alternativas. En segundo lugar, se ha estudiado la optimización, que se refiere a la selección óptima de inversiones dentro de un presupuesto limitado. En este contexto, se ha optado por implementar el método Knapsack en el SEPIP.

La quinta y última propiedad estudia a los efectos adversos en los indicadores. Dada la relevancia que algunos indicadores adquieren en las licitaciones públicas, donde algunos proyectos pueden sacrificar ciertos indicadores en busca de un mejor rendimiento global, se ha desarrollado MIVES Extendido. Este método tiene la capacidad de incorporar funciones negativas, lo que permite la generación de índices negativos para minimizar el resultado final agregado.

Como último paso, el SEPIP ha sido aplicado a un caso real de estudio en la ciudad de Manresa, lo que ha permitido analizar y validar los componentes desarrollados a lo largo de toda esta Tesis Doctoral.

ABSTRACT

This doctoral thesis addresses one of the most significant challenges facing the Spanish administration: the efficient selection and management of public investments. To achieve this goal, the 'Public Investment Evaluation and Prioritization System' (SEPIP, a Spanish acronym) has been developed and presented, specifically designed to meet the needs of the public administration. The aim is to pave the way for the use of scientific decision-making methods in supporting the selection of public investments, thereby overcoming the existing barriers.

To begin the design of SEPIP, the main alternative prioritization techniques have been presented and analysed, with the objective of selecting a method to serve as the basis for calculating sustainability indices for investments. In this context, the multicriteria method MIVES has been chosen, and its properties and characteristics have been examined and compared with the requirements of the public administration, resulting in the identification of five properties to be developed for SEPIP.

The first property relates to group decision-making, a critical aspect given the context of public administration. After a thorough analysis of existing opinion aggregation methods, it has been concluded that none fully meet the administration's needs. Therefore, the HIVES method has been developed, an innovative approach based on statistical mathematics and social considerations. This new method has increased the correlation between decision-makers and results, ensuring fair, objective, and ethical aggregation.

The second property addresses uncertainty management. Various techniques have been presented to handle this uncertainty, and a set of them has been selected to form the SEPIP's uncertainty management system. This system, which includes the linguistic attribute, linguistic attribute with membership, and Monte Carlo simulation methods, ensures the SEPIP's applicability in all scenarios that may be relevant to public administration. Additionally, in the face of uncertainty in decision-makers' opinions, the HIVES method has been extended to HIVES Intervals.

The third and fourth properties focus on results management, adapting them to the needs of public administration. Firstly, classification has been addressed, involving the assignment of groups or labels to each investment based on their sustainability indices. For this purpose, MIVES Sorting, a new classification method, has been developed. Secondly, optimisation, referring to the optimal selection of investments within a limited budget, has been studied. In this context, the Knapsack method has been chosen for implementation in SEPIP.

The fifth and final property examines adverse effects on indicators. Given the significance of certain indicators in public tenders, where some projects may sacrifice specific indicators in pursuit of better overall performance, MIVES Extended has been developed. This method has the capability to incorporate negative functions, allowing for the generation of negative indices to minimize the aggregated result.

Finally, the SEPIP has been applied to a real case study in the city of Manresa, allowing for the analysis and validation of the components developed throughout this Doctoral Thesis.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción

1.1	Introducción	1
1.2	Objetivos.....	2
1.4	Metodología y organización de la tesis	3

Bloque I

Capítulo 2: Estado del conocimiento

2.1	Introducción	5
2.2	Priorización de inversiones públicas.....	6
2.2.1	Razón de ser.....	6
2.2.2	Métodos de priorización de inversiones públicas.....	7
2.3	Selección y definición del método directriz.....	11
2.3.1	Métodos de decisión multicriterio	11
2.3.2	MIVES: Definición y revisión literaria	17
2.4	Necesidades de desarrollo.....	32
2.5	Conclusiones del capítulo	34

Bloque II

Capítulo 3: Toma de decisiones en grupo

3.1	Introducción	37
3.1.1	Razón de ser.....	38
3.2	Clasificación de métodos GDM.....	39
3.2.1	Propuesta de clasificación de métodos GDM.....	41
3.3	Revisión literaria: Métodos de asignación de peso.....	44
3.3.1	Metodología de recopilación de datos.....	44
3.3.2	Sistema de clasificación	46
3.3.3	Resultados y su clasificación	48
3.4	Análisis y necesidades de desarrollo	63
3.4.1	Análisis de características generales	63
3.4.2	Análisis de características internas	65
3.5	Conclusiones del capítulo	70

Capítulo 4: Toma de decisiones en grupo: el método HIVES

4.1	Introducción	73
4.2	Presentación del método HIVES	74

4.2.1	Idea del método.....	74
4.2.2	Axiomas sociales.....	75
4.2.3	Gestión de la influencia previa.....	77
4.2.4	Conceptos matemáticos desarrollados.....	77
4.2.5	Resumen y algoritmo del método.....	81
4.3	Ejemplo de aplicación.....	82
4.3.1	Ejemplo ilustrativo.....	82
4.3.2	Comparación con otros métodos.....	86
4.4	Análisis de sensibilidad.....	88
4.4.1	Análisis de sensibilidad de HIVES.....	88
4.4.2	Análisis de sensibilidad del sistema de influencias previas.....	89
4.4.3	Discusión de los resultados obtenidos.....	91
4.5	Caso de estudio.....	92
4.5.1	Caso de estudio.....	92
4.5.2	Análisis de resultados.....	97
4.5.3	Comparación con otros métodos.....	99
4.6	Conclusiones del capítulo.....	100

Bloque III

Capítulo 5: Consideración de la incertidumbre

5.1	Introducción.....	101
5.1.1	Razón de ser.....	102
5.2	Introducción a la gestión de incertidumbre.....	102
5.2.1	Tipos de incertidumbre.....	102
5.2.2	Técnicas de gestión de incertidumbre.....	103
5.3	La incertidumbre en el SEPIP.....	107
5.3.1	Incertidumbre en los datos de entrada.....	107
5.3.2	Incertidumbre en los pesos de decisión.....	109
5.4	Conclusiones del capítulo.....	114

Capítulo 6: Gestión de resultados: Clasificación y optimización

6.1	Introducción.....	117
6.1.1	Razón de ser.....	118
6.2	Sistemas de clasificación de alternativas.....	118
6.2.1	Introducción a los sistemas de clasificación.....	118
6.2.2	MIVES Sorting.....	120
6.3	Sistemas de optimización de alternativas.....	127
6.3.1	Introducción a los sistemas de optimización.....	127
6.3.2	Análisis y selección del método de optimización.....	131
6.4	Conclusiones del capítulo.....	135

Bloque IV

Capítulo 7: Introducción a los índices negativos

7.1	Introducción.....	135
7.1.1	Razón de ser.....	136
7.2	Revisión literaria.....	136
7.2.1	Metodología de recopilación de datos.....	137
7.2.2	Presentación de resultados.....	138
7.2.3	Análisis y necesidades de desarrollo.....	143
7.3	Propuesta de inclusión de efectos negativos.....	146
7.3.1	MIVES Extendido.....	146
7.3.2	Ejemplo ilustrativo.....	148
7.4	Conclusiones del capítulo.....	155

Bloque V**Capítulo 8: Sistema de evaluación y priorización de inversiones públicas**

8.1	Introducción	157
8.2	Presentación del SEPIP	158
8.2.1	Esquema del SEPIP	158
8.2.2	Índice de necesidad	159
8.2.3	Factores determinantes.....	160
8.2.4	Algoritmo del SEPIP	160
8.3	Aplicación del SEPIP.....	161
8.3.1	Contextualización del escenario	161
8.3.2	Definición de objetivos.....	163
8.3.3	Definición del problema: FDs e IN.....	164
8.3.4	Definición del problema: MIVES Extendido.....	168
8.3.5	Definición de intereses.....	182
8.3.6	Obtención de resultados.....	184
8.4	Conclusiones del capítulo	191

Bloque VI**Capítulo 9: Conclusiones**

9.1	Introducción	193
9.2	Conclusiones.....	194
9.3	Futuras líneas de investigación.....	198

Chapter 10: Final conclusions

10.1	Introduction.....	201
10.2	Conclusions.....	202
10.3	Future perspectives.....	206

Bibliografía 207**Anejos**

Anejo 1:	Factores determinantes del caso de estudio.....	247
Anejo 2:	Fichas de inversiones de Manresa.....	255

Listado de publicaciones..... 263

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Organización de la Tesis Doctoral.....	3
Figura 2.1 – Distribución básica de los principales métodos MCDM.....	12
Figura 2.2 – A) Árbol de jerarquía MIVES. B) Formas de la función de valor.....	18
Figura 2.3 – Proceso de revisión literaria y análisis de resultados.....	19
Figura 2.4 – Producción científica anual y citas totales de MIVES (2009-2021).....	20
Figura 2.5 – Mapa conceptual de co-citaciones.....	22
Figura 2.6 – Aplicación de la Ley de Lotka sobre el set de datos.....	23
Figura 2.7 – Procedencia de los autores e índice de producción científica.....	24
Figura 2.8 – Agrupación propuesta y cantidad de publicaciones que las componen.....	28
Figura 2.9 – Evolución anual de la dominancia de los distintos grupos.....	28
Figura 2.10 – Características complejas y su aparición o ausencia en el set de datos.....	33
Figura 3.1 – Clasificación de Kabak y Ervural.....	39
Figura 3.2 – Clasificación de Koksalmis y Kabak.....	40
Figura 3.3 – Clasificación de métodos GDM propuesta.....	41
Figura 3.4 – Proceso de revisión literaria.....	45
Figura 3.5 – Terminologías utilizadas reiterativamente y su significado.....	63
Figura 3.6 – Resultados (A) y dominancia (B) de cada grupo por década.....	65
Figura 3.7 – Resultados que desarrollan MCGDM que incluyen el uso de métodos MCDM.....	65
Figura 3.8 – Porcentajes de distribución de soluciones ideales consideradas.....	66
Figura 3.9 – Porcentajes de resultados con reglas sociales.....	67
Figura 3.10 – Porcentajes de datos utilizados por categoría.....	68
Figura 3.11 – Porcentaje de artículos aplicados en cada fase según su grupo.....	69
Figura 3.12 – Porcentaje de artículos que contienen las características de estudio.....	69
Figura 4.1 – Representación del proceso del método HIVES.....	75
Figura 4.2 – Axiomas sociales utilizados en HIVES.....	76
Figura 4.3 – Representación de las zonas de influencia y dispersión.....	78
Figura 4.4 – Representación de las zonas de influencia y dispersión y las partes de la SB.....	79
Figura 4.5 – Representación gráfica de la SB y sus cuatro partes.....	80
Figura 4.6 – Representación del algoritmo de aplicación de HIVES.....	81
Figura 4.7 – Análisis de sensibilidad propuestos.....	88
Figura 4.8 – Árbol jerárquico utilizado en el caso de estudio.....	93
Figura 5.1 – Funciones de membresía para categorización de edad.....	103
Figura 5.2 – Ejemplo de funciones de distribución.....	105
Figura 5.3 – Ejemplo de muestreo Monte Carlo.....	106
Figura 5.4 – Representación de la distribución triangular de Monte Carlo.....	109
Figura 5.5 – Métodos implementados en el sistema, en base al nivel de incerteza de los indicadores.....	115
Figura 6.1 – Proceso de categorización de MIVES Sorting.....	120
Figura 6.2 – Categorización en base a perfiles límite (A) y perfiles centrales (B).....	121
Figura 6.3 – Proceso de aplicación de MIVES Sorting.....	122
Figura 6.4 – Árbol MIVES del índice del estudio de Pujadas.....	123
Figura 6.5 – Comunicación de resultados de MIVES Sorting.....	126
Figura 6.6 – Categorías identificadas de métodos de optimización.....	127
Figura 6.7 – Algoritmo TLBO.....	128

Figura 6.8 –Representación de TSP y VRP	129
Figura 6.9 –Representación del MSTP	130
Figura 6.10 –Representación de la búsqueda Tabú.....	131
Figura 7.1 –Representación de los objetivos de la revisión y sus palabras clave.....	137
Figura 7.2 –Proceso de revisión literaria y sus resultados	138
Figura 7.3 –Proceso de generación de un índice MCDM.....	138
Figura 7.4 –Procedimiento del MCDM 5SEnSU.....	142
Figura 7.5 –Ejemplo de indicadores con valor negativo.....	143
Figura 7.6 – Porcentajes relativos de publicaciones y divisiones en sostenibilidad y ecología	144
Figura 7.7 – Porcentajes de aparición de los grupos analizados.....	145
Figura 7.8 – Dominancia de cada método MCDM según los grupos propuestos	145
Figura 7.9 –Formas de las funciones de valor de MIVES y MIVES Extendido.....	147
Figura 7.10 – Árbol MIVES para obtener el índice IspIM.....	149
Figura 7.11 – Representación y ecuación de la función de valor original del I_2	152
Figura 7.12 – Representación de la función de valor modificada de I_2	153
Figura 8.1 –Esquema del SEPIP.....	158
Figura 8.2 –Representación del proceso de selección de FDs y criterios e indicadores de cálculo	160
Figura 8.3 –Proceso de aplicación del SEPIP.....	162
Figura 8.4 –Jerarquía del IN de inversiones de Manresa.....	165
Figura 8.5 –Árbol Jerárquico de MIVES Extendido adaptado al caso de estudio	168
Figura 8.6 –Función de valor del indicador CUA.....	169
Figura 8.7 –Función de valor del indicador COM.....	170
Figura 8.8 –Función de valor del indicador RED	170
Figura 8.9 –Función de valor del indicador REC.....	171
Figura 8.10 –Función de valor del indicador FEI.....	173
Figura 8.11 –Funciones de valor de EA+ y EA-.....	175
Figura 8.12 –Función de valor del indicador VCS.....	177
Figura 8.13 –Función de valor del indicador CPT	178
Figura 8.14 –Funciones de valor de AS+ y AS-.....	180
Figura 8.15 –Función de valor del indicador AEM.....	182
Figura 8.16 –Árbol Jerárquico de MIVES Extendido con los pesos de sus elementos	185
Figura 8.17 –Resultados detallados de la aplicación del SEPIP	187
Figura 8.18 –Distribuciones de probabilidad de los índices de sostenibilidad	190
Figura 9.1 –Proceso de gestión de incertidumbre en indicadores del SEPIP y sus 3 métodos.....	195
Figura 9.2 –Esquema del SEPIP.....	197
Figure 10.1 –SEPIP uncertainty management process	203
Figure 10.2 –SEPIP scheme with its elements	205

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 – Objetivos de la Tesis Doctoral	2
Tabla 2.1 – Información obtenida del set de datos mediante Bibliometrix	20
Tabla 2.2 – Análisis de fuentes de MIVES con publicaciones, citas y características de impacto.....	25
Tabla 2.3 – Análisis de palabras clave y su número de apariciones.....	27
Tabla 2.4 – Agrupación propuesta por temáticas, tópicos, y referencias que los componen.....	29
Tabla 2.5 – Objetivos de mejora sobre el método directriz	35
Tabla 3.1 – Acrónimos y definiciones de los tipos de datos de entrada	47
Tabla 3.2 – Acrónimos y definiciones de los tipos de convergencia.....	48
Tabla 3.3 – Tabla de catalogación de métodos EAIA.....	49
Tabla 3.4 – Tabla de catalogación de métodos CNA.....	51
Tabla 3.5 – Tabla de catalogación de métodos GT.....	51
Tabla 3.6 – Tabla de catalogación de métodos GrP.....	53
Tabla 3.7 – Tabla de catalogación de métodos GC.....	55
Tabla 3.8 – Tabla de catalogación de métodos O.....	57
Tabla 3.9 – Tabla de catalogación de métodos QA.....	59
Tabla 3.10 – Tabla de catalogación de métodos I.....	62
Tabla 4.1 – Tabla de resultados de las pruebas (criterios) de los candidatos	83
Tabla 4.2 – Opiniones de peso de las pruebas (criterios) de los decisores.....	83
Tabla 4.3 – Información de evaluaciones del problema	84
Tabla 4.4 – Asignación de zonas a cada evaluación.....	84
Tabla 4.5 – Asignación de posición a cada evaluación.....	84
Tabla 4.6 – Asignación de puntuaciones a cada evaluación.....	84
Tabla 4.7 – Pesos de los decisores para cada criterio.....	85
Tabla 4.8 – Valores finales y solución del problema.....	85
Tabla 4.9 – Comparación teórica entre los métodos ETOPSIS, Proyección y HIVES.....	86
Tabla 4.10 – Resultados obtenidos mediante los métodos ETOPSIS, Proyección y HIVES.....	86
Tabla 4.11 – Correlaciones de Spearman para cada método.....	87
Tabla 4.12 – Resultados del análisis de sensibilidad de HIVES.....	89
Tabla 4.13 – Valor del criterio en los dos escenarios para cada decisor.....	90
Tabla 4.14 – Resultados del análisis de influencia inicial.....	90
Tabla 4.15 – Alternativas presentadas para ser evaluadas.....	93
Tabla 4.16 – Valores de las alternativas presentadas.....	94
Tabla 4.17 – Opiniones del peso de los criterios de cada decisor.....	95
Tabla 4.18 – Información de evaluaciones del problema.....	95
Tabla 4.19 – Asignación de puntuaciones a cada evaluación.....	95
Tabla 4.20 – Pesos de los decisores para cada criterio	96
Tabla 4.21 – Resultados de agregación por alternativa.....	96
Tabla 4.22 – Resultados de agregación por alternativa, en escenario de equidad.....	97
Tabla 4.23 – Análisis de los resultados del caso de estudio.....	98
Tabla 4.24 – Resultados de correlación de los DMs con cada método analizado.....	99
Tabla 5.1 – Ejemplo para un indicador de prevención de accidentes.....	107
Tabla 5.2 – Valores obtenidos por cada alternativa en cada criterio.....	112
Tabla 5.3 – Valores de peso asignados por cada decisor.....	112

Tabla 5.4 – Posiciones relativas de cada elemento respecto a su zona.....	113
Tabla 5.5 – Puntuaciones obtenidas en HIVES Intervalos	113
Tabla 5.6 – Peso de los decisores en cada criterio y límite	113
Tabla 5.7 – Matriz normalizada ponderada.....	114
Tabla 6.1 –Peso asignado a los indicadores.....	123
Tabla 6.2 – Valores de las alternativas presentadas.....	124
Tabla 6.3 – Atributos asignados a cada perfil límite.....	125
Tabla 6.4 – Valores agregados de las alternativas, su clase y su membresía.....	126
Tabla 6.5 – Índices MIVES obtenidos para cada alternativa y su presupuesto	133
Tabla 7.1 –Peso de los indicadores en IsPIM.....	150
Tabla 7.2 –Resultados de los indicadores de IsPIM.....	150
Tabla 7.3 –Tabla de atributos y sus definiciones del I_2	152
Tabla 7.4 –Tabla de puntuaciones, valores y índices del indicador I_2	153
Tabla 8.1 – FDs del conjunto de inversiones analizado.....	164
Tabla 8.2 – Atributos de evaluación PPA.....	166
Tabla 8.3 – Atributos de evaluación Rel.....	166
Tabla 8.4 – Atributos de SSA.....	167
Tabla 8.5 – Atributos de EsI.....	167
Tabla 8.6 – Atributos de los componentes de CSA	167
Tabla 8.7 – Atributos de ΔDM y ΔDO	169
Tabla 8.8 – Atributos de RED.....	170
Tabla 8.9 – Atributos de REC	171
Tabla 8.10 – Atributos de PrF.....	172
Tabla 8.11 – Atributos de QuF.....	172
Tabla 8.12 – Atributos de PoA y su alineación.....	175
Tabla 8.13 – Atributos de CAM y su alineación.....	177
Tabla 8.14 – Atributos de PDEj, PDEx y PIEx.....	178
Tabla 8.15 – Atributos de AS.....	179
Tabla 8.16 – Atributos de AEM y su alineación.....	182
Tabla 8.17 – Opiniones de los elementos del IN de los actores, en porcentajes.....	183
Tabla 8.18 – Opiniones de los elementos MIVES Extendido de los actores, en porcentajes	183
Tabla 8.19 – Valores de cálculo CET.....	184
Tabla 8.20 – Valores técnicos asignados por el representante.....	185
Tabla 8.21 – Valores DIZ y CET por barrio	186
Tabla 8.22 – Valores de IN por inversión.....	186
Tabla 8.23 – Valores de MIVES Extendido obtenidos por cada inversión en cada indicador.....	187
Tabla 8.24 – Etiquetas de excelencia para cada inversión.....	189
Tabla 8.25 – Posibles valores de coste económico por alternativa	189

1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Las inversiones públicas desempeñan un papel crucial en el avance de un país, ya que tienen un impacto directo sobre el bienestar de la sociedad, el progreso económico y la preservación del medio ambiente. No obstante, las limitaciones en los recursos disponibles plantean un desafío significativo para las administraciones, quienes se ven obligadas a gestionar de manera eficiente los fondos públicos a fin de determinar cuáles de las numerosas opciones de inversión deben ser implementadas y ejecutadas. En este contexto, se han propuesto numerosos métodos y técnicas para la selección de inversiones desde diferentes perspectivas. Sin embargo, ninguno de ellos ha sido diseñado específicamente teniendo en cuenta todas las necesidades de la administración pública, lo que puede haber limitado su adopción en España, dónde raramente se aplican técnicas de análisis y priorización de inversiones.

La falta de uso de estas técnicas ha dado lugar a situaciones problemáticas en todo el país que han recibido críticas tanto de la ciudadanía como de expertos: proyectos innecesarios, proyectos con sobrecostes y retrasos, y errores administrativos en la gestión de fondos públicos debidos a la falta de mantenimiento. Estos problemas no solo han supuesto una carga económica considerable para la administración, agravada por el costo de oportunidad al no llevar a cabo las inversiones recomendadas, sino que también han tenido importantes impactos sociales y ambientales negativos.

1.2. OBJETIVOS

Ante la situación previamente expuesta, en esta Tesis Doctoral se desarrolla el "Sistema de Evaluación y Priorización de Inversiones Públicas" (SEPIP), que aborda los principales desafíos que enfrenta la administración en la selección de inversiones y contribuye a una gestión más eficiente y efectiva de los recursos públicos. El SEPIP aspira a ser un método que asista a los responsables de la administración pública en la toma de decisiones coherentes, sostenibles, transparentes y eficaces, proporcionando una visión clara y sencilla de los múltiples pasos necesarios para llevar a cabo este proceso, sea cual sea la fase en la que se encuentren las inversiones. Además, esta Tesis tiene como objetivo aplicar el SEPIP en un escenario real, lo que permitirá analizar su desempeño y comprobar su adaptabilidad. Debido a que esta Tesis Doctoral se enmarca en el programa de doctorado en Ingeniería Civil, se planea que el escenario de aplicación contenga un conjunto de inversiones en obras civiles, sentando las bases para futuras aplicaciones en otros ámbitos. Si bien estos son los propósitos principales de esta Tesis, a lo largo de su desarrollo se han detectado características que el SEPIP debe poseer para cubrir todas las necesidades de la administración pública. Consecuentemente, los objetivos generales y específicos de esta Tesis Doctoral se han expandido, dando lugar al conjunto mostrado en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 – Objetivos de la Tesis Doctoral.

Objetivos generales	Objetivos específicos
1. Desarrollo del SEPIP: Base de cálculo y comparación de necesidades	<ul style="list-style-type: none"> • Analizar los sistemas actuales de evaluación y priorización de inversiones utilizados por la administración pública. • Seleccionar un método multicriterio que sirva de base de desarrollo del SEPIP. • Analizar exhaustivamente las características del método seleccionado, comparándolas con las necesidades de la administración pública para hallar los puntos de desarrollo.
2. Desarrollo del SEPIP: Múltiples actores de decisión	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar un análisis exhaustivo de la literatura de agregación de opiniones de múltiples actores en la toma de decisión. • Analizar las técnicas en base a las necesidades de la administración pública. • Desarrollar un método que cumpla con las necesidades expuestas, siendo capaz de agregar las opiniones de múltiples actores considerando las teorías sociales.
3. Desarrollo del SEPIP: Consideración de incertidumbre	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar un estudio sobre los principales sistemas de gestión de incertidumbre en los procesos de toma de decisión. • Analizar las necesidades de la administración en base a distintos escenarios de estado de conocimiento e información disponible. • Proponer un proceso multi-método que implemente en el SEPIP la capacidad de gestionar cualquier rango de incertidumbre en los datos de las inversiones. • Desarrollar un método de agregación de opiniones de múltiples actores en la toma de decisión que considere la incertidumbre en las evaluaciones.
4. Desarrollo del SEPIP: Clasificación, etiquetaje y optimización de inversiones	<ul style="list-style-type: none"> • Analizar los principales métodos de clasificación, etiquetaje y optimización en procesos de toma de decisión, estudiando su implementación en el SEPIP. • Analizar las posibles necesidades de la administración. • Desarrollar un sistema de clasificación y etiquetaje de inversiones capaz de dar solución a los requerimientos e ideales de la administración. • Implementar en el SEPIP un sistema de optimización de inversiones basado en un presupuesto cerrado.
5. Desarrollo del SEPIP: Efectos adversos	<ul style="list-style-type: none"> • Estudiar la gestión de efectos adversos en el contexto de toma de decisión y toma de decisión multicriterio. • Desarrollar un nuevo método capaz de introducir efectos adversos, capaces de disminuir el índice final, en el SEPIP.
6. Presentación y aplicación del SEPIP	<ul style="list-style-type: none"> • Agregar todos los conocimientos de desarrollo del SEPIP en una guía fácil y coherente, sentando las bases para su aplicación en cualquier tipología de inversión. • Aplicar el SEPIP a un caso real, mostrando el procedimiento llevado a cabo. • Estudiar y comprobar los resultados y la adaptabilidad del SEPIP en la situación escogida, así como la opinión de la administración con el proceso.

1.3. METODOLOGÍA Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Cada uno de los grandes temas a abordar en el cuerpo de la Tesis Doctoral constituye por sí mismo un bloque temático de la misma, que contiene los capítulos necesarios para dar solución a todos los objetivos planteados. Tal y como se muestra en la Figura 1.1, esta Tesis se divide en 6 bloques, .

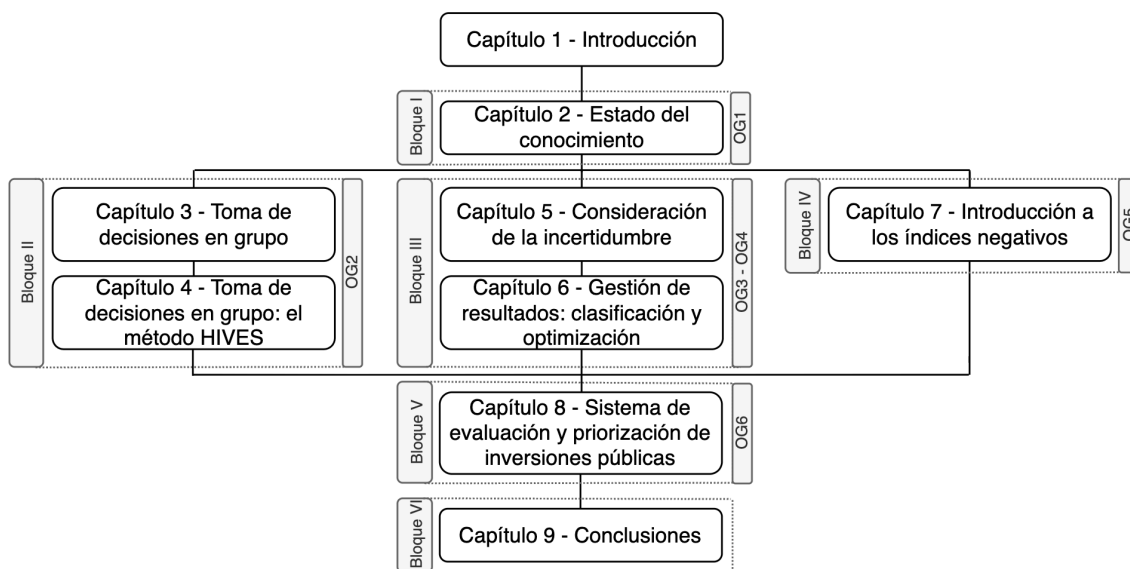


Figura 1.1 – Organización de la Tesis Doctoral con capítulos, bloques y los objetivos que abordan.

El Bloque I de esta Tesis corresponde a la selección del método base de cálculo, y contiene el **Capítulo 2**. En este capítulo se expone la razón de ser de la Tesis Doctoral, introduciendo los distintos métodos de priorización de inversiones públicas. Entre ellos, se selecciona el método directriz para generar el SEPIP, que es exhaustivamente analizado y comparado con las necesidades de la administración pública. Esta comparación permite determinar qué propiedades de los modelos de toma de decisión deben ser analizadas, desarrolladas o implementadas para cubrir todas las necesidades de la administración. Este conocimiento da lugar a la aparición de los Bloques II, III y IV, considerados los bloques de desarrollo científico de esta Tesis Doctoral.

El Bloque II contiene el estudio de agregación de opiniones de múltiples actores de decisión. En el **Capítulo 3** se encuentra una revisión literaria exhaustiva de los métodos y técnicas más actuales, así como su análisis en base a las necesidades de la administración. Este análisis es utilizado como base del **Capítulo 4**, que desarrolla y presenta un nuevo método de agregación de opiniones basado en la matemática estadística y la teoría de la elección social. Este nuevo método es ampliamente analizado mediante estudios de sensibilidad y de rendimiento en ejemplos complejos, perfilándose como la solución a la agregación de múltiples actores en decisiones de la administración.

En el Bloque III se enmarca la gestión de datos de entrada con incertidumbre y la gestión de resultados del SEPIP. El **Capítulo 5** identifica los distintos métodos que operan la incertidumbre y selecciona un conjunto de técnicas para formar el procedimiento de

gestión de incertidumbre del SEPIP. Este procedimiento asegura que el SEPIP pueda ser aplicado en cualquier fase de la inversión, ya sea de conceptualización o avanzada, o con cualquier nivel de incerteza de datos de entrada, indicando la técnica apropiada en cada caso. Por otro lado, el **Capítulo 6** se centra en la gestión de resultados, desarrollando un nuevo método para la clasificación y etiquetaje de las inversiones y seleccionando un método de optimización, ambos cubriendo las necesidades de la administración.

Como último bloque de desarrollo científico, el Bloque IV se centra en la consideración de los efectos negativos producidos por las inversiones. Su único capítulo, el **Capítulo 7**, analiza la necesidad de introducir en el cálculo de priorización los efectos adversos no deseados de las inversiones, en situaciones en los que estos impactos no puedan ser representados con la mera nulidad. Con este punto de partida, se desarrolla la extensión del método multicriterio utilizado como base de cálculo en el SEPIP, MIVES Extendido, introduciendo así evaluaciones con índices negativos.

Finalizados los principales bloques de desarrollo, el Bloque V contiene el modelo final y su aplicación. El **Capítulo 8** agrega todos los hallazgos, procedimientos propuestos, métodos desarrollados y técnicas implementadas para generar el SEPIP, posicionando todos los elementos de la Tesis Doctoral en su disposición del proceso. Posteriormente, el SEPIP es aplicado a un caso real, en el que se analiza un conjunto de inversiones proporcionado por la administración pública de una Manresa. Este capítulo muestra todo el proceso seguido durante la aplicación del sistema, su adaptación específica, y los resultados obtenidos.

Finalmente, en la Bloque VI, que contiene el **Capítulo 9**, se exponen las conclusiones más relevantes que se derivan del trabajo realizado y se proponen futuras líneas de investigación con el fin de dar continuidad el trabajo iniciado en la presente Tesis Doctoral.

2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realiza una revisión del estado del conocimiento en relación con los métodos actuales de priorización de inversiones públicas, para llevar a cabo la selección del método directriz del SEPIP. Posterior a la introducción, este capítulo contiene tres secciones.

La primera contiene una breve introducción a la necesidad de los métodos de priorización de inversiones públicas, con el objetivo de identificar las motivaciones de esta Tesis Doctoral. Posteriormente, se lleva a cabo una exposición de las técnicas actualmente utilizadas con ese fin. La segunda desarrolla el método directriz escogido, evaluando distintas opciones y seleccionando la técnica que servirá de base para su posterior desarrollo con las necesidades de la Tesis. Una vez escogido el método, se lleva a cabo una revisión sistemática de sus aplicaciones para conocer en profundidad sus características. Por último, la última sección analiza el método seleccionado a la luz de las necesidades básicas en el ámbito del sector público, con el fin de identificar posibles desarrollos y avances que permitan crear un sistema de evaluación y priorización de inversiones públicas capaz de abarcar todas las necesidades planteadas por la administración.

2.2. PRIORIZACIÓN DE INVERSIONES PÚBLICAS

2.2.1. Razón de ser

En esta subsección se examina la motivación y la necesidad de establecer un sistema sólido de evaluación y priorización de las inversiones públicas en España. Estas asignaciones presupuestarias, que forman parte de las decisiones públicas, desempeñan un papel crucial en la configuración del futuro de las sociedades y comunidades. Tomadas por entidades administrativas a diferentes niveles, cada asignación tiene un impacto significativo en la vida de los ciudadanos y repercute en los ámbitos económico, social y ambiental.

Por ejemplo, la inversión en infraestructura, educación y servicios públicos es fundamental para promover el crecimiento económico y el desarrollo, y es un factor de primer orden para mantener y mejorar la competitividad de un país (Dabla-Norris et al., 2012) al facilitar el comercio, mejorar el acceso a servicios esenciales y atraer inversión privada (Pujadas et al., 2019). Es por ello por lo que gestionar adecuadamente estos fondos de forma eficiente deviene primordial, pues las administraciones cuentan con recursos limitados y algunas de estas decisiones, cómo dónde se debe invertir, se han convertido en un problema nacional significativo.

Este problema se acrecienta en el caso de las asignaciones públicas en infraestructuras, que aun mostrando una de las mayores líneas de presupuesto de un país (Thorpe & Kumar, 2002), requieren de grandes inversiones. En España en particular, la falta de una buena gestión en inversiones de infraestructuras ha conllevado a errores históricos cometidos por la administración pública. Estos errores se pueden enmarcar en tres tipologías:

- La primera es la de proyectos innecesarios. Uno de los ejemplos más destacados de esta tipología en España fue la construcción del aeropuerto de Castellón, también conocido como el aeropuerto de "Costa Azahar". Aunque se encuentra en una región con una demanda de vuelos turísticos ya atendida por otros aeropuertos cercanos, se decidió construir esta infraestructura con una capacidad de hasta 2,5 millones de pasajeros anuales y un coste de 170 millones de euros. Sin embargo, desde su inauguración, en marzo de 2011, el aeropuerto de Castellón ha sufrido una falta casi total de tráfico aéreo, si bien en estos últimos años la tendencia se ha revertido. La falta de demanda real y el escaso interés de las aerolíneas han llevado a que el aeropuerto permaneciera años prácticamente inactivo, generando pérdidas económicas considerables debido a su mantenimiento.

En este mismo ejemplo, se puede encontrar el aeropuerto de Ciudad Real, anunciado como "la puerta de la Mancha al mundo". Con un coste de más de 1.100 millones de euros e inaugurado en 2008, el aeropuerto permanece, a fecha de hoy, cerrado.

- La segunda tipología corresponde a los sobrecostes y retrasos. Un ejemplo emblemático de este tipo en la inversión en infraestructuras en España es el proyecto del tren de alta velocidad (AVE) que conecta Madrid y Barcelona. Inicialmente, se estimó que el proyecto tendría un costo de alrededor de 6.000 millones de euros y estaría completado en 2007. Sin embargo, a lo largo del desarrollo del proyecto, se produjeron numerosos retrasos y sobrecostes significativos. La mala planificación sobre posibles efectos de la infraestructura y sus múltiples modificaciones, conllevaron que se completa con un año de retraso y un sobrecoste de más de 2.000 millones de euros.
- Finalmente, la última tipología refiere a errores administrativos debidos a la falta de mantenimiento. El hecho de no considerar las necesidades de inversión en la gestión de infraestructura ha conllevado a significativos impactos negativos en España. Como ejemplo, se encuentra el caso del viaducto de la autopista AP-6 en el tramo que une Madrid y Segovia. En enero de 2018, se produjo un colapso parcial del viaducto, lo que generó el cierre temporal de la autopista y causó graves inconvenientes a los conductores. Las investigaciones posteriores revelaron que el colapso se debió a la falta de mantenimiento y a la presencia de corrosión en las armaduras del viaducto. Este incidente puso de manifiesto la falta de supervisión y la deficiente gestión de la infraestructura vial, poniendo en peligro la seguridad de los usuarios y requiriendo inversiones significativas para reparar y fortalecer el viaducto.

Así pues, queda clara la necesidad de implementar un sistema de evaluación y priorización de inversiones públicas en España, enfocado, en el caso de esta Tesis, a la evaluación y priorización de inversiones en infraestructuras. Al asignar fondos a proyectos y programas que generen un mayor valor y beneficio para la sociedad y el medio ambiente, se evitarían inversiones innecesarias o ineficientes que podrían representar un despilfarro de recursos públicos. Así mismo, el establecimiento de un sistema transparente y objetivo, basado en criterios establecidos, mejoraría la calidad de los análisis, evitando inversiones con sobrecostes y retrasos y errores de mantenimiento. Este proceso fomentaría la confianza de los ciudadanos y los inversores, promoviendo la rendición de cuentas y evitando la discrecionalidad en la asignación de inversiones, que tan recurrentemente sucede en España.

2.2.2. Métodos de priorización de inversiones públicas

Proceso de obtención de fondos y estudio de necesidades

Una vez demostrada la importancia de implementar un sistema de evaluación y priorización de inversiones públicas en España, conviene estudiar (1) cómo la administración pública recibe sus presupuestos y (2) cómo los gestionan.

En el contexto de la asignación de presupuestos, las administraciones, en sus distintos niveles, tienen sistemas que operan de forma similar. En el caso del nivel nacional es el Ministerio de Hacienda el que, siguiendo el proceso enmarcado en la Ley

General Presupuestaria, establece una propuesta inicial de presupuesto basándose en las necesidades expuestas por cada Ministerio u organismo público, así como en las prioridades gubernamentales. Esta propuesta se presenta al Congreso de los Diputados para su debate y aprobación, dónde los organismos implicados pueden presentar enmiendas y propuestas de modificación. Una vez aprobado el presupuesto, se establece el monto definitivo asignado.

Este procedimiento político de asignación de presupuestos se replica en los otros niveles de la administración. Tomando como ejemplo Catalunya, el procedimiento se enmarca en la Ley de Presupuestos de la Generalitat de Catalunya. El Departamento de Economía y Hacienda, encargado de la gestión financiera y presupuestaria, elabora y presenta el proyecto de ley de presupuestos para su aprobación por el Parlamento de Catalunya. Una vez aprobados, los presupuestos determinan la asignación de recursos económicos a los diferentes departamentos y áreas de gobierno,

Una vez resumido brevemente el proceso de asignación de presupuestos, se debe especificar cómo los Ministerios y los organismos públicos gestionan esta financiación, pues esta parte es fundamental para esta Tesis Doctoral. Con el objetivo de alienar la información con los objetivos planteados, se tomará como ejemplo el propio Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MTMA).

De forma general, la distribución de recursos se lleva a cabo en base a las necesidades que existen a largo, medio y corto plazo. Estas necesidades, a su vez, se pueden enmarcar en cuatro factores:

- **Planificación estratégica:** El organismo establece planes estratégicos a largo y medio plazo que definen las políticas y objetivos relativos a sus competencias. Estos planes orientan las decisiones de gasto y establecen las prioridades de inversión en diferentes áreas.
- **Necesidades prioritarias:** El organismo evalúa las necesidades prioritarias en su ámbito de competencia a medio y corto plazo. En el caso del MTMA, estas abarcan infraestructuras de transporte, sistemas de movilidad, desarrollo urbano o vivienda, entre muchos otros. Se tienen en cuenta factores como la demanda, el impacto social, económico y ambiental, así como las necesidades de mantenimiento y mejora de las infraestructuras existentes.
- **Programas y proyectos específicos:** Se identifican y proponen programas y proyectos específicos que contribuyen al logro de los objetivos establecidos, tanto a largo, medio y corto plazo. Considerando las competencias del MTMA, estos pueden incluir la construcción de nuevas infraestructuras, la modernización de sistemas de transporte, la promoción de la movilidad sostenible o el impulso de la vivienda, entre otros.
- **Negociación y acuerdos:** Se pueden establecer acuerdos y negociaciones con otras entidades o empresas, para la ejecución de determinadas

inversiones, proyectos conjuntos o concesiones, a largo y medio plazo. Este punto es de especial interés dada la gran cantidad de organismos administrativos que tienen competencias en un mismo territorio. Como ejemplo, se tiene el caso de la Estación de Sants, en Barcelona. La estación es gestionada por la empresa pública RENFE (Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles), la infraestructura ferroviaria necesaria para el funcionamiento del AVE es gestionada por el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), un organismo público dependiente del MTMA, y dada la ubicación de la estación, el Departamento de Territorio y Sostenibilidad de la Generalitat de Catalunya también tiene competencias. Si bien en este punto los acuerdos son a medio y largo plazo, pueden existir asignaciones de corto plazo debido a inversiones prioritarias de mantenimiento urgente no estipuladas en el contrato.

Debido a que la planificación estratégica y la negociación y acuerdos se basan principalmente en voluntades políticas o a contratos ya estipulados, el SEPIP debe enmarcarse en las necesidades prioritarias y los programas o proyectos específicos. En ambos factores, la administración debe decidir qué actuaciones o programas se deben llevar a cabo, según los estudios de necesidades existentes y de desarrollo. En el caso del MTMA, estos análisis se definen principalmente en base a la infraestructura.

Las necesidades existentes en infraestructura son fundamentalmente necesidades de mantenimiento o expansión en base a inspecciones regulares, informes técnicos o solicitudes de las autoridades locales u otras entidades al MTMA, que estén respaldadas por estudios técnicos, análisis de demanda, evaluaciones de viabilidad u otros fundamentos que justifiquen la necesidad de la intervención.

También se han desarrollado plataformas técnicas que permiten obtener información actualizada para analizar estas necesidades: Al evaluar el estado y funcionamiento de las infraestructuras, se pueden identificar áreas de mejora, deficiencias o problemas que requieran atención. Un claro ejemplo es el SIAF (Sistema de Información de Infraestructuras de Transporte), una plataforma desarrollada por el MTMA que recopila y gestiona información detallada sobre las infraestructuras de transporte en todo el país, proporcionando datos actualizados de carreteras, ferrocarriles, puertos, aeropuertos, entre otros, permitiendo su posterior su análisis y evaluación.

Análogo es el programa SAIT (Sistema de Análisis de Infraestructuras de Transporte) utilizado por la Generalitat de Catalunya para evaluar y diagnosticar el estado de las infraestructuras de transporte en la comunidad, o el SIAM (Sistema de Información de Áreas Metropolitanas), desarrollado por el Instituto Nacional de Estadística (INE), que permite recopilar y analizar datos sobre las áreas metropolitanas de España. Este último, proporciona información demográfica, económica, de vivienda, transporte y otros aspectos relevantes para la planificación y gestión de las áreas urbanas.

En lo referente a las necesidades de desarrollo, se focalizan en las propuestas de intervención basadas en nuevos proyectos licitados por el MTMA. Estas propuestas pueden surgir tanto del propio Ministerio en función de la planificación estratégica del transporte, los planes de desarrollo o las necesidades identificadas a nivel nacional, como

de nuevo de solicitudes de otras entidades o decisiones técnicas, cuando el mantenimiento o expansión de infraestructura no son suficientes.

Al concluir este proceso de análisis de necesidades, que es análoga a distintos niveles, aunque se haya expuesto el MTMA como ejemplo para clarificar la Tesis, la administración termina con un grupo de alternativas, en muchos casos heterogéneas, que requieren de inversión.

Técnicas de evaluación y priorización

Una vez se han obtenido estas alternativas de inversión, la administración debe decidir cuáles de ellas deben ser llevadas a cabo en base a los recursos de que dispone. Por tanto, se debe aplicar un sistema de evaluación y priorización de alternativas para buscar la mejor opción. Con este objetivo, las administraciones utilizan algunos métodos de establecimiento de prioridades y asignación de recursos (PSRA, por sus siglas en inglés), que forman parte de las ciencias de toma de decisiones (Seixas et al., 2021). A grandes rasgos, algunos de los más conocidos son:

- **Análisis de coste-beneficio:** Estos análisis, principalmente financieros, tienen como principal objetivo estudiar y comparar la viabilidad económica de distintos proyectos o alternativas (Ward, 2012). Aunque puedan contener criterios ambientales o sociales, se busca monetizarlos para su posterior comparación, utilizando herramientas y conceptos como el valor neto actualizado (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).
- **Análisis de coste-efectividad:** En este caso, se comparan los costes de los distintos proyectos o alternativas con la efectividad lograda (Garber & Phelps, 1997). Esta efectividad se estipula en base a ciertos objetivos o efectos deseados, permitiendo así comparar alternativas y encontrar la que genera un mayor efecto (o cumplimiento de los objetivos) con un menor coste.
- **Análisis de coste-consecuencia:** Al modificar el factor de comparación a consecuencia, estos análisis permiten conocer el impacto generado al no llevar a cabo un cierto proyecto o alternativa (López-Casasnovas & Pellisé-Urquiza, 2015). Si bien es principalmente aplicado a estudios del ámbito de salud, su procedimiento se puede adaptar fácilmente a otros campos. Tal y como en los análisis de costo-efectividad, las consecuencias no necesariamente deben ser monetizadas, permitiendo análisis más transversales y con más información cualitativa.
- **Presupuestación por programas y análisis marginal (PBMA, por sus siglas en inglés):** El método PBMA contiene una primera fase de identificación y selección de programas o proyectos y una segunda fase de evaluación económica. Esta segunda fase contiene tanto un análisis costo-beneficio como un análisis marginal, que se utiliza para comparar los costos y beneficios adicionales de cada proyecto en relación con el siguiente mejor

proyecto o la opción de no financiar ningún proyecto adicional (Seixas et al., 2021).

- Métodos de decisión multi-criterio (MCDM, por sus siglas en inglés): Los métodos MCDM son técnicas de apoyo que se basan en la idea de que existen múltiples criterios, o factores, que se deben considerar en la decisión. En su aplicación, proporcionan un marco estructurado de análisis sistemático que permite abordar las múltiples facetas del problema mediante su descomposición en partes constituyentes (Cafiso et al., 2002).

De entre los distintos métodos PSRA utilizados por la administración, se destaca el uso de los MCDM. Estas técnicas se han implantado como una forma de abordar la complejidad y la heterogeneidad de criterios que se deben considerar en el proceso de toma de decisiones (Kiker et al., 2005). Mediante su uso, es posible introducir conceptos muy diferentes entre sí, como la economía y la sostenibilidad (Sanaei et al., 2018), en un cálculo matemático estructurado, transparente y claro. Por ello, estas técnicas son las escogidas para generar el núcleo de la metodología de la presente Tesis. Su uso garantiza la inclusión de indicadores que difícilmente serían comparables entre sí, pudiendo tener en cuenta factores económicos, sociales y ambientales en un marco de trabajo estructurado, objetivo y transparente.

Sin embargo, es notable remarcar la creciente importancia de estos métodos MCDM, pues no sólo se han implementado en la administración pública, sino que la gran mayoría (por no decir la totalidad) de los campos científicos han aplicado estas técnicas. Este interés ha provocado que se desarrollen una gran cantidad de métodos MCDM (Lindfors, 2021), que permiten analizar los problemas desde múltiples enfoques y en base a las necesidades del problema.

2.3. SELECCIÓN Y DEFINICIÓN DEL MÉTODO DIRECTRIZ

2.3.1. Métodos de decisión multicriterio

Introducción a los métodos MCDM

Una distribución básica de los principales métodos MCDM se muestra en la Figura 2.1. Esta agrupación responde principalmente a la existencia de métodos elementales (Linkov et al., 2006) o simples, y de métodos complejos, con una estructura matemática mucho más elaborada. Dentro de este último grupo, las técnicas se dividen según si se comparan directamente los valores obtenidos (comparación), si se comparan índices provenientes de funciones de valor (F. valor), si se utilizan bases de datos históricos (Históricos) o si se estudia la dominancia entre alternativas (Dominancia).

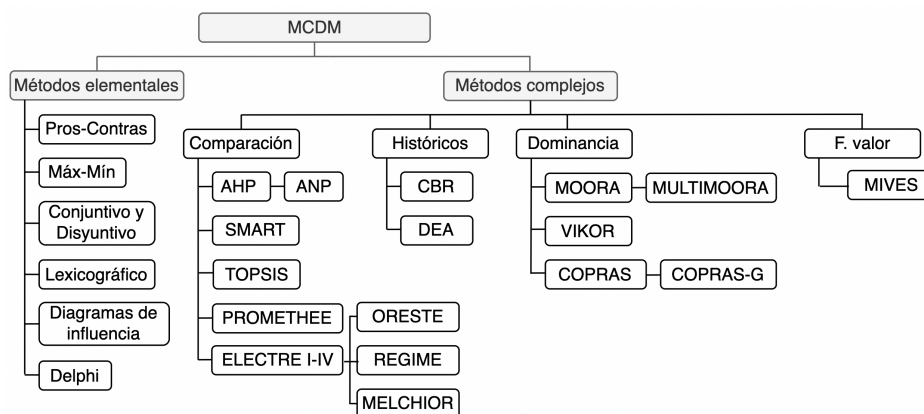


Figura 2.1 – Distribución básica de los principales métodos MCDM.

Dentro de los métodos elementales se encuentran agrupados seis técnicas en la que los decisores juegan un papel decisivo para valorar cada alternativa. La primera es el análisis de pros (aspectos positivos) y contras (aspectos negativos) de cada alternativa en base a unos criterios preestablecidos. A través de la enumeración y evaluación de los pros y contras de cada alternativa, los expertos buscan llegar a un consenso sobre cuál opción presenta mayores beneficios y menores desventajas, lo que permite la selección de la alternativa preferida o la creación de una lista de priorización. Este enfoque se basa en un análisis cualitativo y se puede aplicar de manera efectiva cuando hay un número limitado de alternativas y criterios de diferenciación.

La segunda es el método conocido como Máximo-mínimo o maximin, centrado en analizar cada alternativa de forma individual, ya que los pesos asignados a los criterios pueden variar entre ellas. En el proceso, se crea una lista de priorización en la cual se otorga un peso máximo al criterio con el peor (mínimo) desempeño en cada alternativa. Esto implica que se prioriza la alternativa cuyo peor criterio tenga el mayor valor. Por otro lado, existen variantes como el método Maximax, que selecciona el criterio de cada alternativa que tiene el mejor desempeño y le asigna el peso total, priorizando en base a un criterio. Además, existen analogías como Minimin o Minimax, que son métodos similares pero enfocados en minimizar el peor criterio o maximizar el mejor criterio, respectivamente, en lugar de considerar todos los criterios.

La tercera técnica es la de los métodos conjuntivo y disyuntivo, que se basa en un sistema de metas-aspiración en el que se establecen requisitos mínimos en cada criterio de evaluación. La primera parte de la técnica (conjuntivo) establece que una alternativa es aceptable solo si cumple con todos los requisitos mínimos establecidos en cada criterio. En otras palabras, todas las características o criterios deben alcanzar o superar el umbral mínimo, establecido por los expertos para que la alternativa sea considerada como una opción viable. Por otro lado, la segunda parte (disyuntivo) complementa a la primera al permitir que se eleve el requisito en uno de los criterios. Esto significa que una alternativa podría compensar un bajo desempeño en un criterio con un desempeño sobresaliente en otro. Si la alternativa cumple con el requisito elevado en al menos uno de los criterios, se considera aceptable. Por ende, esta técnica prioriza mediante un proceso de eliminación gradual. Se aumentan los requisitos mínimos uno a uno y se descartan las alternativas que

no los cumplen. El orden inverso de descarte determina el orden de priorización de las alternativas restantes.

La cuarta, conocida como técnica lexicográfica, es un enfoque de eliminación secuencial en el cual se ordenan los atributos o criterios por su importancia relativa. Se analizan las alternativas y se selecciona aquella que tenga el mejor desempeño en el atributo más importante (conocido como criterio crítico), sin tener en cuenta los desempeños en los otros atributos. Si hay empate o dudas entre dos o más alternativas, se procede a evaluarlas utilizando los siguientes criterios en orden de importancia. Esto significa que, en caso de que haya un empate en el atributo más importante, se recurre al siguiente atributo en la lista para tomar una decisión, en forma de etapas.

Las dos últimas técnicas contienen una parte importante de discusión entre expertos. Los Diagramas de influencia son una herramienta utilizada para visualizar y representar gráficamente el problema MCDM, en el que los nodos representan los criterios, y las flechas que los conectan, la información que existe entre ellos. El diagrama sirve para exponer y comprender las diferencias de valor o preferencias entre las partes interesadas involucradas en el problema, ya que, al visualizar las relaciones de los criterios, se pueden identificar diferentes puntos de vista y perspectivas de manera clara y concisa. Es importante mencionar que las evaluaciones son cualitativas, obteniendo una visión global del problema para priorizar alternativas. Por su parte, el método Delphi es una técnica de consulta y consenso utilizada para obtener la opinión de un grupo de expertos y priorizar las alternativas. Se realiza a través de rondas sucesivas de retroalimentación anónima, donde los participantes responden a preguntas o declaraciones y se les presenta un resumen de las respuestas anteriores en cada ronda. Este proceso iterativo permite refinar y ajustar las opiniones a medida que se progresa, obteniendo un consenso sobre un posible ranking de priorización.

Por otra parte, tal y como se ha comentado, los métodos complejos tienen una base matemática mucho más compleja y se dividen según sus características. Por ejemplo, los métodos de comparación se centran en evaluar y comparar directamente las alternativas mediante los criterios del problema.

Uno de los más conocidos es el método "*Analytic Hierarchy Process*" o AHP (Saaty, 1980), un método desarrollado para comparar las alternativas por pares. En cada par de alternativas, los decisores marcan su preferencia mediante la escala de valores de 1 a 9, obteniendo así un ranking, que es validado según el índice de consistencia de la evaluación dada. Sin embargo, este método puede aplicarse sobre los criterios en vez de sobre las propias alternativas para obtener el peso de cada uno de ellos. En estos casos, estos valores se agregan a los datos obtenidos mediante el modelo de suma ponderada (WSM, por sus siglas en inglés) para obtener índices totales para cada alternativa. En el caso que la estructura del problema no sea directamente jerárquica, y existe una interrelación entre los criterios, se utiliza la variante "*Analytic Network Process*" o ANP. En el ANP, se permite la modelización de relaciones de dependencia y retroalimentación entre los criterios de la jerarquía mediante la construcción de una red de interrelaciones. Además de las comparaciones par a par de los criterios y las alternativas, se realizan también comparaciones entre los elementos de nivel superior y los elementos de nivel inferior.

Menos conocido, pero con una estructura similarmente sencilla, se encuentra el *"Simple Multi-Attribute Rating Technique"* o SMART, que utiliza una escala de calificación para evaluar cada alternativa en función de cada criterio. Esta escala puede ser numérica, como una escala de 1 a 5 o de 1 a 10, o incluso puede ser una escala cualitativa, como "muy baja", "baja", "media", "alta" y "muy alta". Una vez que se asigna una calificación a cada alternativa en cada criterio, se aplica el WSM para obtener una puntuación total para cada alternativa.

Otro de los métodos de comparación más aplicados en gran variedad de campos ha sido el método *"Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution"* o TOPSIS. Esta técnica analiza el conjunto de alternativas para crear una solución ideal (mejores valores en los criterios) y una solución anti-ideal (peores valores en los criterios). Posteriormente, se calcula un coeficiente de proximidad para cada alternativa, que utiliza la comparación o la distancia relativa, con a las soluciones generadas, permitiendo así generar un ranking.

Los dos últimos métodos de comparación también son conocidos como métodos de superación. El primero de ellos es *"Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations"* o PROMETHEE, que compara las alternativas por pares y genera un ranking mediante la aplicación de funciones de preferencia y ecuaciones de flujo. En este análisis, se analiza cuándo una alternativa supera a la otra y se le aplica la función de preferencia para obtener un valor de impacto. Mediante estos valores, se utilizan las funciones de ecuaciones de flujo para estudiar la superación absoluta.

El segundo es *"Élimination Et Choix Traduisant la Réalité"* o ELECTRE, un método que, si bien se considera de comparación, tiene variantes que incluyen características de dominancia parcial. Estas variantes, o versiones, tienen enfoques y características ligeramente diferentes. ELECTRE I es la versión más simple y se basa en la idea de que una alternativa es preferida a otra si supera ciertos umbrales de valor en los criterios. ELECTRE II agrega la noción de "dominancia" parcial, lo que significa que una alternativa puede ser parcialmente dominante en relación con otra. ELECTRE III introduce una ponderación de los criterios y permite la asignación de pesos diferentes a cada criterio. ELECTRE IV es una versión más avanzada que tiene en cuenta la incertidumbre y permite el análisis de sensibilidad de los resultados.

Este método también ha sido utilizado como base para generar otras técnicas MCDM especializadas en ciertos problemas. La *"Organisation et Rationalisation des Systèmes d'Évaluation de la Technologie"* u ORESTE, es una técnica que se utiliza para el análisis multicriterio de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico. El *"Réalisation d'Évaluation de Gestion d'Innovations Majeures dans l'Entreprise"* o REGIME es un método que se enfoca en la gestión de recursos. Finalmente, la *"Méthode Élaborée de Lecture et de Choix Hiérarchisé d'Options Rationnelles"* o MELCHIOR, es una metodología desarrollada específicamente para la evaluación y selección de proyectos en el sector de la construcción. Estas técnicas tienen características específicas que se adaptan a sus respectivos dominios de aplicación.

Otra tipología de métodos complejos se basa en el uso de una base de datos históricos para emitir el ranking de preferencias, por lo que es necesario contar con un

gran historial de casos o problemas que sean similares al que se quiera resolver. El primero de ellos es el “*Case-Based Reasoning*” o CBR. Este método recurre a una base de datos existentes para encontrar casos similares, estudiando los resultados obtenidos en su aplicación. Por ello, los expertos son capaces de revisar, adaptar y reutilizar o comparar qué proyectos o alternativas pueden ser preferibles, introduciendo posteriormente su decisión al histórico. De forma muy similar, el “*Data Envelopment Analysis*” o DEA, es un método preparado para analizar la efectividad de las alternativas propuestas. Esta técnica analiza la posible eficacia de cada alternativa sobre los criterios propuestos, permitiendo encontrar la que presente un mayor rendimiento o satisfacción sobre el esquema de decisión.

En los métodos de dominancia, se encuentran algunos de los métodos MCDM más conocidos. Uno de ellos, el “*Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis*” o MOORA, proporciona una clasificación de las alternativas según su rendimiento relativo, con una solución óptima identificada en función de las relaciones beneficio-coste. Para los sistemas multicriterio, el método ha sido adaptado a “*Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis plus the full Multifactorial method*” o MULTIMOORA, que utiliza los ratios de relación beneficio-coste en cada uno de los criterios.

También la técnica “*VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*” o VIKOR ha sido ampliamente aplicada. En este caso, se analizan las soluciones dominantes para encontrar la alternativa de compromiso que minimice la desventaja y maximice la ventaja en relación con otras alternativas. Estas desventajas se calculan en base a la proximidad relativa, que tiene en cuenta la distancia de cada alternativa a la mejor alternativa y la distancia a la peor alternativa. Por lo tanto, se busca una alternativa que sea superior o al menos no sea inferior en todos los criterios considerados.

En último lugar se encuentran los métodos “*Complex Proportional Assessment*” y “*Complex Proportional Assessment-Grey*”, o COPRAS y COPRAS-G. COPRAS es un método que se basa en el análisis proporcional complejo y considera las relaciones de interdependencia entre los criterios que forman parte del problema MCDM. Su objetivo es analizar el rendimiento de cada alternativa sobre cada criterio, introduciendo un análisis de sensibilidad interno. En los casos en los que exista incertidumbre en los valores de las alternativas, el método se extendió a COPRAS-G, que incluye el uso de conjuntos y lógica difusa.

Finalmente, el último grupo de técnicas complejas tiene la característica principal en el uso de las funciones de valor, y está compuesto únicamente por el método “*Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles*” o MIVES. Este método genera un índice de sostenibilidad para cada alternativa calculado con la WSM de los valores obtenidos mediante las funciones de valor, que traducen los valores cuantitativos o cualitativos de cada criterio a un índice comprendido entre 0 y 1, lo que dota al método de una gran capacidad para adaptarse a cada uno de los problemas (Pons & Aguado, 2012). Además, MIVES utiliza una formulación jerárquica para facilitar la comprensión y análisis del problema, con los indicadores agrupados en criterios, y los criterios en requerimientos.

Selección del método MCDM directriz

Una vez mostrados los principales métodos MCDM, se debe decidir cuál será utilizado como núcleo del presente SEPIP. En este contexto, el método MIVES es la opción escogida. En esta selección se ha considerado el hecho que MIVES nació de la mano de expertos de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), lo que puede brindar una valiosa contribución en la implementación y desarrollo del sistema propuesto. Además, se considera vital visibilizar los estudios de la universidad.

Así mismo, existen muchos otros motivos por los que MIVES es preferible a otros MCDM. Por ejemplo, a diferencia de los métodos elementales, que pueden ser afectados por la subjetividad y la falta de consideración integral de los criterios, MIVES ofrece un enfoque más sólido y completo. Uno de los principales desafíos al evaluar y priorizar las inversiones públicas radica en la necesidad de considerar múltiples criterios que abarcan aspectos económicos, sociales y ambientales. Los métodos elementales, como el pros y contras, el maximin, el conjuntivo y el disyuntivo, tienden a ser limitados en su capacidad para manejar la complejidad y la interrelación de estos criterios. Además, estos métodos a menudo carecen de una estructura matemática sólida que permita una evaluación sistemática y objetiva.

Por otro lado, MIVES se considera mucho más conveniente que los métodos que utilizan modelos históricos, ya que estos tienen importantes limitaciones en el contexto de esta Tesis Doctoral. La primera es su falta de adaptabilidad a situaciones cambiantes, ya que los fondos públicos se destinan a proyectos y programas que evolucionan con el tiempo y consideran criterios que persiguen el interés de la sociedad y la política. La segunda es el enfoque prospectivo. A diferencia de los métodos basados en datos históricos, MIVES permite una evaluación hacia el futuro, algo esencial para los fondos públicos ya que buscan impulsar el desarrollo sostenible a largo plazo.

Finalmente, si bien los métodos de comparación y dominancia tienen un nivel de rigurosidad y estructura suficientemente complejos para cumplir como núcleo directriz del método a desarrollar, de nuevo aparecen dos puntos clave por los que MIVES es preferible. El primero, es el fuerte enfoque en la sostenibilidad que ofrece. En el contexto de la evaluación y priorización de inversiones públicas, la sostenibilidad es un aspecto clave (Ajmal et al., 2017). MIVES se destaca por su enfoque en la evaluación sostenible al considerar aspectos económicos, sociales y ambientales en su división jerárquica, mientras que otros métodos pueden enfocarse más en la optimización de los criterios individuales o en la identificación de alternativas dominantes.

El segundo, es la flexibilidad y adaptabilidad de MIVES mediante sus funciones de valor. MIVES se puede ajustar según las necesidades y características específicas de las inversiones públicas y los proyectos evaluados, personalizando un método matemático que sea completamente capaz de plasmar las preferencias e intereses de las administraciones públicas según los objetivos que plantean alcanzar. El uso de estas funciones, modificables para cada indicador y desarrolladas previamente a la evaluación, permite obtener índices que respondan claramente a las necesidades del problema.

2.3.2. MIVES: Definición y revisión literaria

Una vez definido el método MCDM que servirá como directriz para el desarrollo del SEPIP, este debe exponerse en detalle. Para ello, en esta subsección se explicará y definirá MIVES, añadiendo una revisión literaria sistemática que permita conocer todas las características relevantes de esta metodología.

Definición del método

MIVES es una metodología basada en teoría de la utilidad multiatributo (MAUT, por sus siglas en inglés) inicialmente desarrollada para la evaluación de la sostenibilidad en la construcción y posteriormente adaptada para la evaluación general y priorización de alternativas homogéneas (Viñolas et al., 2009) y heterogéneas.

Lo que hace que MIVES sea diferente de otros modelos es que combina diferentes características, entre las cuales se incluyen: (i) un marco de agregación de requisitos multinivel; (ii) la inclusión de un proceso de ponderación y (iii) funciones de utilidad de valor de indicador. Estos elementos dotan a MIVES de una alta capacidad de adaptación, ajustada para cada problema específico al tiempo que proporciona un razonamiento racional basado en la sostenibilidad para los criterios de decisión.

MIVES estructura el problema dentro de un marco de análisis multicriterio en el cual diferentes alternativas pueden ser evaluadas de acuerdo con un conjunto preestablecido de requisitos para satisfacer un objetivo sostenible predefinido. Estos requisitos, que suelen ser los pilares de sostenibilidad económica, social y ambiental del problema, contienen conjuntos de criterios. Estos, a su vez, contienen un conjunto de indicadores que a su vez pueden tener subindicadores, creando así un sistema multinivel conocido como árbol de decisión (ver Fig. 2.2A).

Para evaluar el problema y reflejar la importancia relativa de cada componente del árbol de decisión de MIVES, se asignan diferentes pesos mediante técnicas como el AHP, el método más utilizado en MIVES. Luego, la evaluación se lleva a cabo aplicando una función de valor a los indicadores.

La función de valor es una única función matemática que convierte las variables cualitativas y cuantitativas de los indicadores, con sus diferentes unidades y escalas, en una escala adimensional comprendida entre 0 y 1. Estos valores respectivos representan el grado mínimo y máximo de satisfacción del tomador de decisiones. Utilizando la ecuación predefinida de la función de valor mostrada en la ecuación 2.1 (Alarcon et al., 2011), se obtienen múltiples formas (ver Fig. 2.2B): lineal, convexa, cóncava o en forma de S, según las decisiones que se tomen.

$$V_{ind} = B \cdot \left[1 - e^{-K \cdot \left(\frac{x - S_{min}}{c} \right)^P} \right] \quad [2.1]$$

Dónde

V_{ind} es el valor del indicador evaluado,

B es un parámetro que permite que la función se mantenga dentro del rango de 0 y 1, asumiendo que 1 es el valor de máxima satisfacción. Este parámetro se determina mediante la ecuación 2.2,

S_{min} es el punto mínimo de satisfacción, con un valor de 0,

S_{max} es el punto máximo de satisfacción, con un valor de 1,

X es el valor del indicador que genera el valor igual a Vind,

P define la forma de la curva. $P < 1$ indica una curva cóncava; $P > 1$ indica una curva convexa o en forma de S; $P = 1$ indica una curva lineal,

C es un parámetro que define el punto de inflexión x para las curvas con $P > 1$,

K es un parámetro que define el valor de y en el punto C.

$$B = \frac{1}{[1 - e^{-K \cdot \left(\frac{x - S_{min}}{c}\right)^P}]}$$
[2.2]

Alternativamente, se pueden usar funciones con valores decrecientes: es decir, adoptan el valor máximo en X_{min} . La única diferencia en la función de valor es que la variable X_{min} se reemplaza por la variable X_{max} , adaptando la expresión matemática correspondiente. Una vez que las funciones de valor se han utilizado para obtener el índice de cada indicador, estos valores se agregan mediante un proceso WSM (ver Fig. 2.2A).

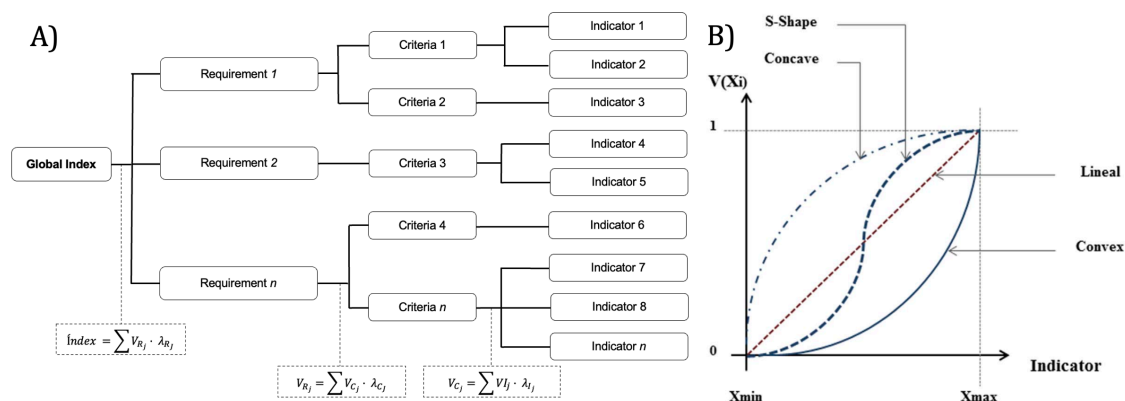


Figura 2.2 – A) Árbol de jerarquía MIVES. B) Formas de la función de valor. Fuente: Hosseini et al. (2018).

Metodología de la revisión literaria

Una revisión sistemática sigue una estructura de cinco etapas (Cooper, 1998): (i) formulación del problema, (ii) determinación de la estrategia de recolección de datos, (iii) evaluación de los datos recuperados, (iv) análisis e interpretación de la literatura y, finalmente, (v) presentación de las conclusiones resultantes.

Para abordar el objetivo de esta Tesis Doctoral, se ha formulado la principal pregunta de investigación (i): ¿Qué tipos específicos de problemas de toma de decisiones se han abordado mediante el uso de MIVES? Con el fin de responder a esta pregunta, se determinó la estrategia de recolección de datos.

(ii) Primeramente, se realiza una búsqueda preliminar para recopilar cualquier artículo relacionado con el objeto de estudio. Los artículos se han identificado a través de la base de datos bibliográfica reconocida internacionalmente “*Web of Science*” o WoS, que accede a artículos de más de 12,000 revistas de todo el mundo (Reuters, 2017). Una de las principales razones que justificó el uso de esta base de datos fue la amplitud de su cobertura, lo que proporciona más resultados que cualquier otra colección disponible.

Además, se utilizó la colección principal de WoS (WoSCC, por sus siglas en inglés) para permitir el uso de Bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017), una herramienta cuantitativa de análisis e investigación que utiliza programación en R para el análisis de bibliografía. Analiza fuentes de datos, autores y documentos, así como estructuras conceptuales, intelectuales y sociales, y sus relaciones utilizando datos de entrada de WoSCC. Una vez decidida la base de datos, se realizó una búsqueda preliminar que luego se filtró para obtener el conjunto final de artículos en los cuales se realizaría el análisis cualitativo y cuantitativo. El proceso de filtrado se llevó a cabo de la siguiente manera: (i) eliminar artículos que, a pesar de tener una estrecha asociación con el objetivo del estudio, finalmente no se consideraron parte central de la investigación, (ii) descartar artículos duplicados.

Como resultado de este proceso, se seleccionó un conjunto final de 67 referencias para su posterior análisis e interpretación. Entre ellas, 59 son artículos científicos. Otras referencias incluyen capítulos de libros y actas de congresos. Con el conjunto de resultados seleccionado, se realizó un análisis doble (ver Fig. 2.3), obteniendo los pasos (iii) y (iv) de Cooper. El primero se centró en el uso de Bibliometrix para obtener resultados cuantitativos sobre características externas del impacto de MIVES, como la producción científica, la expansión, la internacionalización y las citas. El segundo extendió el estudio bibliométrico con una lectura manual detallada para generar la división temática final y analizar algunas características destacadas de MIVES.

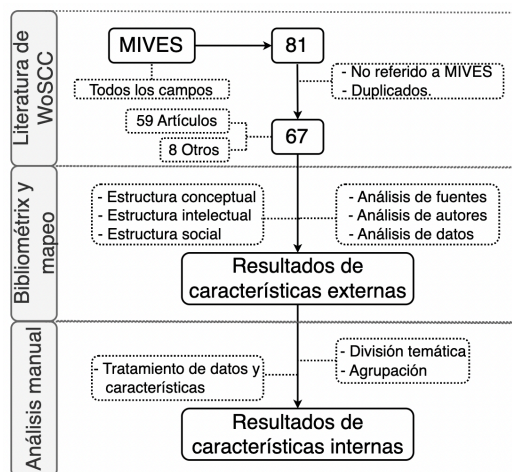


Figura 2.3 – Proceso de revisión literaria y análisis de resultados.

Estadísticas globales

De los 67 documentos recopilados de la base de datos, el 88.06% correspondieron a artículos científicos en revistas (59), el 4.48% fueron capítulos de libros (3) y el 7.46% correspondieron a actas de conferencias. Se proporciona información detallada sobre el conjunto de datos en la Tabla 2.1. Según los datos obtenidos mediante Bibliometrix, los documentos se obtuvieron de 36 fuentes (revistas científicas/repositorios) con un promedio de 19.07 citas por documento y contienen 184 palabras clave adicionales y 234 palabras clave de los autores.

Tabla 2.1 – Información obtenida del set de datos mediante Bibliometrix.

	Resultados
Artículo académico	58
Capítulos de libro	3
Actas de conferencia	5
Fuentes	36
Media de citas por documento	19.07
Palabras Clave Adicionales	184
Palabras clave de los autores	234
Índice de colaboración	1.95
Ratio de crecimiento anual	20.82%

La Figura 2.4 muestra la producción científica anual (ASP, por sus siglas en inglés) de MIVES y las citas totales (TC) en relación con las publicaciones de cada año. La figura indica que ha habido un crecimiento moderado en la producción de literatura desde 2008 hasta 2014 (9 documentos). Sin embargo, el número de artículos ha aumentado significativamente desde 2014, alcanzando 58 documentos desde 2015 hasta 2021. La tasa de crecimiento anual de la producción científica presentada es del 20.82% a lo largo de todos los períodos.

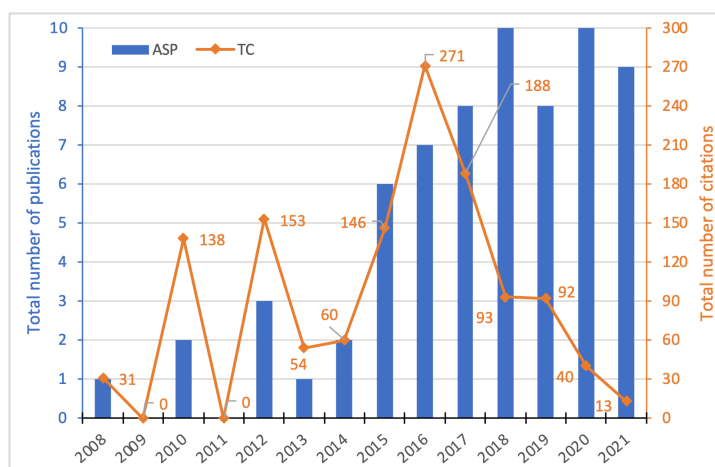


Figura 2.4 – Producción científica anual y citas totales de MIVES (2009-2021). Elaboración propia mediante Bibliometrix.

Antes de 2014, MIVES era utilizado principalmente por el pequeño grupo de autores que habían desarrollado la metodología. Entre estos autores iniciales se encuentran investigadores senior como el Profesor A. Aguado y A. Josa (de la UPC), A. del

Caño y M.P. de la Cruz (de la Universidad de Coruña, UDC) y J. Cuadrado, R. Losada, E. Rojí y J.T. San-José (de la Universidad del País Vasco, UPV/EHU).

Sin embargo, a partir de 2015, las iniciativas e investigaciones sobre la metodología MIVES se intensificaron, contribuyendo y confirmando el alto interés en el tema en los últimos siete años. Por ejemplo, el período de mayor producción (2018-2020) abarca 28 publicaciones, realizadas principalmente por nuevos autores. Estas publicaciones corresponden a 22 autores diferentes, entre los cuales 5 son estudiantes de doctorado actuales, 3 son estudiantes de doctorado que presentaron la Tesis Doctoral durante el período estudiado, y 5 son estudiantes de doctorado que presentaron la Tesis Doctoral en un período de 2 años antes del período estudiado (de 2015 a 2017). Esto significa que el 59.1% de los autores del segundo período no son investigadores experimentados y se consideran parte de la expansión de MIVES.

Además, el alto índice de colaboración mostrado en la Tabla 2.1 (1.95) revela la relación elevada entre los autores experimentados y los autores noveles. Cada documento tiene un promedio de 3.61 coautores, lo que indica la transferencia de conocimientos entre los investigadores. En cuanto a las citas totales (TC), los datos recuperados arrojan luz sobre la respuesta de la comunidad científica a las publicaciones presentadas sobre MIVES. Desde 2008 hasta 2016, las citas experimentaron un incremento directo junto con la producción científica. A medida que la producción de MIVES aumentaba, las citas seguían un crecimiento paralelo. Sin embargo, se observa un punto destacado en el período 2017-2021. Aunque MIVES tuvo la mayor producción, las citas disminuyeron constantemente, lo que puede deberse a dos razones.

La primera está relacionada con la novedad y expansión de MIVES. Dada su relativa novedad, la mayoría de las publicaciones en este período son introducciones metodológicas en diversos campos científicos para aumentar el rango de aplicación del procedimiento. Con una comunidad científica poco acostumbrada al uso de MIVES, este recibe pocas citas. La segunda se refiere a las citas anuales (AC) entre publicaciones. Algunas publicaciones de MIVES tienen índices de citas más altos que otras (como se muestra en la Figura 2.4 para 2010, 2012 y 2016). Por ejemplo, en 2010 se publicaron artículos con 6 AC (San-José & Garrucho, 2010) y 5.25 AC (San-José & Cuadrado, 2010). Lo mismo ocurrió en 2012 con 7.8 AC (Pons & Aguado, 2012) o 6.4 AC (Aguado et al., 2012). Finalmente, 2016 contiene los tres documentos más citados en este análisis. Valores excepcionales de 10.43 AC (Cartelle Barros et al., 2015), 10 AC (Hosseini et al., 2016a) y 8.33 AC (de la Fuente et al., 2016) alteran el valor de ACA.

Estadísticas de autoría

La expansión de MIVES a través de la metodología de nuevos autores estudiada en la Figura 2.4 se analiza con mayor profundidad mediante el mapa de co-citas que se muestra en la Figura 2.5. Esta figura representa una imagen más clara de la relación entre diferentes autores mediante el seguimiento de los artículos que han sido citados juntos. Las líneas representan una cita entre autores, mientras que el tamaño de los nodos está relacionado con la suma de frecuencias. Debe mencionarse que únicamente se consideran los primeros autores en el mapa conceptual.

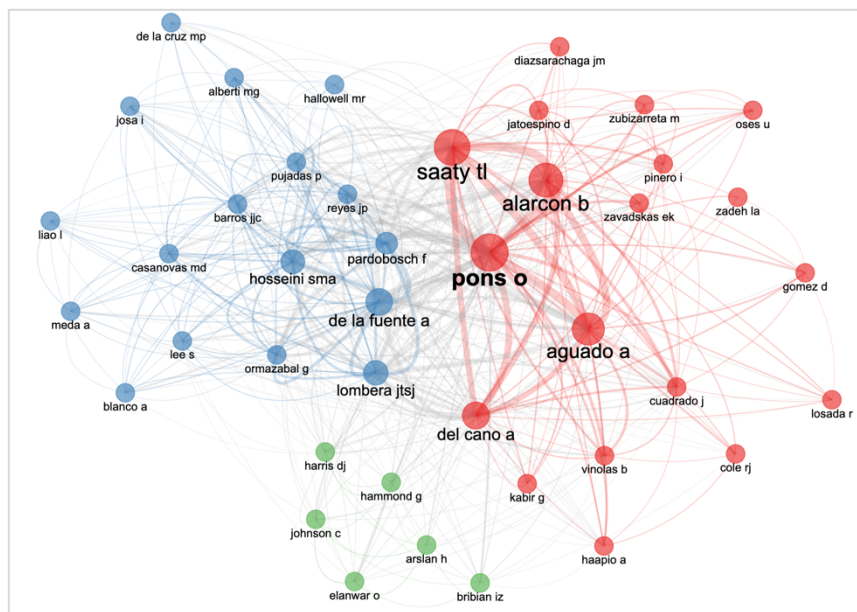


Figura 2.5 – Mapa conceptual de co-citaciones. Elaboración propia mediante Bibliometrix.

El mapa conceptual permite ratificar una ampliación de las publicaciones de MIVES a través de diferentes autores. El grupo central de autores corresponde a investigadores experimentados que han participado en el desarrollo de la metodología y en múltiples publicaciones de MIVES en diferentes campos. Estos autores, fuertemente relacionados por múltiples conexiones, revelan múltiples conexiones de trabajo que refieren a autores distantes, en su mayoría investigadores noveles que desarrollan nuevos proyectos de MIVES. El mapa conceptual permite identificar tres grandes grupos de trabajo o clústeres por color.

El primer clúster, de color rojo, contiene los nodos más significativos en tamaño. El tamaño de estos nodos se justifica ya que estos autores son desarrolladores de MIVES (Aguado), desarrolladores de la metodología de agregación de MIVES como la función de valor (Alarcón) y el Proceso Analítico Jerárquico (Saaty), o autores con publicaciones tempranas (Pons y del Caño). La diferencia de tamaño de los nodos entre los autores de publicaciones tempranas es notable, dada la tasa de publicación, 17 y 3, respectivamente. El segundo clúster, de color azul, contiene nodos de tamaño mediano como de la Fuente, Pardo-Bosch o Lombera (San-José). Estos autores se consideran un nuevo clúster ya que han ampliado la aplicación de MIVES en múltiples campos científicos y tienden a ser citados juntos. El último clúster, de color verde, no tiene nodos de tamaño notable, ya que su conexión con otros grupos no es destacada. Sin embargo, se detecta un gran número de autores noveles en los tres clústeres.

Aunque la diferencia de tamaño de los nodos ya destaca la disparidad de estos autores, se aplica la Ley de Lotka para generar grupos de autores. La Ley de Lotka postula la existencia de un pequeño grupo de autores denominados autores centrales, que tienen la mayor producción científica. Los autores centrales se dividen de los autores ocasionales, que son más numerosos, pero tienen una menor producción científica. En la Figura 2.6, los autores se dividen en función de sus publicaciones de MIVES.

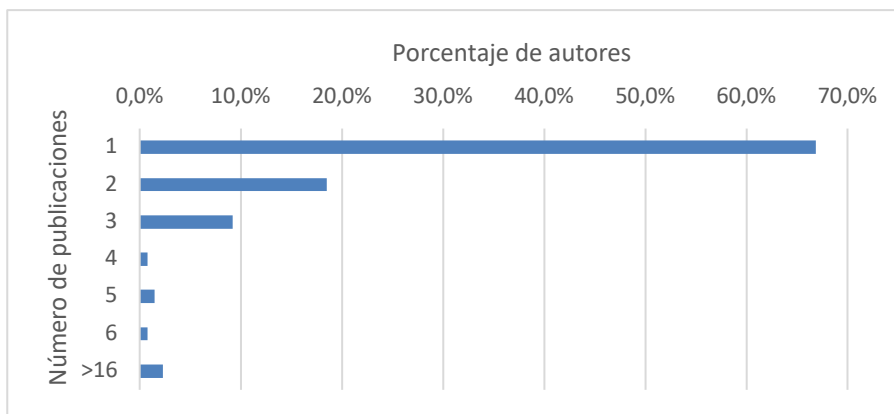


Figura 2.6 – Aplicación de la Ley de Lotka sobre el set de datos.

Casi el 70% de los autores solo tienen una publicación académica. Sin embargo, el 0.80%, 1.50%, 0.80% y 2.30% de los autores tienen 4, 5, 6 y más de 16 publicaciones, respectivamente. El análisis de todos los datos presentados indica que el núcleo está formado solo por el 4.60% de los autores totales, mientras que el 95.40% son autores ocasionales, lo que corresponde a una distribución normal de la Ley de Lotka.

Esta distribución asegura la expansión del uso de MIVES, ya que los autores centrales representan un valor pequeño. Incluso los desarrolladores y pioneros de MIVES tienen más publicaciones, escritas principalmente por autores ocasionales. Estos autores ocasionales son principalmente nuevos investigadores que están aplicando MIVES en nuevos campos.

Estadísticas de publicación por país

Por otro lado, un pequeño clúster de autores centrales podría tener un impacto negativo cuando sus componentes forman parte de los mismos grupos de investigación. Un clúster centralizado de autores centrales puede disminuir las relaciones internacionales y el desarrollo metodológico global de MIVES. Por lo tanto, la internacionalización de MIVES debe ser estudiada. Para este propósito, se utilizan los autores de la ubicación de las publicaciones (Figura 2.7A).

Este análisis diferencia entre las publicaciones de un solo país (SCP, por sus siglas en inglés) y las publicaciones de múltiples países (MCP, por sus siglas en inglés). Las SCP son escritas por un grupo de autores en el mismo país, mientras que las MCP son escritas por un grupo de autores ubicados en diferentes países. Estas colaboraciones internacionales involucran principalmente a grupos de investigación en España, como se muestra en la Figura 2.7B. En esta figura, si bien el índice de producción científica ha sido calculado por Bibliometrix, las colaboraciones internacionales MCP se han añadido manualmente.

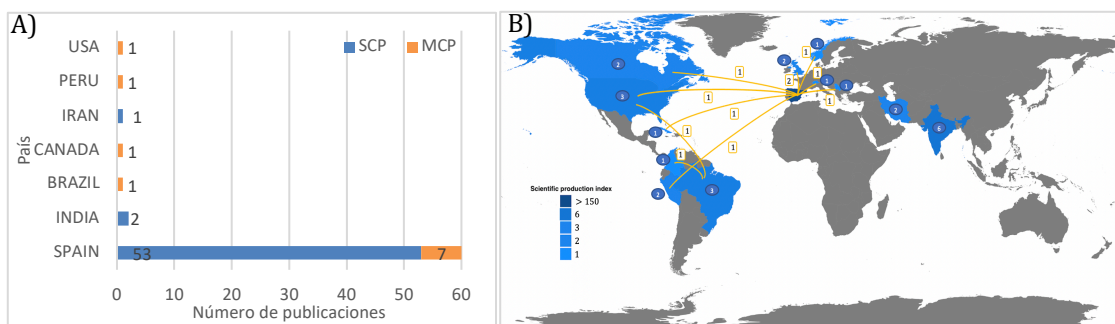


Figura 2.7 – A) Procedencia de los autores. B) Índice de producción científica de los países (azul) con colaboraciones internacionales (naranja). Elaboración propia mediante Bibliometrix.

Más del 90% de las publicaciones de España son SCP (53 de 60). Esta alta tasa de SCP puede afectar el desarrollo y la aplicación de MIVES a nivel internacional, ya que significa una baja tasa de MCP. Entre otros países de publicación, solo Irán e India tienen un 100% de SCP. Estados Unidos, Perú, Canadá y Brasil tienen un 100% de MCP. En cuanto al índice de producción científica, España tiene el valor más alto, ya que la mayoría de los autores centrales son españoles. Las colaboraciones internacionales con Canadá, Perú, Reino Unido, Estados Unidos, Noruega, Cuba, Serbia y Suiza ocurren con este núcleo de origen español.

Sin embargo, algunas producciones científicas deben destacarse. Es el caso de India, Irán, Brasil y Colombia, que tienen producción científica sin relaciones de colaboración con los autores centrales de MIVES. Incluso Brasil y Colombia tienen colaboraciones internacionales sin conexión con el nodo central español. Este hecho denota la internacionalización de MIVES.

Aunque esta internacionalización permite analizar la expansión y adopción de la metodología fuera del país desarrollador, se necesita un análisis de fuentes para determinar el nivel de influencia de MIVES. No es atípico que algunas nuevas metodologías aparezcan solo en revistas de bajo impacto sin repercusión en revistas de primer cuartil. Este análisis de fuentes, mostrado en la Tabla 2.2, se realiza concurrentemente con la Ley de Bradford. La Ley de Bradford es generalmente utilizada para determinar el núcleo de publicación, que expone dónde MIVES tiene sus principales contribuciones. La tabla analiza los 59 artículos de revistas, ya que las otras referencias (por ejemplo, actas de conferencias o capítulos de libros) no se utilizan en la Ley de Bradford. También contiene información sobre el número total de publicaciones (TP), citas (TC), clasificación temporal de citas (obtenida a través del número total de citas por documento desde la primera publicación en una revista), índices h locales y cuartiles. Las fuentes se han ordenado por TP y, en segundo lugar, por TC.

Tabla 2.2 – Análisis de fuentes de MIVES con publicaciones, citas y características de impacto.

Fuente	TP	TC	TP/TC	Índice h	Cuartil
Sustainability	10	75	7,5	4	Q1
Journal of cleaner production	5	102	20,4	5	Q1
Sustainable cities and society	5	115	23	5	Q1
Building and environment	4	165	41,25	3	Q1
Journal of construction Engineering and management	4	127	31,75	3	Q1
Construction and building materials	2	118	59	2	Q1
Journal of civil engineering and management	2	45	22,5	2	Q2
Environmental impact assessment review	2	42	21	2	Q1
Land use policy	2	42	21	1	Q1
Environmental science & policy	2	39	19,5	2	Q1
DYNA	2	3	1,5	1	Q3
Energy	1	75	75	1	Q1
Expert systems with applications	1	50	50	1	Q1
Tunnelling and underground space technology	1	38	38	1	Q1
Journal of management in engineering	1	31	38	1	Q1
Structure and infrastructure engineering	1	25	25	1	Q1
Journal of cultural heritage	1	24	24	1	Q1
Civil engineering and environmental systems	1	23	23	1	Q3
International journal of disaster risk reduction	1	16	16	1	Q1
Road materials and pavement design	1	14	14	1	Q1
Environmental geotechnics	1	11	11	1	Q2
chemosphere	1	11	11	1	Q1
Informes de la construccion	1	3	3	1	Q2
Environmental science and pollution research	1	2	2	1	Q1
Proceedings of the institution of civil engineers: engineering sustainability	1	1	1	1	Q3
Sustainable energy technologies and assessments	1	1	1	1	Q1
International journal of production management and engineering	1	0	0	-	Q4
Applied sciences	1	0	0	-	Q2
Detritus	1	0	0	-	Q3
Risk analysis	1	0	0	-	Q1

Las publicaciones analizadas de MIVES han aparecido en 30 revistas diferentes, una cantidad es notable considerando el número de resultados analizados. Estas revistas se distribuyen en diferentes áreas del conocimiento, como ciencias de la sostenibilidad, tecnologías de la construcción y ciencias de materiales, energía y química. Esto implica que MIVES ha atraído ampliamente la atención de los investigadores en diversos campos como un método multicriterio adecuado para seleccionar y priorizar alternativas en distintos campos de estudio.

Sin embargo, las revistas presentan variaciones notables en los valores de TP y TC, por lo que cobran importancia las proporciones TC/TP y TC/TPD. La primera proporción permite analizar el impacto en diferentes campos temáticos. Por ejemplo, la revista "Energy" con solo 1 publicación (en el puesto 12 en el ranking de TP) ocupa el primer lugar en el ranking de TC/TP. El segundo y tercer lugar de estos rankings pertenecen a las revistas "Construction and Building Materials" y "Expert Systems with Applications", en el puesto 6 y 13 en el ranking de TP. Esto significa que estas revistas contienen publicaciones de alto impacto en sus respectivos campos.

Según los datos de Scimago de 2021, 21 revistas se encuentran en el primer cuartil (Q1), 4 en el segundo cuartil (Q2), 4 en el tercer cuartil (Q3) y 1 en el cuarto cuartil (Q4).

Esto significa que el 70% de las revistas relacionadas con MIVES son fuentes de alto impacto. Además, un porcentaje similar se encuentra en el número de publicaciones por cuartil. 48 publicaciones (81,36%) se encuentran en revistas del primer cuartil, 5 (8,47%) en revistas del segundo cuartil, 5 (8,47%) en revistas del tercer cuartil y 1 (1,69%) en revistas del cuarto cuartil. El núcleo de publicaciones obtenido mediante la Ley de Bradford reafirma el impacto de MIVES detectado por las fuentes de publicación, ya que las principales contribuciones de MIVES se pueden encontrar entre estas fuentes.

Aplicaciones e investigación

Una vez estudiado el crecimiento del interés y la expansión del uso de MIVES, se analizan los campos de aplicación de la metodología. Aunque el objetivo principal de esta sección es proponer una división final de los grupos mediante un análisis manual, se han identificado varios aspectos relacionados con el tratamiento de los datos que pueden ser estudiados en mayor detalle.

Un primer paso para analizar en qué campos se ha aplicado MIVES es el estudio de las palabras clave, que consisten en una lista de términos que los autores consideran que mejor representan el contenido de sus artículos (ver Tabla 2.3) y contienen información sobre el campo específico donde se ha aplicado MIVES. A través del análisis bibliométrico se obtienen las 200 palabras más utilizadas. Se aplica el siguiente proceso de selección para filtrar los resultados: (i) Se eliminan las palabras que no contribuyen al objetivo del estudio. Por ejemplo, "modelo", "metodología", "índice" o "evaluación" fueron algunas de ellas. (ii) Se consideraron palabras comúnmente utilizadas que no ayudan a la división temática. Palabras típicas en estos estudios son "MIVES" con 41 repeticiones, "sostenibilidad" con 37, "MCDM" con 32 y "AHP" con 22. La mayoría de los resultados estudiados las exponen como palabras clave, pero no proporcionan información sobre la temática. (iii) Se realizó una agrupación por similitud, ya que algunas palabras eran casi idénticas, pero con pequeñas diferencias. Por ejemplo, "placa" y "placas" se han unido.

Un punto destacado es la amplia gama de campos en los que se ha aplicado MIVES a pesar de su corta vida útil (primera publicación en 2008). Solo el 25,24% (26 de 103) de las palabras mostradas tienen más de una aparición. La mayoría de las palabras tienen una aparición de menos del 1% (1 de 103). Debido a esta dispersión de palabras clave, el proceso de agrupamiento es difícilmente aplicable. Por ejemplo, "Estructuras de hormigón" o "Hormigón reforzado con fibra" podrían convertirse en una temática. Clústeres similares podrían generarse por "Inundaciones", "Plantas de energía", "Edificios industriales", "Techos" o "Reconstrucción". Sin embargo, aplicar las palabras clave directamente para generar grupos presenta dos dificultades. En primer lugar, se obtendrían muchos clústeres con pocos artículos relacionados. En segundo lugar, algunas palabras clave necesitan ser asociadas para tener sentido (por ejemplo, "Evaluación del ciclo de vida" con "Carreteras").

En consecuencia, se requiere un análisis manual en profundidad para respaldar y mejorar la división temática. La estructura estándar de la metodología en las publicaciones ha sido la primera revelación del análisis manual. No importa si se refieren a comparaciones, evaluaciones o priorización. En su lugar, todos los resultados preparan una estructura específica de MIVES que proporciona clasificaciones u ordenación de

alternativas. Por esta razón, la división temática puede centrarse en el análisis en lugar de analizar diferentes formas de aplicación de MIVES.

Tabla 2.3 – Análisis de palabras clave y su número de apariciones.

Palabra	Nº	Palabra	Nº	Palabra	Nº
concrete structures	4	cities	1	low-cost housing	1
building	4	climate	1	management-public investment	1
fiber reinforced concrete	4	columns	1	mswi ashes	1
life cycle assessment	4	commercial bank branches	1	mswm scenarios	1
monte carlo	3	computer-aided design	1	pavement distress	1
post-disaster temporary housing	3	concrete pipe	1	pervious pavements	1
public assets	3	concrete technology & manufacture	1	power plants	1
standards and codes	3	construction materials	1	precast concrete	1
citygml	2	contaminated site	1	prefabricated buildings	1
concrete sustainable evaluations	2	d center	1	primary education	1
industrial	2	dbm	1	project management	1
polyolefin fibres	2	delphi	1	reconstruction	1
sustainable development	2	developing countries	1	reinforced concrete	1
urban agriculture	2	disaster recovery	1	reinforced soils	1
extreme events	2	disruptive innovation	1	residential	1
fuzzy arithmetic	2	eco-trench	1	retaining walls	1
knapsack	2	electrokinetic remediation	1	road	1
pavement condition index	2	elesdopa	1	robbery risk	1
pipeline	2	facade	1	rooftop greenhouses	1
recycled aggregate	2	floods	1	r&	1
risk analysis	2	flyover bridge	1	r&d centre	1
schools	2	food safety	1	sample buildings	1
site location	2	foundation piles	1	segmental linings	1
slabs	2	frc	1	sewer	1
social impact	2	general morphology analysis	1	shell and tube heat exchanger	1
steel fibers	2	genetic	1	single-family house	1
active learning	1	gis	1	sirsdec	1
air quality	1	green building	1	smart cities	1
architecture	1	green remediation	1	software	1
assessment urban street	1	historic buildings	1	solar control	1
bam	1	household waste	1	steel	1
bam earthquake	1	industrial buildings	1	steel-mesh	1
bloom taxonomy	1	infrastructure management	1	supply	1
brute force	1	intelligent facade layers	1		
building interior	1	lectures	1		

Seguendo los hallazgos de la Tabla 2.3, se realizó un análisis manual para sugerir una división temática final en 10 clústeres. Estos clústeres están relacionados con edificios, materiales, elementos, códigos y regulaciones, nuevas tecnologías y estrategias, priorización de la inversión pública, energía, incertidumbre, maquinaria y análisis de

riesgos. Los clústeres se han ordenado por la fecha de la primera publicación y contienen las publicaciones mostradas en la Figura 2.8.

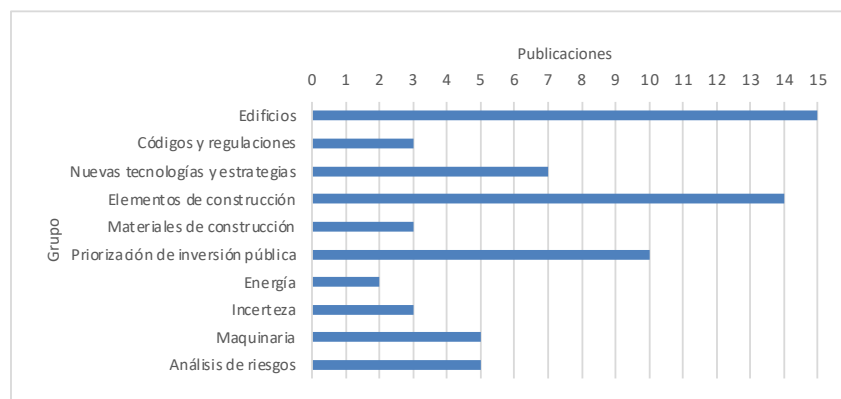


Figura 2.8 – Agrupación propuesta y cantidad de publicaciones que las componen.

Además, se calcula la evolución de la dominancia de cada grupo a lo largo de los años, mediante el estudio del porcentaje de la producción científica anual publicada tal y como se muestra en la Figura 2.9. Esto permite analizar la evolución de la metodología a lo largo del tiempo y su interés. Finalmente, la Tabla 2.4 resume las publicaciones englobadas por sus tópicos y temáticas, generando así los grupos propuestos.

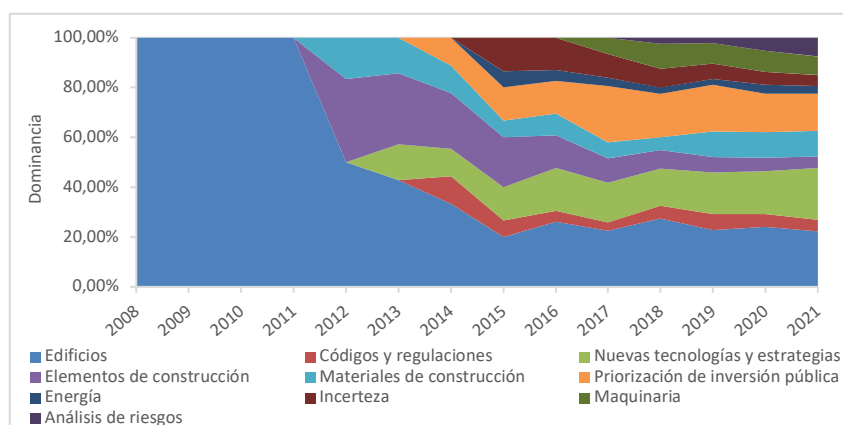


Figura 2.9 – Evolución anual de la dominancia de los distintos grupos.

El primer grupo abarca el análisis general de edificios. Desde 2008 hasta 2011, las publicaciones de MIVES solo estaban relacionadas con este grupo debido a que los desarrolladores de MIVES forman parte de grupos de investigación de ingeniería civil y procesos de construcción. En el tema de túneles, se encuentran decisiones de mejora de valores sociales sobre el metro de Barcelona (Ormazabal et al., 2008), evaluaciones de sostenibilidad de túneles en Madrid y Río (Lopez-de Abajo et al., 2020), selección de materiales para túneles (Alberti et al., 2018) y comparaciones de hormigón y refuerzo en túneles (de la Fuente et al., 2017b). Estas comparaciones son similares al tema de puentes elevados con un análisis de hormigón reforzado con fibra (Enfedaque et al., 2018). Los edificios industriales tienen comparaciones (Cuadrado et al., 2016; San-José & Garrucho, 2010) entre alternativas, algunas centradas en la fase de diseño (San-José & Cuadrado, 2010).

Tabla 2.4 – Agrupación propuesta por temáticas, tópicos, y referencias que los componen.

Temática	Tópico	Referencia
Edificios	Túneles	(Ormazabal et al., 2008), (Lopez-de Abajo et al., 2020), (Alberti et al., 2018), (de la Fuente et al., 2017b)
	Puentes elevados	(Enfedaque et al., 2018)
	Edificios industriales	(San-José & Cuadrado Rojo, 2010), (Cuadrado et al., 2016), (San-José & Garrucho, 2010)
	Viviendas temporales	(Hosseini et al., 2016a; 2016b; 2018; 2020)
	Edificaciones de bajo coste	(Joglekar et al., 2018)
	Viviendas autopromocionadas	(Sánchez-Garrido & Yepes, 2020)
	Reconstrucción de edificios	(Cardenas-Gomez et al., 2021)
Código y regulaciones	Análisis de códigos	(Aguado et al., 2012)
	Inclusión de código MIVES	(Mel et al., 2015), (Gomez-Lopez et al., 2012)
Nuevas tecnologías y estrategias	Construcción de escuelas	(Pons & Aguado, 2012)
	I+D (Investigación y Desarrollo)	(Lizarralde et al., 2020), (Lizarralde & Ganzarain, 2019)
	Remediación electrocinética	(Trentin et al., 2019)
	Estrategias de aprendizaje activo	(Pons et al., 2019)
	Aplicaciones de MIVES	(Pons et al., 2016)
	Evaluaciones de innovación	(Zubizarreta et al., 2021)
	Elementos de construcción	Columnas
Vigas		(Josa et al., 2020)
Losas		(de la Fuente et al., 2019)
Tuberías		(de la Fuente et al., 2016), (Josa et al., 2021a)
Muros de retención		(Damians et al., 2016)
Zanjas		(Casanovas-Rubio et al., 2019)
Tanques de retención de hormigón		(Orbe et al., 2018)
Pilotes		(Josa et al., 2021b), (Pons et al., 2021)
Techos		(Pons et al., 2015), (Banirazi et al., 2021)
Fachadas	(Gilani et al., 2017), (Habibi et al., 2020)	
Materiales de construcción	Estructuras de madera	(Zubizarreta et al., 2019)
	Estructuras de hormigón	(de la Fuente & Fernández-Ordóñez, 2018)
	Estructuras prefabricadas	(Pons, 2014)
Priorización de inversión pública	Nuevas instalaciones e infraestructuras	(Pardo-Bosch & Aguado, 2016), (Pujadas et al., 2017), (Villegas Flores et al., 2021), (Pardo-Bosch et al., 2019), (Diaz-Sarachaga et al., 2017a, 2017b), (Jato-Espino et al., 2014)
	Mantenimiento y rehabilitación	(Pardo-Bosch & Aguado, 2015), (Piñero et al., 2017), (Pujadas et al., 2019)
Energía	Generación de energía	(Cartelle et al., 2015)
	Procesamiento de biomasa	(Joglekar et al., 2020)
Incerteza	Aritmética difusa	(de la Cruz et al., 2015b), (del Cano et al., 2016)
	Monte Carlo	(de la Cruz et al., 2015a)
Maquinaria	Aerogeneradores	(de la Fuente et al., 2017a), (Pons et al., 2017)
	Intercambiadores de calor	(Cartelle et al., 2018)
	Residuos	(Pons et al., 2018), (Seraj et al., 2020)
Evaluaciones de riesgo	Cambio climático	(Gandini et al., 2021)
	Inundaciones	(Gandini et al., 2020), (Gandini et al., 2018), (Tarrago-Garay et al., 2020)
	Robo bancario	(de la Cruz López et al., 2021)

Las viviendas temporales para llevar a cabo una rápida reconstrucción después de un desastre se han estudiado recurrentemente. Por ejemplo, existen alternativas de

ubicación de viviendas temporales (Hosseini et al., 2016b; 2018), comparaciones de construcción tecnológica (Hosseini et al., 2016a) y estudios de optimización del diseño interno (Hosseini et al., 2020), así como comparaciones entre ladrillos de edificios de bajo costo (Joglekar et al., 2018). Las viviendas autopromocionadas tienen un estudio adaptado a viviendas unifamiliares (Sánchez-Garrido & Yepes, 2020), y también se estudia la reconstrucción de edificios de adobe en zonas sísmicas (Cardenas-Gomez et al., 2021). En la actualidad, este es el grupo dominante con un valor actual de 22.39%, en parte debido a que la mayoría de los autores de MIVES aún están relacionados con la ingeniería civil y la construcción.

Una vez que se presentó el método, en 2012, aparecieron el segundo (análisis de códigos y regulaciones) y el tercer (nuevas tecnologías y estrategias) grupo, que llegaron a constituir el 33.33% y el 16.67% de los resultados. El objetivo principal era mejorar los procedimientos administrativos (por ejemplo, el diseño y cálculo de hormigón) con la inclusión de evaluaciones de sostenibilidad e introducir MIVES en otras disciplinas científicas. En el segundo grupo, se encuentran propuestas de evaluación de códigos de sostenibilidad españoles con la inclusión de MIVES (Aguado et al., 2012; Mel et al., 2015) y adaptaciones de software de códigos de sostenibilidad (Gomez-Lopez et al., 2012). El tercer grupo está compuesto por comparaciones de tecnologías de construcción escolar (Pons & Aguado, 2012), selección de tecnologías de desarrollo I+D (Lizarralde et al., 2020; Lizarralde & Ganzarain, 2019), modelos de análisis de remediación electrocinética (Trentin et al., 2019), estrategias de aprendizaje activo y actividades en grupos grandes (Pons et al., 2019), estudios de aplicaciones de MIVES en ingeniería civil y arquitectura (Pons et al., 2016) y evaluaciones de capacidad de innovación en gestión de proyectos (Zubizarreta et al., 2021).

Estas nuevas aplicaciones y propuestas de evaluación de sostenibilidad abrieron la puerta a muchas publicaciones específicas. Un claro ejemplo se encuentra en el cuarto grupo, que involucra artículos basados en la comparación, selección u optimización de elementos de construcción sostenibles. Destaca que el porcentaje de dominio de este grupo ha sido estable, con un 14.29% en 2013 y un 20.90% en 2021, lo que demuestra un interés sostenido en aplicar la sostenibilidad en diferentes elementos de construcción. Algunos de ellos son comparaciones de columnas de hormigón (Pons y de la Fuente, 2013), vigas (Josa et al., 2020) y losas (de la Fuente et al., 2019), así como evaluaciones de sistemas de tuberías (de la Fuente et al., 2016) y refuerzo de tuberías (Josa et al., 2021a). Otros estudios se centran en muros de contención de tierra (Damians et al., 2016), zanjas (Casanovas-Rubio et al., 2019), tanques de retención de hormigón estructural (Orbe et al., 2018), pilotes de hélice continua (Josa et al., 2021b) y pilotes de hormigón reforzado con fibras (Pons et al., 2021). Por último, este grupo considera estudios de techos y fachadas, por lo que se incluye el análisis de sostenibilidad de techos (Pons et al., 2015), la selección de techos para reducción de la contaminación del aire (Banirazi et al., 2021), la selección de fachadas con múltiples partes interesadas basada en la aceptación (Gilani et al., 2017) y las comparaciones de fachadas inteligentes de múltiples capas (Habibi et al., 2020).

El quinto grupo contiene comparaciones generales de estructuras en cuanto a sus materiales. Su dominio ha ido disminuyendo a lo largo de los años debido a que su generalidad abarca múltiples publicaciones del mismo tema. Se consideran evaluaciones

de estructuras de madera (Zubizarreta et al., 2019), concreto (de la Fuente & Fernández-Ordóñez, 2018) y prefabricadas (Pons, 2014) en este grupo.

El sexto grupo son guías para diseñadores y tomadores de decisiones para la construcción y pautas para la priorización de fondos de administración pública, un grupo que es de especial interés en esta Tesis Doctoral. Su dominio actual es del 14.93% (el tercer valor más alto en la actualidad), lo que indica el alto impacto de estas publicaciones en la comunidad científica. En el primer tema, se encuentran estudios de financiación de nuevas instalaciones e infraestructuras. Estudios sobre la inclusión de sostenibilidad en la priorización de infraestructuras (Pardo-Bosch & Aguado, 2016) dieron paso a modelos de priorización de la administración pública con MIVES. Algunos ejemplos se encuentran en la aplicación de MIVES en inversiones municipales en Barcelona (Pujadas et al., 2017), evaluaciones de nueva infraestructura urbana (Villegas Flores et al., 2021) o modelos de priorización de edificios de servicios públicos (Pardo-Bosch et al., 2019). Además, se desarrollaron modelos de priorización de inversiones en países en desarrollo (Diaz-Sarachaga et al., 2017a, 2017b) y modelos de selección de pavimentos urbanos (Jato-Espino et al., 2014). El mantenimiento y la rehabilitación son otros temas considerados en este grupo, como estudios sobre el mantenimiento de estructuras hidráulicas (Pardo-Bosch & Aguado, 2015), priorización de inversiones en rehabilitación en La Habana (Piñero et al., 2017) y el análisis del estado de los pavimentos (Pujadas et al., 2019).

El séptimo grupo incluye estudios relacionados con la energía. Este contiene análisis de alternativas de generación de energía (Cartelle et al., 2015) e índices de sostenibilidad para el procesamiento de biomasa (Joglekar et al., 2020). En lo referente al octavo grupo, este contiene estudios de inclusión de incertidumbre en MIVES, mediante el análisis de rendimiento ante diversos métodos. Esta incertidumbre se ha aplicado mediante aritmética difusa (de la Cruz et al., 2015b; del Cano et al., 2016) o utilizando la técnica de Monte Carlo (de la Cruz et al., 2015a). El dominio de este grupo ha ido disminuyendo continuamente, ya que estos estudios se concentran en un corto período.

El noveno grupo está relacionado con publicaciones de comparación, selección u optimización de maquinaria. Por lo tanto, se consideran evaluaciones de sistemas de soporte para aerogeneradores (de la Fuente et al., 2017a), análisis de diseño de torres de aerogeneradores sostenibles (Pons et al., 2017), optimizaciones de intercambiadores de calor de tubo y carcasa (Cartelle et al., 2018) y aplicaciones de residuos como el uso de dispositivos de contenedores solares en escuelas (Pons et al., 2018) o aplicaciones de incineración de residuos en ingeniería civil (Seraj et al., 2020). Su dominio se ha mantenido estable, desde un 6.45% hasta un 7.48%, incluso en 5 años. Esta consistencia es destacable, ya que muestra que MIVES está despertando el interés no solo de investigadores en ingeniería civil, sino que también está expandiendo la metodología de evaluación a diferentes campos.

Finalmente, las evaluaciones de riesgo forman último grupo, que incluye los efectos del cambio climático en el desarrollo de ciudades sostenibles (Gandini et al., 2021), y de las lluvias extremas en las ciudades (Gandini et al., 2020), patrimonios culturales (Gandini et al., 2018) y análisis de riesgo de robos bancarios para reducir el impacto en el personal (de la Cruz López et al., 2021). Se destaca la evolución del dominio, desde un 2.50% en 2018 hasta un valor actual del 7.46%, mostrando la expansión de MIVES.

2.4. NECESIDADES DE DESARROLLO

Una vez expuesto el método MIVES y su revisión literaria, se debe analizar si éste cumple con los principales objetivos y características que debería tener un sistema de priorización para la administración pública. Estas características nacen tanto de los requerimientos expuestos por asociaciones gubernamentales, como de la comparación de MIVES con los últimos avances en la ciencia de toma de decisiones, y se dividen entre las básicas y las complejas.

La primera característica básica es la necesidad de una metodología capaz de considerar alternativas heterogéneas. Dada la naturaleza del sector público, en muchos casos un solo presupuesto debe utilizarse para aplicar una gran diversidad de actuaciones, ya sea según el estado (mantenimiento, reparación, mejora u obra nueva) o el tipo de infraestructuras (carreteras, puentes, calles...). En este caso, MIVES ha demostrado ser capaz de operar perfectamente con esta característica, tal y como se puede observar en la Tabla 2.4 (grupo de Priorización de fondos públicos).

La segunda característica es la necesidad de un método generalista, lo que significa que sea capaz de utilizar una estructura matemática tanto para indicadores y criterios cuantitativos como cualitativos. Esto se debe a que, en muchos casos (y sobre todo en la priorización de infraestructuras), ni la administración pública ni los expertos pueden ser capaces de obtener o conocer con total exactitud. Por ello, los indicadores deben poderse expresar de forma cualitativa. De nuevo, MIVES cumple con esta condición, ya que el uso de sus funciones de valor permite traducir todo tipo de datos a un índice de satisfacción o índice de sostenibilidad.

Las dos últimas propiedades refieren al procedimiento de trata de datos una vez se ha llevado a cabo la generación del ranquin de priorización. La tercera refiere a que el método debe ser capaz de posicionar las alternativas no sólo por un ranquin, sino también por un método de clasificación. El principal motivo de esta peculiaridad es justamente permitir que la administración pública tenga un margen de maniobra en la decisión final de la priorización, pues estas decisiones suelen tener un fuerte componente político. Un sistema de clasificación, en vez de un simple ranquin, puede aumentar la predisposición de la administración pública para utilizar metodologías científicas en la toma de decisiones. Sin embargo, aun conociendo el fuerte interés que podría generar un método de clasificación nacido de MIVES, aún no se ha propuesto.

Finalmente, la cuarta peculiaridad es totalmente opuesta a la tercera, ya que esta hace referencia a la capacidad del método a optimizar los recursos disponibles. En la administración pública, existen presupuestos limitados con los que se deben trabajar para intentar obtener el mayor impacto posible. Es por ello, que también debe implementarse un método de optimización al ranquin obtenido. Este aspecto se considera un objetivo de implementación, pues MIVES ya ha sido probado el método Knapsack (Hosseini et al., 2018).

Por otro lado, una vez analizado el estado de arte moderno y los últimos desarrollos de los métodos MCDM, se han considerado las tres características complejas

mostradas en la Figura 2.10. Esta figura relaciona cada una de las características con su uso o aparición en el set de datos obtenido mediante la revisión literaria.

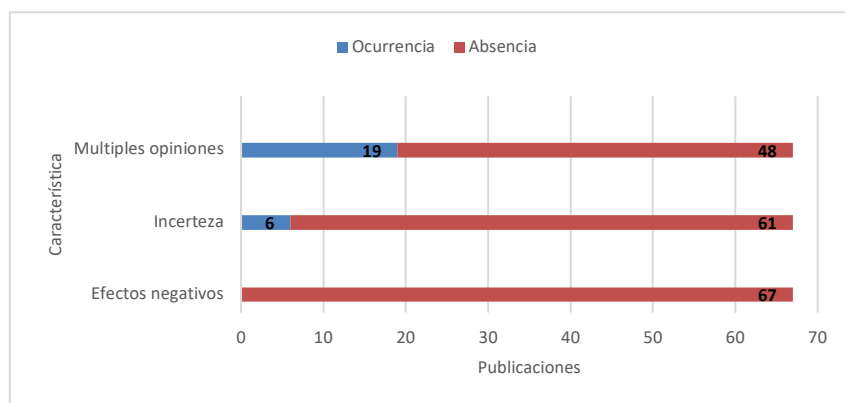


Figura 2.10 – Características complejas y su aparición o ausencia en el set de datos.

La primera de ellas refiere a la consideración de múltiples opiniones. La inclusión de múltiples partes interesadas en las metodologías de MCDM está ganando relevancia en las administraciones públicas y la sociedad en general, con el fin de tener en cuenta puntos de vista diversos y heterogéneos y, de esta manera, alejarse de decisiones unilaterales. Con este objetivo, varios investigadores han desarrollado varias metodologías como, por ejemplo, enfoques de proyección de vectores (Yue, 2012a) y extensiones de TOPSIS (Yue, 2012b) para considerar múltiples expertos.

Sin embargo, aunque en la actualidad existe una gran variedad de técnicas específicamente preparadas para la inclusión de múltiples decisores, es impactante la limitación que muestra MIVES, con un uso común de AHP. Como se puede ver, se consideran múltiples partes interesadas en 19 de las 67 publicaciones, alrededor del 28% de ellas. Sin embargo, el AHP es la metodología más utilizada con una destacada tasa de aplicación del 84.21% (16 de 19). Mención especial merecen algunos artículos que amplían el AHP con la entropía de Shannon (Hosseini et al., 2018) o utilizan técnicas Delphi explícitas (Habibi et al., 2020; Pons et al., 2021).

La segunda, refiere a la consideración de la incertidumbre. La incertidumbre es una característica común en los métodos de priorización o selección de inversiones, y mucho más en el caso de las infraestructuras. Dado que generalmente no es posible aplicar todas las alternativas debido a los altos costes de implementación, ni se pueden conocer con exactitud los valores exactos que tomarán ciertos indicadores, se deben teorizar sus posibles valores en el proceso de evaluación y priorización. Además, existe también la incertidumbre ligada a los pesos de los criterios, generada a partir de la vacilación de los expertos o decisores.

En el caso de MIVES solo 6 de las 67, alrededor del 9%, incluyen consideraciones de incertidumbre. Las funciones de valor incluidas en la metodología de MIVES podrían explicar esta baja preocupación por los datos de incertidumbre. Como estas funciones se utilizan para convertir datos cualitativos y cuantitativos en valores en el rango de [0,1], algunos estudios no requieren el tratamiento de la incertidumbre al utilizar escalas cualitativas de atributos asignadas a un valor exacto. Además de las publicaciones

presentadas en el grupo de incertidumbre, otras la consideran mediante el uso de Monte Carlo en el tratamiento de datos (Cartelle et al., 2018; de la Cruz López et al., 2021; Jato-Espino et al., 2014).

Para concluir, los afectos adversos aplicados a los indicadores es la última característica, ya que algunas alternativas pueden tener consecuencias fuertemente negativas, como, por ejemplo, impactos ambientales y sociales adversos significativos o pérdidas económicas futuras.

Sin embargo, la trata de efectos adversos presenta un punto destacado. Ninguna publicación presenta una contribución negativa de los efectos adversos, considerando los indicadores adversos desde un punto de vista positivo utilizando una función de valor inversa (disminuyendo). Por lo tanto, incluso un indicador negativo que contiene datos peligrosos se evalúa con un valor mínimo de 0. Por otro lado, algunos autores consideran que estos indicadores adversos deben evaluarse desde un punto de vista negativo (Yaylacı & Düzgün, 2017), manteniendo el signo negativo en el WSM. Como MIVES utiliza esta técnica para agregar los índices obtenidos a través de las funciones de valor, se debe considerar la inclusión de valores negativos para dotar a MIVES de la capacidad de reducir su índice de sostenibilidad. Esta característica podría mejorar considerablemente la forma en que no solo se evalúan los indicadores adversos, sino también los indicadores perjudiciales en MIVES.

2.5. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se han expuesto los principales motivos de necesidad de un sistema de evaluación de priorización de inversiones públicas, mostrando múltiples errores, con un alto coste económico, cometidos por la administración y fácilmente evitables con el sistema propuesto. Después de estudiar el proceso de obtención de fondos para conocer los sistemas intrínsecos de la administración, y las técnicas de evaluación y priorización que esta utiliza, se ha elegido el método MCDM que servirá de núcleo para el SEPIP a desarrollar en esta Tesis. Sin embargo, una vez escogido MIVES como método directriz, mediante una revisión sistemática para evaluar su idoneidad y sus características, se han detectado cinco puntos de mejora que requieren un desarrollo científico sobre este método, mostrados en la Tabla 2.5, para poder generar el sistema deseado.

El primero es la inclusión de múltiples opiniones, permitiendo la participación de diversas partes interesadas para evitar decisiones unilaterales, justas y éticas con la sociedad. El segundo es la consideración de la incertidumbre, ya que los valores exactos de los indicadores pueden ser desconocidos y se deben teorizar posibles valores en el proceso de evaluación, así como la vacilación de los expertos. El tercero es la capacidad del método para utilizar tanto un ranking como un sistema de clasificación, lo cual permite a la administración pública tener cierto margen de maniobra en la toma de decisiones finales. El cuarto es la capacidad de optimizar los recursos disponibles, teniendo en cuenta los presupuestos limitados y buscando obtener el mayor impacto posible. Finalmente, el quinto refiere a que los efectos adversos aplicados a los indicadores también deben ser considerados, especialmente en casos donde las alternativas puedan tener consecuencias negativas significativas.

Tabla 2.5 – Objetivos de mejora sobre el método directriz.

	Definición
Múltiples opiniones	Dotar al método desarrollado de un sistema capaz de considerar múltiples opiniones, de una forma justa, equitativa y objetiva. Este sistema debe ser capaz de considerar distintos niveles de importancia, según el tipo de decisor que se implique.
Incertidumbre	Dotar al método desarrollado de la capacidad de considerar incertidumbre en los datos de entrada de los indicadores, así como en la opinión dada por los decisores sobre la importancia del conjunto de criterios que conforman el problema.
Clasificación de alternativas	Dotar al método desarrollado de un sistema de clasificación de alternativas, para mejorar el margen de la administración en la selección de priorización y mejorar la aceptación política sobre el uso de métodos de priorización.
Optimización de alternativas	Dotar al método desarrollado de un sistema de optimización de alternativas, para poder generar información detallada sobre la combinación óptima de alternativas que permite optimizar el índice MIVES dado un presupuesto cerrado.
Efectos negativos	Dotar al método desarrollado de un sistema de consideración de efectos negativos en los valores de los indicadores, potenciando su impacto en el índice MIVES e instando a los percursores de las alternativas propuestas a aumentar su consideración sobre efectos altamente dañinos.

3. TOMA DE DECISIONES EN GRUPO

3.1. INTRODUCCIÓN

Tal y como se ha comentado en el Capítulo 2, la toma de decisiones en el ámbito de la administración pública implica considerar múltiples criterios y tener en cuenta las opiniones de diversas partes interesadas que, a su vez, pueden tener distinto peso. Por tanto, es fundamental contar con un método efectivo que permita evaluar y comparar alternativas de manera justa y transparente.

Este capítulo presenta una revisión de los métodos de decisión multicriterio en grupo (MCGDM, por sus siglas en inglés), con el objetivo final de determinar si alguno de los métodos existentes cumple con los requisitos necesarios para ser implementado en el SEPIP, o si se requiere desarrollar un nuevo enfoque adaptado a las particularidades y desafíos específicos de este ámbito. Además, se presenta una propuesta de clasificación de métodos MCGDM y se selecciona la tipología más adecuada para ser analizada, llevando a cabo una revisión literaria exhaustiva que permita conocer todas las características de los métodos existentes. Estas características son comparadas con las necesidades del SEPIP, para determinar si los métodos existentes son suficientes para ser implementados, o si se requiere desarrollar un nuevo método MCGDM.

3.1.1. Razón de ser

La toma de decisiones es un concepto clave para llevar a cabo elecciones y priorizaciones en todos los ámbitos. En consecuencia, múltiples expertos han desarrollado métodos estructurados y científicos de toma de decisiones para ser aplicados en lugar de métodos intuitivos, conocidos como métodos MCDM.

Sin embargo, el constante desarrollo científico y el conocimiento cada vez más específico de los expertos, han aumentado la complejidad de los problemas. En la actualidad, un único decisor (DM, por sus siglas en inglés) puede no ser capaz de considerar todos los aspectos relevantes de la toma de decisiones (Z. Yue, 2011a), o puede no contar con toda la información necesaria. En estos casos, es necesario contar con múltiples DMs, generando procesos de toma de decisión en grupo (GDM) o problemas MCGDM si se consideran varios criterios, que este capítulo analiza. Debido a la existencia de múltiples enfoques matemáticos, o puntos de vista de distintas disciplinas, cómo unir, incorporar o considerar sus opiniones para llegar a un consenso entre ellos se ha convertido en un tema de constante discusión entre los expertos (Kerr & Tindale, 2004).

Por ejemplo, algunos modelos de la década de 1950 propusieron la negociación en grupo como solución (Lorge & Solomon, 1955), mientras que otros estudiaron la aplicación de la teoría de elecciones (Black, 1958), lo que llevó al esquema de elección social según los valores individuales (Arrow, 1963), y, en consecuencia, al desarrollo esquema final de la teoría de elección social (J. Davis, 1973). Además de estas propuestas de agregación psicológica, aparecieron métodos matemáticos más avanzados, como los estudios de tendencia central enfocados en encontrar el valor estadístico que mejor se ajusta a todos los DM (Crott et al., 1991; J. H. Davis et al., 1997; Hinsz, 1999) o las clasificaciones individuales de los DMs para agruparlas en una clasificación grupal. Estas técnicas de combinación incluyen distribuciones de probabilidad (Thurstone, 1927b), modelos heurísticos de Borda y sus extensiones (Aslam & Montague, 2001; Emerson, 2007) u optimización estocástica (Dwork et al., 2001; Kemeny, 1959; S. Lin & Ding, 2009).

Por otro lado, algunos investigadores afirman que es imposible tener un grupo de expertos homogéneo cuyas experiencias, actitudes y conocimientos sean iguales o similares (Koksalmis & Kabak, 2019). En estos casos, considerar la equidad entre las opiniones de los DMs podría llevar a sesgos o resultados distorsionados. En consecuencia, algunos métodos se centraron en derivar pesos para asignar diferentes importancias a las distintas partes interesadas.

Para estos métodos, se han propuesto algunos esquemas de división y clasificación. Por ejemplo, se pueden agrupar en dos grupos: técnicas subjetivas y objetivas. En las técnicas subjetivas, hay un supervisor o gerente que asigna directamente diferentes pesos a cada experto, o los propios expertos se evalúan directamente a sí mismos. En las técnicas objetivas, se utilizan enfoques matemáticos para esta asignación, como las distancias entre las opiniones o la consistencia entre otras. Otro esquema propuesto se centra en la clasificación de los métodos objetivos (Koksalmis & Kabak, 2019). Este esquema divide los métodos según la similitud de los enfoques, enfoques basados en índices, enfoques basados en agrupamiento y enfoques integrados.

Sin embargo, a lo largo de la recopilación de información de este capítulo, se han destacado algunos puntos en estos esquemas de clasificación que requieren atención. En primer lugar, algunos esquemas son demasiado generales, ya que los métodos recientemente propuestos están ampliando la gama de algoritmos, lo que puede llevar a una baja precisión en la clasificación. En segundo lugar, algunos esquemas se centran en métodos objetivos con categorías que pueden ser fácilmente malinterpretadas por lectores inexpertos. No es raro que autores novatos, que desconocen estas clasificaciones, utilicen palabras como "similitud" para referirse a otros grupos.

Por ello, los objetivos de este capítulo son los siguientes: (i) Proporcionar un nuevo esquema de clasificación general de técnicas GDM. (ii) Seleccionar el tipo de método más apropiado para el SEPIP, llevando a cabo una revisión literaria exhaustiva para conocer el estado del arte y sus características. (iii) Comparar estas características con las necesidades del SEPIP, para determinar si los métodos existentes son suficientes para ser implementados.

3.2. CLASIFICACIÓN DE MÉTODOS GDM

Hasta la fecha se han propuesto varios esquemas de clasificación. Por ejemplo, uno de los más antiguos divide los métodos en orientados al proceso o al contenido (Bui & Jarke, 1984), dónde los enfoques orientados al proceso son métodos destinados a generar nuevas ideas para comprender y estructurar el problema y los enfoques orientados al contenido trabajan con las opiniones presentadas para agregarlas. Este esquema fue posteriormente mejorado con una segunda capa orientada al contenido (Kabak & Ervural, 2017) que se muestra en la Figura 3.1, la cual divide al grupo en enfoques de evaluación de múltiples atributos implícitos, evaluación de múltiples atributos explícitos y enfoques de teoría de juegos.

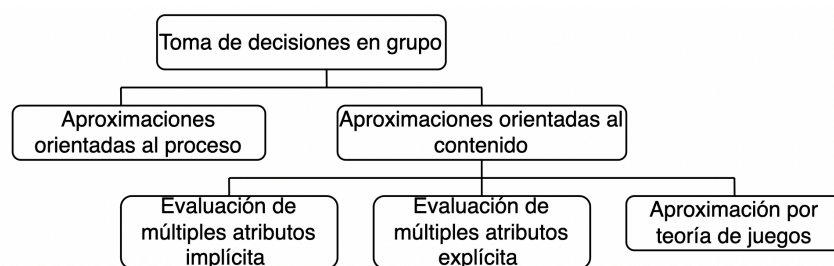


Figura 3.1 – Clasificación de Kabak y Ervural. Fuente: Kabak & Ervural (2017).

La evaluación implícita de múltiples atributos se refiere a metodologías estrechamente relacionadas con técnicas de teoría social. Los criterios, indicadores o requisitos utilizados para la selección no son declarados explícitamente por los DMs. Por otro lado, la evaluación explícita de múltiples atributos muestra claramente los criterios y preferencias de cada DM, como por ejemplo los métodos de MCDM y sus extensiones. Finalmente, los enfoques de teoría de juegos son métodos que siguen la teoría de juegos tradicional, según sus dos enfoques: cooperativos y no cooperativos. En los procesos de GDM, estos métodos estudian principalmente las coaliciones entre los DM.

Más adelante, el amplio desarrollo de métodos de evaluación explícita de múltiples atributos hizo necesaria una actualización del grupo, pues múltiples técnicas muy diferentes entre sí no quedaban bien definidas. Se creó un nuevo grupo llamado métodos objetivos para derivar los pesos de los DMs en GDM como parte de los métodos de evaluación explícita de múltiples atributos (Koksalmis & Kabak, 2019). Como se muestra en la Figura 3.2, este grupo está formado por enfoques basados en similitud, enfoques basados en índices, enfoques basados en agrupamiento, enfoques integrados y otros enfoques.

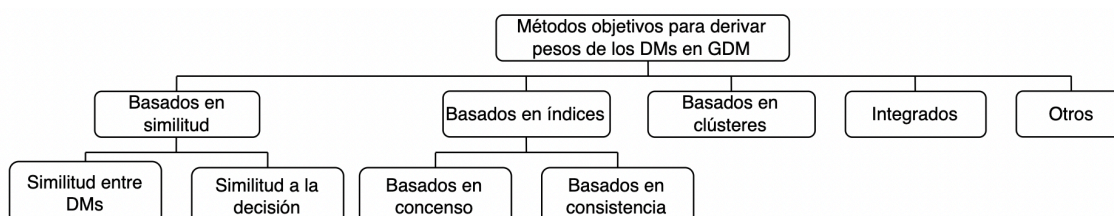


Figura 3.2 – Clasificación de Koksalmis y Kabak. Fuente: Koksalmis & Kabak (2019).

En este esquema, los enfoques basados en similitud utilizan la distancia para ponderar a los DM. Esta distancia puede surgir de las evaluaciones de los DM o de un punto fijo generalmente llamado solución ideal. Comúnmente, cuando un DM tiene una evaluación centrada en el grupo, gana importancia.

Los enfoques basados en índices se dividen en enfoques de consenso o de consistencia. El primer grupo genera un índice con respecto al concepto de "consenso suave" (Herrera et al., 1996), que tiene como objetivo mejorar el consenso entre los DM permitiendo discusiones o cambios. El segundo grupo utiliza la consistencia de las evaluaciones de los DM para ponderarlos. Cuanto más consistente sea un DM, más peso recibirá.

Los enfoques basados en clústeres o agrupamientos se utilizan comúnmente con grupos grandes de DM. Estos métodos generalmente dividen el proceso en dos capas: La primera capa consiste en una división de expertos por grupo, que recibe un peso inicial. La segunda capa asigna un peso individual al experto dentro del grupo. La importancia del DM final se deriva de la agregación de ambos pesos. Sin embargo, estas capas utilizan métodos de ponderación diferentes (por ejemplo, tamaño del grupo para la primera capa y similitud entre los expertos para la segunda capa) que provienen de otros enfoques.

Por último, los enfoques integrados se generan mediante la agregación de dos o más métodos presentados previamente, y otros enfoques se refieren a aquellos que no pertenecen a ninguna de las categorías proporcionadas.

Estos esquemas de clasificación presentan algunas limitaciones y debilidades inherentes, por lo que debe proponerse un nuevo esquema de división. Por ejemplo, el esquema mostrado en la Figura 3.1 tiene un enfoque demasiado general en cuanto al gran número de metodologías propuestas. En GDM, se han desarrollado técnicas de múltiples campos (psicología, economía o política), lo que exige una clasificación más precisa.

La división subjetiva u objetiva tiene limitaciones similares. El esquema mostrado en la Figura 3.2 solo considera métodos objetivos y proporciona agrupaciones que pueden ser fácilmente malinterpretadas por lectores inexpertos. Como ejemplo, el consenso suave puede ser fácilmente malinterpretado como similitud debido a una de las pocas diferencias en cómo evolucionan los pesos. Además, los enfoques basados en agrupamiento se generan principalmente mediante la combinación de otras metodologías, al igual que los enfoques integrados.

3.2.1. Propuesta de clasificación de métodos GDM

Para abordar las limitaciones mencionadas anteriormente, se han analizado múltiples enfoques y técnicas GDM para generar el esquema de clasificación de métodos de GDM mostrado en la Figura 3.3, que abarca todas las metodologías GDM. En esta clasificación se ha desarrollado mucho más detalladamente la clasificación de métodos de ponderación de los DM, pues este ha sido la tipología de técnica escogida para aplicar en el SEPIP. Esta decisión se ha llevado a cabo por múltiples motivos.

El primero, es la concordancia con la opinión de otros investigadores, que exponen la necesidad de considerar a los decisores de un problema con distintos pesos, ya sea por experiencias, conocimientos o rangos (Koksalmis & Kabak, 2019). El segundo, que se considera que los métodos de negociación pueden ser más subjetivos y pueden estar influenciados por intereses particulares, lo que podría comprometer la imparcialidad en la toma de decisiones al existir partes con mayor influencia o poder. El tercero, es que los métodos que utilizan operadores de agregación pueden ocultar información importante al combinar las opiniones de los expertos, lo que podría dar lugar a decisiones sesgadas o poco informadas. El último, es que los métodos basados en rankings pueden no capturar la complejidad de las decisiones multidimensionales en la administración pública, ya que pueden no considerar la importancia relativa conjunta de los criterios.

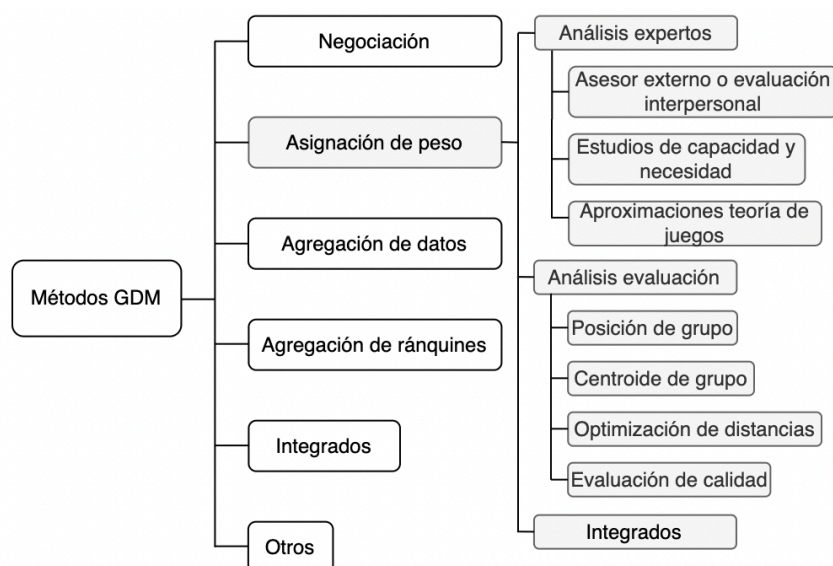


Figura 3.3 – Clasificación de métodos GDM propuesta, con el grupo de asignación de peso desarrollado.

Los métodos de negociación contienen técnicas basadas en compartir ideas con su correspondiente discusión y debate, para llegar a una solución acordada. No es necesario indicar los criterios de selección ni el proceso por el cual se eligen las alternativas. Ejemplos claros son el método DELPHI y sus extensiones (Greatorex & Dexter, 2000; Okoli & Pawlowski, 2004), el "abogado del diablo" (Schwenk R. & Cosier, 1993) o el método Ward (Schielke et al., 2009). Estos métodos pueden ser utilizados para estudiar cómo evoluciona la toma de decisiones en una negociación y proponer diferentes pautas de acción.

El objetivo principal de los modelos de asignación de pesos es definir la importancia de cada DM. Esta categoría, desarrollada más detalladamente como objetivo de esta Tesis, se divide en si el análisis se realiza en los expertos, en la evaluación que realizan o si se integran ambos métodos.

En los métodos de análisis de expertos, las características de los expertos, las interrelaciones, las capacidades o los índices de poder de coalición son la base para el proceso de ponderación:

- La primera subdivisión contiene técnicas de evaluación interpersonal o de evaluación externa (EAIA, por sus siglas en inglés). En estos procesos, hay un evaluador externo (o gestor) que asigna directamente pesos a un panel de expertos. Además, algunas técnicas proponen un método de evaluación interpersonal en el cual los DMs se ponderan entre sí. Comúnmente, estas prácticas han sido conocidas como métodos subjetivos.
- La segunda subdivisión se centra en el estudio de las capacidades de los DM o las necesidades que presentan para el problema (CNA, por sus siglas en inglés). En estas técnicas, generalmente se toma una característica común para comparar a los DM. La experiencia y el conocimiento, su título universitario o el conocimiento relacionado con el campo del problema son algunos ejemplos.
- La tercera y última subdivisión está relacionada con los enfoques de teoría de juegos (GT, por sus siglas en inglés). Estos métodos se utilizan comúnmente cuando se debe considerar una influencia previa, y estudian la capacidad de los DM para formar coaliciones o ser el principal promotor de una decisión.

Por otro lado, los métodos de análisis de evaluación solo estudian la opinión, la evaluación o la posición que cada DM ha tomado en el problema. Aunque existen trabajos simples basados en la distancia entre las opiniones y un valor estadístico conocido (Crott et al., 1991; J. H. Davis et al., 1997; Hinsz, 1999), las metodologías se han desarrollado para considerar la multiplicidad de criterios. Este desarrollo ha llevado a una amplia gama de metodologías y consideraciones de las siguientes tipologías:

- Los métodos de posición grupal (GrP, por sus siglas en inglés) ponderan a los DMs en función de las distancias de evaluación dentro del grupo. El

objetivo principal es reducir la distancia mediante la modificación de los pesos de opinión para obtener la posición más cercana entre ellos.

- Las metodologías de centroide grupal (GC, por sus siglas en inglés) consideran la existencia de una "solución ideal", un valor real o virtual que representa la evaluación deseada del grupo. Este valor se denomina centroide del grupo. Los DMs se ponderan en función de la distancia entre su evaluación y este centroide.
- Las técnicas de optimización (O) generalmente se basan en acciones sobre los dos primeros métodos. Mediante algoritmos de programación o el uso de retroalimentación, se lleva a cabo un proceso iterativo con el objetivo de minimizar las distancias. Cabe mencionar que muchos de estos métodos presentan el objetivo en un índice de consenso que se maximiza, calculado como la inversa de la distancia entre puntos.
- Las técnicas de evaluación de calidad (QA, por sus siglas en inglés) ponderan a los DM en función de la calidad de sus opiniones, generalmente en comparación dentro del grupo. Esta calidad se estima mediante valores matemáticos de entropía, certeza o consistencia, entre otros.

Los métodos de agregación de datos analizan las evaluaciones realizadas por los DMs para poder sumarlas directamente utilizando operadores. Estos operadores pueden estar estrechamente relacionados con GrP, EQ y GC del grupo anterior; sin embargo, sus procedimientos no contemplan asignar un peso explícito a los DMs. Por lo tanto, en muchos casos hay el mismo tipo de estudios en el cálculo de la entropía, certeza y consistencia, que podrían considerarse EQ si se relacionan abiertamente estos pesos con los expertos. Lo mismo ocurre con los operadores de distancia a la media, que son extremadamente similares a GC, pero sin asignar peso a los expertos.

Aunque estos operadores pueden ser tan simples como la agregación directa o los resultados derivados del AHP (Srdjevic et al., 2013), también se han desarrollado operadores para datos de incertidumbre o lingüísticos (Xu, 2005a; Yager, 1991), que han ganado importancia al incluirlos en el campo de MCGDM. Algunos autores los utilizan como el vínculo principal para obtener los datos de entrada para el TOPSIS (Akram et al., 2019; Garg & Kaur, 2020; Vahdani et al., 2011), y otros para el método "Tomada de Decisão Interativa e Multicritério" o TODIM (Zindani et al., 2020). Entre otros, existen operadores que utilizan la teoría de la evidencia de Dempster-Shafer (DST), en la cual la evaluación de cada experto se trata como evidencia (Wu et al., 2019).

Los métodos de agregación de ránquines se pueden subdividir según su base teórica. En un primer grupo, existen técnicas de distribución de ordenamiento de conjuntos que siguen la escala de Thurstone y la ley de juicio comparativo (Thurstone, 1927a) o comparaciones binarias (Thurstone, 1927b). Los métodos heurísticos pueden ubicarse en un segundo grupo, que, en lugar de buscar la optimización, se centran en obtener una solución mediante aproximaciones matemáticas simples e intuitivas. Por ejemplo, esta división incluye métodos de Borda y sus extensiones (Aslam & Montague, 2001), así como estudios de elecciones gubernamentales (Emerson, 2007) o cadenas de

Márkov (Deconde et al., 2006; Dwork et al., 2001). Finalmente, se puede generar un tercer grupo de métodos de optimización estocástica. Estas técnicas sintetizan los escenarios dados por todos los DM en función de los criterios de optimización de distancia. El ranking final ideal se obtiene generalmente mediante la minimización de la distancia de Kendall o Spearman que existe entre cada enfoque iterativo y los rankings de los DM. Algunos trabajos destacados en este campo han sido aproximaciones probabilísticas utilizando modelos de Monte Carlo (Lin & Ding, 2009), aproximaciones máxima probabilidad bayesiana (Guiver & Snelson, 2009) o inclusión de incertidumbre debido a la falta de confiabilidad en clasificaciones incompletas (Niu et al., 2013).

Los dos grupos finales son métodos integrados y otros métodos. Los métodos integrados se generan mediante la agregación de dos o más métodos previamente presentados, y otros enfoques se refieren a cualquier método que no pertenezca a ninguna categoría mencionada.

Es importante destacar la clasificación asignada para los métodos de grupos grandes que utilizan sistemas de agrupamiento. Comúnmente, estos métodos utilizan una doble capa de ponderación. La primera generalmente asigna un peso en función del tamaño del grupo. La segunda utiliza uno de los métodos presentados anteriormente. Por lo tanto, los métodos de grupos grandes con sistemas de agrupamiento se clasifican según el uso de la segunda capa, o la técnica más apropiada.

3.3. REVISIÓN LITERARIA: MÉTODOS DE ASIGNACIÓN DE PESO

Una vez presentada la propuesta de clasificación de métodos GDM, se procede a llevar a cabo una revisión literaria exhaustiva de la tipología de técnicas seleccionada. De nuevo, se utiliza la estructura de cinco partes para una revisión sistemática (Cooper, 1998): (i) formulación del problema, (ii) determinación de la estrategia de recopilación de datos, (iii) evaluación de los datos recuperados, (iv) análisis e interpretación de la literatura y, finalmente, (v) presentación de las conclusiones.

La pregunta principal formulada en esta revisión ha sido (i): ¿Qué métodos y técnicas se han propuesto para agregar opiniones y evaluaciones en el entorno de GDM? Para recopilar los datos, se utilizó la estrategia (ii) que se muestra en las siguientes subsecciones y está formada por la recopilación de datos y un proceso de clasificación de resultados.

3.3.1. Metodología de recopilación de datos

Los artículos se identificaron mediante WoS, por su acceso a artículos de más de 12,000 revistas en todo el mundo (Reuters, 2017). Una de las principales justificaciones para utilizar esta base de datos fue la profundidad de su cobertura, que proporciona más resultados que cualquier otra colección de bases de datos, siguiendo con la línea de la revisión literaria llevada a cabo en el Capítulo 2.

Una vez que se determinó la base de datos, se utilizaron dos métodos de investigación diferentes, como se muestra en la Figura 3.4. El primero se centra en 5 títulos y temas generales relacionados con GDM, y los resultados obtenidos se

restringieron por un mínimo de 1 cita ($c \geq 1$) debido a la naturaleza general de la búsqueda. El segundo método se centra en una búsqueda específica de temas relacionados con la ponderación de los DMs, y no se aplicó ninguna restricción mínima de citas a los resultados.

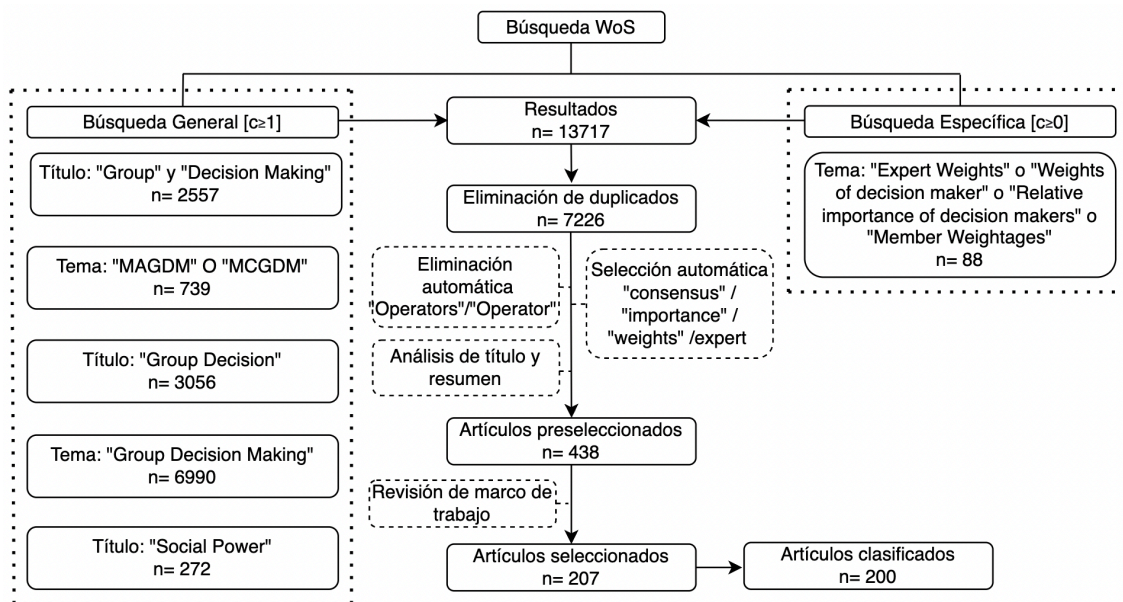


Figura 3.4 – Proceso de revisión literaria.

Se obtuvieron 13,717 artículos a través del método de investigación bibliográfica. Estos se filtraron posteriormente para obtener el conjunto final de artículos en los que se realizaría el análisis cualitativo y cuantitativo. El proceso de filtrado se llevó a cabo de la siguiente manera: (i) descartar artículos duplicados, (ii) eliminación automática de artículos si el título incluye las palabras "operadores" y "operador", pues comúnmente los métodos de operadores utilizan una agregación directa sin asignar pesos a los DMs, (iii) selección automática de artículos si el título incluye "consenso", "importancia", "pesos" o "expertos", (iv) análisis del título y el resumen para detectar posibles resultados, (v) análisis del marco de trabajo para identificar las técnicas de ponderación de los DMs.

Como resultado de este proceso, se seleccionó un conjunto final de 207 referencias para su posterior análisis e interpretación. Entre ellas, se identificaron y clasificaron 200 metodologías diferentes utilizando el esquema de clasificación propuesto anteriormente. Los resultados restantes se refieren a métodos ya clasificados.

Cabe destacar que la categorización de los artículos se basó únicamente en el proceso de ponderación de los DMs presentado. Dado que múltiples referencias contienen métodos aplicados de MCDM, hay innumerables variables externas, como la asignación de pesos a los criterios o atributos, que no se encuentran dentro del alcance del estudio.

3.3.2. Sistema de clasificación

Para ayudar a los investigadores y expertos a ampliar sus conocimientos sobre los métodos de ponderación de los DM en los procesos de toma de decisiones, se proporcionan tablas de catalogación de los métodos analizados. Estas tablas contienen el nombre de la referencia, el año de publicación y cinco características principales que se han identificado como elementos distintivos de las distintas técnicas:

La primera característica refiere a la tipología de los datos de entrada a cada metodología. En la Tabla 3.1 se muestran los acrónimos de estos datos y su definición en inglés, dado que es el idioma general utilizado en los estudios. Además, dado que muchos autores utilizan terminología como "valores", "números" o "conjuntos" para referirse a la misma fuente, se utilizó el sufijo "información" para subdividirlos.

La segunda característica expone en qué momento se asignan los pesos a los DMs en el proceso de toma de decisiones grupal. Los métodos de la fase 0 solo requieren conocimiento sobre los expertos y/o criterios involucrados en el proceso. Estos métodos no analizan la solución de consenso como tal, sino la información previa. Los métodos de la fase 1 se centran en las opiniones y evaluaciones de los DMs. Por último, los métodos de la fase 2 requieren explícitamente el conocimiento de las alternativas. Estas técnicas utilizan matrices de preferencia, ordenamiento de alternativas o clasificaciones finales para el análisis.

La tercera propiedad está relacionada con la variación en el peso asignado a los DMs. Los métodos se clasifican en función de si el peso se asigna de manera estática (invariable) o dinámica (iterativa), cambiando a lo largo del proceso. Si el proceso de ponderación es iterativo, la cuarta propiedad determina qué tipo de convergencia marca el final de la iteración. Generalmente, los procesos iterativos están relacionados con métodos dinámicos, pero en algunos casos individuales, el proceso es iterativo, pero la asignación de peso es estática. Se muestran diferentes tipos de convergencia y sus acrónimos (en inglés) en la Tabla 3.2.

Las convergencias DSE son determinadas por un experto externo o por el propio grupo. En múltiples análisis, el experto externo se considera un moderador en lugar de asignar pesos a los DMs. Las convergencias GP se refieren a los sistemas de programación de objetivos comunes utilizados por los métodos de optimización.

Estas técnicas de ponderación suelen estar vinculadas a la minimización de la distancia o desviación (GP-DO), la maximización de un índice de consenso (GP-IC) o la maximización de un índice de consistencia (GP-Csl). En otros casos, existen métodos de sistema múltiple que utilizan la minimización de la entropía con la maximización de la consistencia (GP-ECsl), o la minimización de la entropía y la distancia (GP-EDO).

Tabla 3.1 – Acrónimos y definiciones de los tipos de datos de entrada.

Grupo	Acrónimo	Definición
General	CI	Crisp Information
	ZI	Z-information
	II	Interval information
	InMI	Interval multiplicative information
	IMI	Intuitionistic multiplicative information
Difuso	FI	Fuzzy information
	GFSI	Generalized fuzzy soft information
	SFI	Spherical fuzzy information
	IFI	Intuitionistic Fuzzy information
	OFI	Ordered Fuzzy Information
	IIFI	Interval intuitionistic fuzzy information
	TFI	Triangular fuzzy information
	TIFI	Triangular intuitionistic fuzzy information
	TMI	Triangular multiplicative information
	TrFI	Trapezoidal fuzzy information
	TrIFI	Trapezoidal intuitionistic fuzzy information
	IITrFI	Interval intuitionistic trapezoidal fuzzy information
	TrCFI	Trapezoidal cubic fuzzy information
	HFI	Hesitant fuzzy information
	DHFI	Dual hesitant fuzzy information
	IHFI	Interval hesitant fuzzy information
	NWHFI	Normal wiggly hesitant fuzzy information
	P-HFI	Probabilistic hesitant fuzzy information
	PHFLI	Proportional hesitant fuzzy linguistic information
	DHHFLI	Double hierarchy hesitant fuzzy linguistic information
	PFI	Pythagorean fuzzy information
	PiFI	Picture fuzzy information
	q-ROFI	q-rung orthopair fuzzy information
	SNI	Single neutrosophic information
	INI	Interval neutrosophic information
	SLNI	Single linguistic neutrosophic information
P-MNI	Probability multi neutrosophic information	
Lingüístico	LI	Linguistic information
	LHI	Linguistic hesitant information
	2TLI	2-tuple linguistic information
	I2TLI	Interval 2-tuple linguistic information
	I1ULI	Interval intuitionistic uncertain linguistic information
	MGLI	Multi-granularity linguistic information
	P-LI	Probabilistic linguistic information

Es importante destacar que múltiples autores utilizan la misma terminología con diferentes propósitos. Los índices de consenso generalmente se entienden como distancias entre las evaluaciones de los DM, pero también entre ellos y la solución ideal. Por lo tanto, los métodos que consideran el índice de consenso, como una distancia entre los DMs, estarán contenidos en GP-DO. Los métodos que consideran este índice como la distancia a la solución ideal se presentarán como GP-IC.

Tabla 3.2 – Acrónimos y definiciones de los tipos de convergencia.

Acrónimo	Convergencia
DSE	Decisión de los expertos
GP-DO	Optimización de distancias
GP-EDO	Optimización de distancias de entropía
GP-IC	Optimización del índice de consenso
GP-CsI	Optimización del índice de consistencia
GP-ECsI	Optimización del índice de entropía y consistencia

Finalmente, la última característica es la consideración de la solución ideal u objetivo. Por lo general, esta solución se considera la media del grupo, ya sea aritmética o geométrica. Sin embargo, algunos artículos utilizan aproximaciones generales de incertidumbre (RA, por sus siglas en inglés), la teoría del punto fijo (FPT, por sus siglas en inglés) o el punto de Fermat-Torricelli (FT, por sus siglas en inglés) para detectar puntos de consenso óptimos o centroides de grupo, entre otros.

3.3.3. Resultados y su clasificación

Esta subsección presenta y clasifica los métodos obtenidos y corresponde a la tercera etapa de Cooper (1989). Los siguientes apartados coinciden con los métodos de ponderación de los DM según el esquema de clasificación propuesto anteriormente, por lo que los métodos se clasifican directamente según su grupo correspondiente.

Además, se proporcionan las tablas de catalogación previamente mencionadas al final de cada apartado de la subsección.

Asesor externo o evaluación interpersonal (EAIA)

En los métodos de evaluación del asesor externo, Keeney y Kirkwood (Keeney & Kirkwood, 1974) proponen el uso de una función de bienestar social aditiva ponderada con las opiniones de todos los DMs para ayudar al asesor con la asignación de pesos. Esta idea fue posteriormente desarrollada por Kelemenis et al. (Kelemenis et al., 2011) para permitir múltiples criterios. En ese caso, el asesor puede dar un peso diferente a cada DM en cada uno de los criterios.

Enfoques similares de ponderación directa, en los cuales el asesor externo evalúa directamente a los DMs, son propuestos por Palomares y Martínez (Palomares & Martínez, 2014) y Tabatabaei et al. (2019), que denominan al asesor externo como gerente o moderador. Hafezalkotob y Hafezalkotob (2017) recomiendan que este gerente asigne pesos en función del talento, la experiencia y el conocimiento de los DMs, como en una metodología de CNA. Wang et al. (2019) presentan un método de agrupación en el cual se asigna una segunda capa por parte del asesor externo.

Otros autores han desarrollado herramientas para facilitar el trabajo del asesor. Por ejemplo, Wu et al. (2019) desarrollan un sistema de programación lineal para decidir el peso de los DM basado en una comparación. Otros autores utilizan el método AHP en situaciones de incertidumbre para asignar pesos en la selección de personal (Aly & Vrana, 2008; Samanlioglu et al., 2018) o proponen que el líder del proyecto utilice el método del

mejor-peor (BWM, por sus siglas en inglés) entre los DM (Chen et al., 2022). Gupta et al. (2019) proponen un sistema de votación para un panel de gerentes que pondera un panel de DMs en base a información difusa intuicionista. Yang et al. (2020) trasladan este proceso de votación a un sistema de comparación por pares peor-mejor para un único asesor externo. Por último, Sun y Huang (2013) proponen una herramienta de ajuste de correlación gris que se aplica una vez que el asesor ha decidido el peso. Su objetivo principal es minimizar los efectos negativos que esto pueda tener en los objetivos de cada experto.

En cuanto a los métodos de evaluación interpersonal, Bodily (1979) presenta un modelo de compromiso utilizando cadenas de Márkov. Este enfoque se basa en cómo los expertos delegan el poder a funciones de utilidad externas hasta llegar a una conclusión válida para todo el equipo. Sin embargo, los métodos de puntuación de los expertos son más comunes que los enfoques de delegación.

Ramanathan y Ganesh (1994) utilizan el AHP original para permitir que los DMs se evalúen mutuamente en función de los contextos del problema. Van der Honert (2001) utiliza el AHP multiplicativo (MHP, por sus siglas en inglés) y técnicas SMART para desarrollar REMEMBRANT, una herramienta de evaluación interpersonal. Otros modelos consideran esa puntuación como un grado directo de confianza entre expertos (Chen et al., 2018; Wu et al., 2015). Liu et al. (2019) utilizan esa asignación de grado de confianza con un índice de autoconfianza para permitir una autoevaluación para cada experto. Sin embargo, este nivel de confianza entre los DMs se puede analizar a través de teorías de grafos sociales. Tian et al. (2019) ponderan los DMs en función de la centralidad y las conexiones de la opinión de cada DM, considerando la cercanía como confianza.

Finalmente, algunos métodos de EAIA introducen un sistema de retroalimentación. Dong et al. (2016) proponen una evaluación interpersonal multi-criterio relacionada con habilidades profesionales, cooperación o equidad, entre otros. Si no se alcanza el nivel de consenso, se requiere retroalimentación a los DM para que puedan modificar sus opiniones.

Tabla 3.3 – Tabla de catalogación de métodos EAIA.

Autor	Año	Datos	Fase	Peso	Convergencia	Consenso
Keeney and Kirkwood	1974	CI	Fase 0	Estático	-	-
Kelemenis et al.	2011	CI	Fase 0	Estático	-	-
Palomares et al.	2014	CI	Fase 0	Estático	-	-
Tabatabaei et al.	2019	CI	Fase 0	Estático	-	-
Hafezalkotob and Hafezalkotob	2017	TFI	Fase 0	Estático	-	-
Wang et al.	2019	LI	Fase 0	Estático	-	-
Wu Qun et al.	2019	2TLI	Fase 0	Estático	-	-
Aly and Vrana	2008	TFI	Fase 0	Estático	-	-
Samanlioglu et al.	2018	TFI	Fase 0	Estático	-	-
Ze-hui Chen	2022	IITrFI	Fase 0	Estático	-	-
Gupta et al.	2019	IFI/IIFI	Fase 0	Estático	-	-
Yang et al.	2020	NWHFI	Fase 0	Estático	-	-
Sun and Huang	2013	CI	Fase 1	Estático	-	-
Bodily	1979	CI	Fase 1	Dinámico	DSE	-

Ramanathan and Ganesh	1994	CI	Fase 0	Estático	-	-
Van der Honert	2001	CI	Fase 0	Estático	-	-
Chen et al.	2018	LI	Fase 0	Estático	-	-
Wu Jian et al.	2015	TFI	Fase 0	Estático	-	-
Liu et al.	2019	2TLI	Fase 2	Estático	-	-
Tian et al.	2019	12TLI	Fase 0	Estático	-	-
Dong et al.	2016	CI	Fase 0	Dinámico	GP-IC	-

Estudios de capacidad y necesidad (CNA)

El único estudio que considera las evaluaciones como necesidades es el enfoque de Brock (1980). Este autor adopta un enfoque de teoría de Nash para utilizar los límites y fronteras de Pareto para asignar un peso justo a cada DM.

Por otro lado, muchos estudios han utilizado el análisis de las capacidades de los expertos para asignar importancia dentro del grupo. Herowati et al. (2014, 2017) proponen un análisis de discriminación y consistencia de los DMs a través de evaluaciones repetitivas. La discriminación también es estudiada por Cheng et al. (2018), quienes analizan las respuestas incompletas de los DMs para asignarles un grado de experiencia según sus matrices de preferencia. Chakhar et al. (2016) utilizan la capacidad de precisión de los DMs al compararla con los grupos preordenados de preferencia del equipo. Chunhua et al. (2020) asignan el peso considerando la experiencia y el conocimiento de los DMs en cuanto a alternativas como función, fabricación, medio ambiente, economía y sociedad.

Esta experiencia se ha aplicado ampliamente en estudios de capacidades. Ivlev et al. (2015) presentan una función multiatributo que considera los años de experiencia y la educación de cada DM. Liu et al. (2019) continúan en esta línea calificando a los DMs según su calificación profesional y experiencia laboral. Borissova (2018) utiliza una función similar que considera la experiencia y el nivel de competencia en el contexto del problema. Elbarkouky y Fayek (2011) envían a cada DM un formulario que considera sus años y diversidad de experiencia laboral, posición y tiempo en la empresa, además de entusiasmo y disposición para participar, que son utilizados para ponderar a los DMs por comparación. Sellak et al. (2019) proponen un grado de experiencia que comprende la vacilación en la evaluación y los intereses y preferencias de los DMs presentados en las matrices de preferencia. Bai et al. (2017) desarrollan un algoritmo de texto de base de datos en línea para definir la capacidad y experiencia de los DMs en función de sus perfiles en internet, literatura y logros científicos.

Otros enfoques se basan en el sesgo personal, la autoconfianza y los roles. Por ejemplo, Chatterjee y Bhattacharyya (2017) proponen un índice de enfoque de DM probabilístico basado en tres factores: capacidad de precisión respecto a la opinión mayoritaria, sesgos subjetivos mostrados y la dificultad del problema a resolver. Slevin et al. (1998) proponen un formulario para indicar la autoconfianza de cada DM en sus respectivas evaluaciones. Finalmente, Liao et al. (2020) desarrollan un estudio de roles para un gran grupo de expertos. Una vez divididos en grupos, si un DM tiene características diferentes a la mayoría, obtiene más peso para equilibrar la decisión desde diferentes puntos de vista.

Tabla 3.4 – Tabla de catalogación de métodos CNA.

Autor	Año	Datos	Fase	Peso	Convergencia	Consenso
Brock	1980	CI	Fase 1	Estático	-	-
Herowati et al.	2014	CI	Fase 2	Dinámico	DSE	-
Cheng et al.	2018	LI	Fase 2	Estático	-	-
Chakhar et al.	2016	CI	Fase 2	Estático	-	-
Chunhua et al.	2020	IFI	Fase 0	Estático	-	-
Ivlev et al.	2015	CI	Fase 0	Estático	-	-
Liu et al.	2019	LI	Fase 0	Estático	-	-
Borissova	2018	CI	Fase 0	Estático	-	-
Elbarkouky and Fayek	2011	FI	Fase 0	Estático	-	-
Sellak et al.	2019	HFI	Fase 2	Estático	-	-
Bai et al.	2017	CI	Fase 0	Estático	-	-
Chatterjee and Bhattacharyya	2017	CI	Fase 2	Estático	-	Mayoría
Slevin et al.	1998	LI	Fase 1	Estático	-	-
Liao et al.	2020	CI	Fase 2	Estático	-	Mayoría

Aproximaciones de la teoría de juegos (GT)

Los métodos de teoría de juegos parten de una influencia previamente dada para analizar el poder de los participantes en una decisión (von Neumann & Morgenstern, 1944). Ese índice de poder (PI, por sus siglas en inglés), entendido como peso en este estudio, se considera la capacidad de un DM para ser un promotor de decisiones mediante la capacidad de formar coaliciones. Los métodos de teoría de juegos generalmente se dividen en cooperativos o no cooperativos, completos o incompletos, según el intercambio y el tipo de información. Sin embargo, la principal característica en este estudio es cómo se calculan los PIs. Por lo tanto, la principal diferencia entre los métodos está relacionada con la consideración de las coaliciones ganadoras.

Shapley y Shubik (1954) demuestran que todas las coaliciones son posibles, y el PI se calcula en función de la cantidad de veces que un DM genera una coalición ganadora, conocida como punto de pivote. En cambio, Banzhaf (1965) establece que solo se deben considerar las coaliciones ganadoras y se deben estudiar los DMs críticos. Los DMs se consideran críticos cuando una modificación de sus votos hace que la coalición pierda su condición de ganadora. Por su parte, Deegan y Packel (1978) introducen las coaliciones mínimas ganadoras, que no contienen DMs innecesarios. Finalmente, Felsenthal (2016) modifica las coaliciones mínimas ganadoras por las coaliciones ganadoras de tamaño mínimo, ya que un DM ganador busca tratar con el menor número posible de participantes en su coalición.

Tabla 3.5 – Tabla de catalogación de métodos GT.

Autor	Año	Datos	Fase	Peso	Convergencia	Consenso
Shapley and Shubik	1954	CI	Fase 0	Estático	-	-
Banzhaf	1965	CI	Fase 0	Estático	-	-
Deegan and Packel	1978	CI	Fase 0	Estático	-	-
Felsenthal	2016	CI	Fase 0	Estático	-	-

Posición de grupo (GrP)

La posición entre las evaluaciones puede considerarse un efecto de consenso negativo, alegando va en contra del acuerdo la que se intenta llegar con los métodos GDM. Por ejemplo, algunos estudios reducen el peso de los DMs si sus evaluaciones están más alejadas de las demás (Wan et al., 2021), llamándolo ineficacia debido a errores de pensamiento (Theil, 1963). Por el contrario, Xu y Zhou (2017) utilizan el método de desviación máxima para reducir el peso de los DMs. Estos autores consideran que las evaluaciones similares (más cercanas) son ineficaces para diferenciar las alternativas.

Sin embargo, las distancias de evaluación generalmente se consideran una característica positiva como la compatibilidad (Zeng et al., 2016) o la correlación (Thong et al., 2020). Desde estas perspectivas, los DMs más cercanos reciben el mayor peso. Para manejar distancias inciertas, Wu et al. (2019) proponen el uso de una distribución de probabilidad con distancia geodésica para aproximar la distancia de Manhattan. Lu et al. (2008) incorporan la teoría de DST, en la cual las evaluaciones se consideran evidencia, en una función de probabilidad. Wang et al. (2019) utilizan la misma teoría en SLNI. Otros autores (Gupta et al., 2016; Wan et al., 2013) han utilizado un procedimiento similar de DST con enfoques bayesianos (Voorbraak, 1989). Esta última técnica se ha modificado para el uso de TrCFI (Fahmi et al., 2019) o DHHFLI y q-ROFI (Krishankumar et al., 2020a; Krishankumar et al., 2020b).

Otros métodos GrP consideran la distancia entre las evaluaciones como la similitud (Meng et al., 2020; Wang & Mao, 2019; Zhang & Wang, 2017), la facilidad de transición de opiniones entre DMs (Wan et al., 2018; Xu et al., 2019), el índice de grado de consenso (Wan et al., 2022) o la cantidad de apoyo recibido (Liu et al., 2019; Wan et al., 2021). Zang et al. (2020) utilizan las distancias de la matriz de preferencia para asignar el peso de los DMs y presentan los resultados a ELECTRE. Liu y Cheng (2020) utilizan una medida P-MNI similar para obtener los valores de entrada a MABAC. Chen y Zou (2020) incluyen un factor de tranquilidad basado en la similitud de las evaluaciones entre expertos para reforzar sus posiciones compartidas.

Sin embargo, se proponen otros enfoques con puntos de vista más allá de los efectos negativos o positivos. Gupta et al. (2018) consideran la distancia como una ventaja o una desventaja. Cuantas más coincidencias de dirección tenga con otras evaluaciones, mayor será la puntuación de ventaja que recibirá una evaluación. French (1956) estudia la modificación de la evaluación en un debate para asignar influencia a cada DM, medida por las variaciones sistemáticas de posición a lo largo de un debate. Esto se traduce en peso en relación con la distancia recorrida en cada evaluación. Posteriormente, Pérez et al. (2016) amplían este estudio para incluir grafos de interacción social.

La variación de la distancia a lo largo de un debate también ha sido estudiada por otros autores. Xue et al. (2020) analizan a los DMs que se han acercado a una posición de terceros para aumentar su peso, ya que su confianza se ha reforzado. Fu et al. (2015) proponen que el peso de los expertos se otorgue según su confiabilidad en un proceso de discusión. En este enfoque, la confiabilidad se calcula según la variación de las distancias entre las evaluaciones.

Finalmente, Zhou et al. (2020) utilizan un enfoque que considera no solo cómo los DMs se acercan a su posición, sino su persistencia en defender su opinión.

Tabla 3.6 – Tabla de catalogación de métodos GrP.

Autor	Año	Datos	Fase	Peso	Convergencia	Consenso
S. Wan et al.	2021	TMI	Fase 2	Estático	-	-
Theil	1963	CI	Fase 1	Estático	-	-
Xu and Zhou	2017	P-HFI	Fase 2	Estático	-	-
Zeng et al.	2016	IFI	Fase 2	Estático	-	-
Thong et al.	2020	INI	Fase 1	Estático	-	-
Wu et al.	2019	HFI	Fase 2	Estático	-	-
Lu et al.	2007	CI	Fase 2	Estático	-	-
Wang et al.	2019	SLNI	Fase 2	Estático	-	-
Gupta et al.	2016	TrIFI	Fase 2	Estático	-	-
Wan et al.	2013	TIFI	Fase 2	Estático	-	-
Fahmi et al.	2019	TrCFI	Fase 2	Estático	-	-
Krishankumar et al.	2020	DHHFLI	Fase 2	Estático	-	-
Krishankumar et al.	2020	q-ROFI	Fase 2	Estático	-	-
Meng et al.	2020	IFI	Fase 2	Estático	-	-
Wang et al.	2019	ZI	Fase 2	Estático	-	-
Zhang and Wang	2017	MGLI	Fase 2	Estático	-	-
Wan et al.	2013	IIFI	Fase 2	Estático	-	-
Xu et al.	2019	FI	Fase 2	Estático	-	-
S. Wan et al.	2022	LI	Fase 2	Estático	-	-
Liu et al.	2019	q-ROFI	Fase 2	Estático	-	-
S. Wan et al.	2021	P-LI	Fase 2	Estático	-	-
Zhang et al.	2020	PiFI	Fase 2	Estático	-	-
Liu and Cheng	2020	P-MNI	Fase 2	Estático	-	-
Chen and Zou	2020	GFSI	Fase 2	Estático	-	-
Zhang et al.	2018	2TLI	Fase 2	Estático	-	-
Xu et al.	2019	CI	Fase 2	Estático	-	-
Xu et al.	2020	CI	Fase 1	Estático	-	-
Gupta et al.	2018	IIFI	Fase 1	Estático	-	-
French	1956	CI	Fase 1	Estático	DSE	-
Pérez et al.	2016	CI	Fase 2	Estático	DSE	-
Xue et al.	2020	CI	Fase 2	Estático	-	-
Fu et al.	2015	II	Fase 2	Estático	-	-
Zhou et al.	2020	CI	Fase 2	Estático	-	-

Centroide de grupo (GC)

Algunos autores incluso han estudiado el centroide real de una evaluación grupal (Hinsz, 1999), donde el promedio es la opción más común. La desviación media (Tong & Wang, 2016; Zhang et al., 2016) y la distancia directa (Chen et al., 2021; Li & Chen, 2014; Lin et al., 2018) son formas sencillas de considerar una decisión justa.

Sin embargo, el promedio también se utiliza como una medida indirecta. Ye (2013b) utiliza una función de puntuación para evaluar las diferencias entre las evaluaciones de los DMs y el conjunto promedio, comparándolas para asignar el peso. Gitinavard et al. (2018) utilizan las desviaciones de la matriz de preferencias con respecto

a la media agregada para obtener la matriz menos desviada. Esta matriz se utiliza para asignar el peso en relación con las matrices originales de los DMs.

Otros autores denominan a esta distancia como un 'grado de similitud'. Chai et al. (2013) utilizan la similitud para asignar el peso mediante la comparación entre los DMs. Ye (2014) utiliza una formulación similar para asignar peso a los DM y los criterios al mismo tiempo. Este grado se ha utilizado ampliamente para obtener datos de entrada de TODIM en relación con múltiple información como TFI (Qin et al., 2017), P-HFI (Zhang et al., 2019) o PLI (Wei & Wu, 2019) para adaptar MCGDM a un MCDM existente. Estos estudios proponen un doble paso; primero, los DMs reciben un peso asignado y posteriormente se aplica MCDM.

Por contraparte, algunos estudios han propuesto directamente una adaptación de MCDM. Yue se inspiró en los estudios de Shih et al. (2007) para introducir sus primeros enfoques de distancia (Yue, 2011c), lo que condujo a su conocido método TOPSIS extendido o ETOPSIS (Yue, 2011a). Utilizando una técnica modificada de TOPSIS, este autor desarrolla una metodología basada en coeficientes de cercanía para adaptar este MCDM a un MCGDM. Posteriormente, esta metodología se ha adaptado a II (Yue, 2011b, 2012c, 2012b) y IFI (Yue, 2014), que se han utilizado en otros estudios (Wu et al., 2018; Zarook et al., 2015). Otros autores han ampliado el trabajo de Yue modificando los datos de entrada para OFI (Kacprzak, 2019), PFI (Biswas & Sarkar, 2019), MGLI (Liu et al., 2013) o IFI con distancia de Hamming (Wan et al., 2015), proponiendo nuevos coeficientes de cercanía (Dorfeshan & Mousavi, 2019; Gitinavard et al., 2016; Saffarzadeh et al., 2019) o utilizando enfoques de teoría de conjuntos difusos en lugar del promedio aritmético (Yang et al., 2017) para la solución ideal.

Otras obras relacionadas con TOPSIS incluyen un enfoque similar al de Yue por Jiang y Wang (Jiang & Wang, 2014), utilizando IITrFI y el coeficiente de cercanía, desacuerdo de criterios entre los DM (Hamdani et al., 2017) o adaptaciones de HFI (Wan et al., 2020) y SCI (Aydoğdu et al., 2023).

Más allá de las adaptaciones existentes de MCDM, se han desarrollado algunos métodos novedosos de MCGDM. Yue (Yue, 2012a) presenta un nuevo método basado en proyecciones vectoriales entre los expertos y la solución ideal. Posteriormente, amplía este método a IFI (Yue, 2013). Al igual que en ETOPSIS, otros autores han trabajado con este método y han propuesto nuevos ajustes o extensiones. Yang y Du (Yang & Du, 2015) proponen agregar el coseno para las comparaciones de dirección de expertos. Xu y Liu (2013) y Sun (2015) extienden el método a II e IIFI respectivamente. Liao et al. adaptan el método a IMI (2018) considerando las distancias euclidianas y psicológicas, utilizadas por Luo et al. (2019) para obtener datos de entrada de MULTIMOORA.

Finalmente, Gong et al. (2019) proponen asignar el peso mediante la obtención de dos factores basados en el análisis de clasificación, que estudia la posición de preferencia de cada experto con respecto a su promedio agregado.

Tabla 3.7 – Tabla de catalogación de métodos GC.

Autor	Año	Datos	Fase	Peso	Convergencia	Consenso
Tong and Wang	2016	IFI	Fase 2	Estático	-	Media
Zhang et al.	2016	2TLI	Fase 2	Estático	-	Media
Chen et al.	2021	HFI	Fase 2	Estático	-	Media
Li y Chen	2014	TrCFI	Fase 2	Estático	-	Media
Lin et al.	2018	HFI	Fase 2	Estático	-	Media
Ye	2013	IIFI	Fase 2	Estático	-	Media
Gitinavard et al.	2018	IHFI	Fase 2	Estático	-	Media
Chai et al.	2013	IIFI	Fase 2	Estático	-	Media
Ye	2014	SNI	Fase 2	Estático	-	Media
Qin et al.	2017	TIFI	Fase 2	Estático	-	Media
Zhang et al.	2019	P-HFI	Fase 2	Estático	-	Media
Wei y Wu	2019	P-LI	Fase 2	Estático	-	Media
Yue Z.	2011	IIFI	Fase 2	Estático	-	Media
Yue Z.	2011	CI	Fase 2	Estático	-	Media
Yue Z.	2011	II	Fase 2	Estático	-	Media
Yue Z.	2012	II	Fase 2	Estático	-	Media
Yue Z.	2012	II	Fase 2	Estático	-	Media
Yue Z.	2014	IFI	Fase 2	Estático	-	Media
Kacprzak	2019	OFI	Fase 2	Estático	-	Media
Biswas and Sarkar	2019	PFI	Fase 2	Estático	-	Media
Liu et al.	2013	MGLI	Fase 2	Estático	-	Media
Wan et al.	2015	IFI	Fase 2	Estático	-	Media
Dorfehan and Mousavi	2019	PFI	Fase 2	Estático	-	Media
Gitinavard et al.	2016	HFI	Fase 2	Estático	-	Media
Saffarzadeh et al.	2020	II	Fase 2	Estático	-	Media
Yang et al.	2017	CI	Fase 2	Estático	-	RA
Jiang and Wang	2014	IITrFI	Fase 2	Estático	-	Media
Hamdani	2017	CI	Fase 2	Estático	-	Media
S. Wan et al.	2020	HFI	Fase 2	Estático	-	Media
E. Aydoğdu et al.	2023	SFI	Fase 2	Estático	-	Media
Yue Z.	2012	CI	Fase 2	Estático	-	Media
Yue Z.	2013	IFI	Fase 2	Estático	-	Media
Yang and Du	2015	CI	Fase 2	Estático	-	Media
Xu and Liu	2013	II	Fase 2	Estático	-	Media
Sun	2015	IIFI	Fase 2	Estático	-	Media
Liao et al.	2018	IMI	Fase 2	Estático	-	Media
Gong et al.	2019	CI	Fase 2	Estático	-	Media

Optimización de distancias (O)

En estos métodos, el peso adopta una forma dinámica hasta que la distancia GrP o CG se haya minimizado o se alcance un umbral de índice de consenso.

Entre los sistemas de optimización de distancias o desviaciones de los DMs en GrP, algunos estudios utilizan modelos de minimización programada con el pretexto de disminuir la discordancia y aumentar el consenso (Li et al., 2019; Lin & Wang, 2018; Ma et al., 2020; Xu & Wu, 2013; Xu & Cai, 2012), o para aumentar el índice de soporte, generado al minimizar la distancia entre los DMs (Wan et al., 2021). Sobre estos, algunos autores

han propuesto sistemas de aproximación con los mismos propósitos (Abootalebi et al., 2018). Otros modelos de minimización se centran en la distancia cuadrática entre las matrices de preferencias de los DMs (Xu et al., 2016, 2017).

Existen técnicas que se centran en el análisis de las alternativas evaluadas. Meng et al. (2017) desarrollan un modelo de programación cuadrática que maximiza el índice de consenso para cada alternativa evaluada. En cuanto a las clasificaciones, Li et al. (2015) programan un sistema de minimización de distancia y Zhang y Guo (2016) un sistema de minimización de varianza.

Algunos métodos introducen retroalimentación, como, por ejemplo, Reagan et al. (2006), que proponen que los DMs obtengan un grado de respeto según la distancia entre ellos. Si el nivel de consenso con la solución final no es satisfactorio, se puede modificar iterativamente la opinión. Modelos similares son desarrollados por Dong y Cooper (2016) y Ji (2021) para minimizar las distancias y mejorar el consenso a través de la modificación voluntaria de la evaluación. Otros sistemas de optimización intentan disminuir la distancia entre los DMs y la solución agregada. En estos casos, el índice de consenso utiliza esta distancia como base en lugar de las distancias entre los DMs, como en GC. Los ejemplos más claros son la programación de peso dinámico en TOPSIS para minimizar la distancia a la solución ideal (Zou et al., 2022) en HFI y la minimización de distancias a la solución agregada a través de la programación (Liu et al., 2021).

Por otra parte, algunos estudios consideran que la matriz agregada se calcula como el promedio de los resultados obtenidos en cada iteración, por lo que intentan reducir sus distancias (Meng et al., 2016; Wan et al., 2022a; Wan et al., 2016) o desviaciones (Zhang et al., 2020). Otros consideran la media como punto de partida (Lee, 2002) para calcular el peso inicial, utilizando la agregación iterativa para calcular la matriz de objetivos de optimización (Li & Wang, 2019; Parreiras et al., 2010). Zhang y Xu (2014, 2015) consideran que, en lugar de la distancia directa entre matrices, se deben utilizar los grados de unión e interacción para realizar el cálculo de acuerdo con la dominancia de las alternativas.

Estas diferencias entre los datos también se conocen como discordancia. Xu (2018) desarrolla dos sistemas de programación lineal para minimizarla al reducir el número de ajustes sufridos por los DMs debido al peso, técnica que se ha aplicado para obtener datos de TOPSIS (Jia & Zhang, 2019). TOPSIS también se ha utilizado junto con modelos de programación para minimizar tanto las distancias entre las evaluaciones de los DM como entre ellos y la solución agregada (Wan et al., 2021).

Otros autores utilizan los valores de los atributos como paso previo. Por ejemplo, Yu y Lai (2011) proponen que el peso de los DMs se decide una vez que los atributos se agregan utilizando un operador, para minimizar la distancia cuadrática y la discordancia. Un punto clave de este estudio es que el nivel de consenso se utiliza para indicar si se debe variar el método de agregación. Chen et al. (2015) utilizan este modelo como base para desarrollar un método de optimización de peso mínimo-máximo de atributos.

Tomando esta idea de uso de operadores, Li et al. (2017) desarrollan programación no lineal en MATLAB para la minimización de discordancias en un grupo de

DMs en un entorno de incertidumbre IVIF. Entre otras características, Wan et al. (2017) utilizan los grados de pertenencia difusos para cada componente de evaluación para optimizar las distancias mediante la minimización de la discordancia.

Algunos estudios añaden un sistema de retroalimentación y reevaluación (Dong et al., 2016; Pang et al., 2017; Zhang et al., 2016) a estas técnicas. Si los índices de consenso no alcanzan los umbrales establecidos, los DMs deben modificar sus evaluaciones en los puntos críticos marcados, para iterar el proceso.

También existen métodos de optimización enfocados a grandes grupos de DMs con estos sistemas de reevaluación. Tan et al. (2020) proponen que el peso debe asignarse en función del consenso y la consistencia. Tomando la media como referencia, el consenso se calcula como la diferencia entre las distancias y la consistencia como la diferencia de las desviaciones en la evaluación lingüística. Si no se alcanzan los mínimos, se envía retroalimentación a los DMs más sesgados.

Rodríguez et al. (2018) y Tang et al. (2020) proponen que el peso de los DMs depende tanto del tamaño del grupo como de la cohesión mostrada, calculada de manera análoga a la similitud con el centroide del clúster. Este centroide se calcula inicialmente como una alternativa preferida aleatoria. Si no se alcanza un consenso mínimo, se genera retroalimentación individual y grupal para modificar las opiniones.

Finalmente, existen métodos con enfoques inusuales basados en el consenso y las clasificaciones. En el primero, Yang y He (2021) utilizan el teorema del punto fijo para el cálculo de optimización del peso de los DMs. Según este teorema, una solución converge cuando el cambio iterativo del peso de los DM es imperceptible.

En el segundo, Ben-Arieh y Chen (2006) presentan un nivel de consenso basado en la distancia entre la clasificación agregada final y las clasificaciones de los DMs. Sin embargo, el peso se modifica según su contribución al grupo, medida como el nivel de consenso alcanzado en el grupo sin su participación.

Tabla 3.8 – Tabla de catalogación de métodos O.

Autor	Año	Datos	Fase	Peso	Convergencia	Consenso
Li et al.	2017	HFI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-
Lin and Wang	2018	IFI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-
Ma et al.	2020	MGLI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-
Xu and Wu	2013	2TLI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	-
Xu and Cai	2012	CI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-
S. Wan et al.	2021	InMI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-
Abootalebi et al.	2018	CI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-
Xu et al.	2016	LI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-
Xu et al.	2017	HFI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-
Meng et al.	2017	IIFI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-
Li et al.	2015	CI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-
Zhang and Guo	2016	CI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-
Regan et al.	2006	CI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	-
Dong y Cooper	2016	CI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-
Ji et al.	2021	CI/FI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-

Zou et al.	2022	HFI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	Media
Liu et al.	2021	LI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	Media
Meng et al.	2016	I2TLI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	Media
Wan et al.	2022	P-LI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-
Wan et al.	2016	IIFI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	Media
Zhang et al.	2020	q-ROFI	Fase 1	Dinámico	GP-DO	Media
Lee	2002	FI	Fase 1	Dinámico	GP-DO	Media
Li and Wang	2019	HFI	Fase 1	Dinámico	GP-DO	-
Parreiras et al.	2010	LI	Fase 1	Dinámico	GP-DO	-
Zhang and Xu	2014	IFI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	Media
Zhang and Xu	2015	IIFI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	Media
Xu	2018	IIFI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	Media
S. Wan et al.	2021	P-LI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-
Yu and Lai	2011	CI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	Media
Chen et al.	2015	CI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	-
Li et al.	2017	IIFI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	Media
Wan et al.	2017	IIFI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	-
Dong et al.	2016	CI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	-
Pang et al.	2017	IIFI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	Media
Zhang et al.	2016	TFI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	-
Tan et al.	2020	CI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	Media
Rodríguez et al.	2018	HFI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	-
Tang et al.	2020	CI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	-
Yang and He	2021	IIFI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	FPT
Ben-Arieh and Chen	2006	IIFI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	Media

Evaluación de calidad (QA)

Los métodos de evaluación de calidad utilizan índices de comparación que no se basan en la distancia, sino en las propiedades de las evaluaciones mismas para ponderar a los DMs, que también pueden ser optimizados. Uno de los más utilizados es el índice de consistencia desarrollado por Saaty, que es utilizado directamente por varios estudios en esta revisión en múltiples tipos de datos como CI (Wu et al., 2018), 2TLI (Cabrerizo et al., 2010) o IIFI (Wan et al., 2020).

El método propuesto por Toloie-Eshlaghy y Farokhi (2011) es similar, basado en las iteraciones necesarias para obtener el vector de convergencia. Wu et al. (2012) amplían estos estudios introduciendo un parámetro de amplificación para la consistencia de las evaluaciones para diferenciar a los expertos con opiniones similares. La optimización también se ha introducido en la maximización de la consistencia. Xu y Cai (2014) programan un algoritmo que maximiza la consistencia del grupo al minimizar el peso de las evaluaciones con baja consistencia. Liu et al. (2013) presentan un sistema de optimización adaptado a la incertidumbre derivada de las propias alternativas en sistemas de inicio automático. En este caso, utilizan una entropía y un sistema de modificación de peso capaz de aumentar la consistencia de los DMs.

La entropía de Shannon, que refiere a la falta de información contenida en cada una de las evaluaciones, también ha sido un índice ampliamente utilizado (Hashemi et al., 2018; RazaviToosi & Samani, 2019; Wu et al., 2020; Ye, 2013a; Yue, 2017) para asignar

peso a los DMs. Cheng et al. (2017) utilizan un algoritmo de minimización de entropía relativa para tratar con información incompleta, lo que permite encontrar y minimizar las distancias de entropía. Çali y Balaman (2019) utilizan la entropía para encontrar el grado de divergencia de los DMs, utilizando posteriormente ELECTRE y VIKOR. Li et al. (2015) utilizan un factor de puntuación en lugar del grado de divergencia entre las evaluaciones para relacionar la entropía con el peso, utilizado para encontrar los datos de entrada a TODIM. Esta entropía se ha utilizado junto con la hiperentropía, considerando el resultado como las personalidades de los DMs (Mao et al., 2022) en un estudio de LI, P-LI y LHI.

Múltiples estudios han propuesto otros índices de evaluación de calidad. Por ejemplo, Jin et al. (2018) utilizan una integral de Sugeno para analizar la información vinculada a las evaluaciones y determinar su grado de certeza. Liao et al. (2019) desarrollan una formulación de puntuación para calcular la calidad de la evaluación difusa, denominada grado de vacilación en la evaluación del experto. Wang et al. (2013) interrelacionan las matrices de preferencia multiplicativa con las matrices de evaluación característica utilizando un logaritmo cuadrático para obtener un grado de confiabilidad de la información. Para resolver el sistema interrelacionado, presentan un algoritmo de minimización de diferencias que aumenta el grado de confiabilidad.

Por último, existen métodos de agrupamiento que utilizan una doble evaluación de calidad. Ma et al. (2019) utilizan una combinación de familiaridad y confiabilidad cognitiva relacionada con la consistencia. Se utiliza un modelo de optimización para encontrar la entropía mínima del grupo para el cálculo de la familiaridad. Luego se agrega la confiabilidad, calculada como la consistencia del grupo. Zou et al. (2011) utilizan la entropía y la consistencia de las evaluaciones de los miembros del grupo, sumadas al tamaño del grupo, para obtener el peso de los DMs.

Tabla 3.9 – Tabla de catalogación de métodos QA.

Autor	Año	Datos	Fase	Peso	Convergencia	Consenso
Wu et al.	2018	CI	Fase 1	Estático	-	-
Cabrerizo et al.	2010	2TLI	Fase 2	Estático	-	-
S. Wan et al.	2020	IIFI	Fase 2	Estático	-	-
Toloie-Eshlaghy and Farokhi	2011	CI	Fase 1	Estático	-	-
Wu et al.	2012	CI	Fase 1	Estático	-	-
Xu and Cai	2014	II	Fase 2	Dinámico	GP-Csl	-
Liu et al.	2013	IFI	Fase 1	Dinámico	GP-Csl	-
Hashemi et al.	2018	IFI	Fase 1	Estático	-	-
RazaviToosi and Samani	2019	TFI	Fase 2	Estático	-	-
Wu et al.	2020	LI	Fase 2	Estático	-	-
Ye Jun	2013	IIFI	Fase 2	Estático	-	-
Yue Chuan	2017	CI	Fase 2	Estático	-	-
Cheng et al.	2017	LI	Fase 2	Dinámico	GP-EDO	-
Cali and Balaman	2019	IFI	Fase 2	Estático	-	-
Li et al.	2015	IIFI	Fase 2	Estático	-	-
Mao et al.	2022	LI / P-LI / LHI	Fase 2	Estático	-	-

Jin et al.	2018	FI	Fase 1	Estático	-	-
Liao et al.	2019	HFI	Fase 2	Estático	-	-
Wang et al.	2013	II	Fase 2	Dinámico	GP-Csl	-
Ma et al.	2019	LI	Fase 2	Dinámico	GP-ECsl	-
Zhou et al.	2011	CI	Fase 2	Dinámico	GP-ECsl	-

Integrados (I)

El último grupo corresponde a métodos que incorporan dos o más de las técnicas mencionadas anteriormente. Uno de los más utilizados combina las distancias entre DMs y las evaluaciones de calidad. Por ejemplo, Qi et al. (2015) utilizan un estudio de evaluación de calidad con un grado de incertidumbre, posteriormente modificado por un grado de divergencia entre las evaluaciones para obtener el peso final de los DMs. Liu et al. (2015) utilizan una idea similar para calcular grandes grupos de DMs, los cuales son ponderados por un sistema de doble capa mediante entropía y el método de mínima varianza. Zhang y Chen (2019, 2020) agregan en su método la consistencia y la proximidad de las evaluaciones. Wang et al. (2015) utilizan el grado de similitud entre las clasificaciones de los DMs, modificado por un grado de soporte cuando estas clasificaciones difieren en validez.

Algunos estudios proponen incluir la optimización en estas técnicas. Chen et al. (2015) utilizan el grado de consistencia añadiendo un índice de consenso como referencia en un sistema de iteración. Este consenso se refiere a las distancias entre los DMs y, si no es menor que el umbral establecido, los DMs deben modificar sus evaluaciones. Zhang et al. (2020) proponen un método para maximizar la consistencia de la evaluación del grupo mientras se minimizan las distancias entre los DMs. Qi et al. (2018) proponen que el peso se determine por la calidad de la evaluación, la cual es modificada por un algoritmo de minimización de distancias entre los DMs. Hay estudios similares que utilizan estos métodos de programación doble para minimizar la distancia de Hamming entre los DMs y la media agregada, a la vez que minimizan la entropía ponderada de cada DM (Chen et al., 2023). Para alta incertidumbre en las evaluaciones, Xu et al. (2020) proponen un doble algoritmo para minimizar la entropía y las distancias entre los DMs.

Los métodos de evaluación de calidad también se utilizan con técnicas de GrP. Pang et al. (2020) utilizan el grado de incertidumbre de las evaluaciones con su media y las distancias de la matriz límite. Liu et al. (2013) modifican los atributos utilizando la entropía de las evaluaciones, a partir de la cual se obtiene un valor medio para comparar a los DMs. Liu et al. (2017) utilizan una asignación de peso de doble capa para grandes grupos de DMs, en donde la primera capa utiliza un índice de entropía, que se suma al índice del modelo de mínima varianza obtenido en la segunda capa. Li et al. (2020) desarrollan dos modelos de programación de entropía cruzada que se simplifican a ecuaciones exactas para calcular la experiencia profesional y la experiencia de los expertos utilizando la media del grupo agregado como referencia. Aunque pueda interpretarse como un método de CNA, la experiencia profesional se obtiene mediante la desviación de entropía y la experiencia mediante la distancia directa entre las evaluaciones de los DMs y la media. Un sistema similar es propuesto por Pramanik et al. (2018), con una matriz ideal

compuesta por valores mínimos y máximos, en relación con indicadores de costo o beneficio, utilizada para aplicar la entropía cruzada.

Las técnicas GrP también se utilizan conjuntamente a las GC. Davoudabadi et al. (2020) aplican la similitud entre los DMs para asignar un peso en el primer paso, lo que conduce a una matriz objetivo. Posteriormente, se aplica la distancia al objetivo para obtener el peso modificado. Wan et al. (2015) sugieren agregar la técnica del grado de similitud entre los DMs para modificar la solución ideal de ETOPSIS.

Por otro lado, un grupo de integraciones interesantes combina el análisis de las evaluaciones con técnicas de análisis de expertos. En este contexto, es usual utilizar GC. Chen et al. (2018) agregan un peso asignado por los organizadores del problema con un peso obtenido mediante la distancia con la media geométrica. Jabeur et al. (2004) sugieren asignar un peso en función de una clasificación interpersonal de la importancia, que se modifica mediante un sistema de optimización de distancias entre las clasificaciones individuales y finales. Yang et al. (2019) utilizan una evaluación interpersonal AHP para obtener la matriz agregada, calcular el grado de similitud coseno entre los DMs y obtener los datos de entrada de VIKOR. Otros modelos utilizan tanto matrices de medias como matrices de mínimos y máximos. Liu et al. (2016) proponen incluir un peso subjetivo inicial para modificar la matriz media de ETOPSIS. La sugerencia de Mohagheghi et al. (2017) es similar, con un peso inicial en función de la importancia en su área de experiencia para modificar los valores de TOPSIS.

GrP también aparece en varios estudios que utilizan técnicas de análisis de expertos. Mianabadi y Afshar (2008) integran la evaluación de un gerente de grupo con el análisis de las distancias entre DMs. Xu (2008) amplía la contribución de evaluación interpersonal de Bodily con una medida de desviaciones de preferencia lingüística que modifica el peso inicial en función de la similitud entre los DMs. Ölçer y Odabaşı (2005) utilizan una matriz de comparación subjetiva que puntúa la importancia de cada experto y la diferencia entre sus evaluaciones. Wan et al. (2022b) desarrollan una programación multiobjetivo para minimizar las distancias entre los DMs y su grado de empuje. Bai et al. (2020) proponen el uso de la edad, el nivel de educación, la posición y la experiencia para establecer un peso inicial, que se modifica según la distancia entre los DMs.

Por otro lado, se han propuesto enfoques que integran ambos métodos de distancia. Liu y Li (2015) utilizan un peso subjetivo inicial, que se modifica según la distancia entre los DMs. Posteriormente se ajusta en función de la distancia entre el DM y la distancia óptima al punto central del centroide de Fermat-Torricelli. Chen et al. (2021) utilizan la distancia entre los DMs para obtener el valor del índice de Shapley modificado, que se compara con la distancia hasta su media. Finalmente, existen métodos de integración de análisis de expertos a expertos. Liu et al. (2019) sugieren agregar un peso inicial asignado por un organizador con un grado de autoconfianza declarado por los propios DMs. Ren et al. (2018) utilizan el grado de profesionalismo para evaluar a los expertos según cómo proporcionan información, añadiendo métodos de entropía de evaluación.

Tabla 3.10 – Tabla de catalogación de métodos I.

Autor	Año	Datos	Fase	Peso	Convergencia	Consenso	Métodos
Qi et al.	2015	IIFI	Fase 2	Estático	-	-	GrP + QA
Liu et al.	2015	2TLI/12TLI	Fase 2	Estático	-	-	GrP + QA
Zhang and Chen	2019	HFI	Fase 2	Estático	-	-	GrP + QA
Wang et al.	2015	CI	Fase 2	Estático	-	-	GrP + QA
Chen et al.	2015	IIFI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-	O + QA
Zhang et al.	2020	LI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-	O + QA
Qi et al.	2018	IHFI	Fase 2	Dinámico	GP-DO	-	O + QA
Ze-hui Chen	2023	IIFI	Fase 2	Dinámico	GP-DO + ECsI	-	O + QA
Xu et al.	2020	P-LI	Fase 2	Dinámico	GP-EDO	-	O + GrP
Pang et al.	2020	IIULI	Fase 2	Estático	-	Media	GC + QA
Liu et al.	2013	IFI	Fase 2	Estático	-	Media	GC + QA
Liu et al.	2017	IIFI	Fase 2	Estático	-	Mayoría	GC + QA
Li et al.	2020	IIFI	Fase 2	Estático	-	Media	GC + QA
Pramanik et al.	2018	SNI	Fase 2	Estático	-	Max/Min	GC + QA
Davoudabadi et al.	2020	IIFI	Fase 2	Estático	-	-	GrP + GC
Wan et al.	2015	IIFI	Fase 2	Estático	-	Media	GrP + GC
Chen et al.	2018	CI	Fase 1	Estático	-	Media	EAIA + GC
Jabeur et al.	2004	CI	Fase 2	Dinámico	GP-IC	-	EAIA + O
Yang et al.	2019	PHFLI	Fase 1	Estático	-	-	EAIA + GC
Liu et al.	2016	CI	Fase 2	Estático	-	Media	EAIA + GC
Mohagheghi et al.	2017	IIFI	Fase 2	Estático	-	Media	CNA + GC
Mianabadi and Afshar	2008	FI	Fase 1	Estático	-	-	EAIA + GrP
Xu	2008	LI	Fase 2	Estático	-	Mayoría	EAIA + GrP
Ölçer and Odabaşı	2005	TrFI	Fase 1	Estático	-	-	EAIA + GrP
S. Wan et al.	2022	LI	Fase 2	Dinámico	GP-DO + IC	-	EAIA + O
Bai et al.	2020	TrFI	Fase 1	Estático	-	-	CNA + GrP
Liu and Li	2015	II	Fase 2	Estático	-	FT	EAIA + GRP + GC
Chen et al.	2021	q-ROFI	Fase 2	Estático	-	Media	GrP + GT + GC
Liu et al.	2019	LI	Fase 2	Estático	-	-	CNA + EAIA
Ren et al.	2018	DHFI	Fase 2	Estático	-	-	CNA + QA

3.4. ANÁLISIS Y NECESIDADES DE DESARROLLO

Tal y como se ha comentado, esta sección analiza la literatura seleccionada y corresponde a la cuarta etapa de Cooper (1989). El análisis expuesto se divide a su vez en dos partes: Un análisis centrado en las características generales de los artículos (problemáticas comunes detectadas, evolución y aplicaciones en MCDM), y un análisis de desarrollo que se centra en características internas de las metodologías, que se consideran necesarias para el SEPIP.

3.4.1. Análisis de características generales

Un problema generalizado que se ha encontrado a lo largo de la literatura es la necesidad de adoptar un marco común en los métodos de asignación de peso a los DMs. La falta de unanimidad en su clasificación y en las categorías existentes promueve la existencia de estudios ambiguos.

Por ejemplo, algunos métodos de EAIA fomentan que el evaluador externo otorgue peso según las capacidades de CNA. Otra ambigüedad se encuentra en los métodos de CNA que utilizan bases de QA, pero se refieren a las capacidades de los DMs. En este caso, las capacidades de análisis de discriminación y consistencia (Herowati et al., 2014) o las contribuciones proporcionadas (Chakhar et al., 2016) podrían interpretarse fácilmente como la segunda categoría. Por tanto, es imperante extender y adoptar la metodología propuesta en este capítulo, para facilitar la comunicación y expresión de cada técnica.

Sin embargo, estas ambigüedades también se trasladan a las terminologías utilizadas por estos autores. Más allá del marco conceptual, se han detectado múltiples usos y explicaciones de índices o características que comparten la misma raíz. Los mismos datos reciben diferentes nombres y explicaciones, como se muestra en la Fig. 3.5, ya sea de fuentes subjetivas u objetivas.

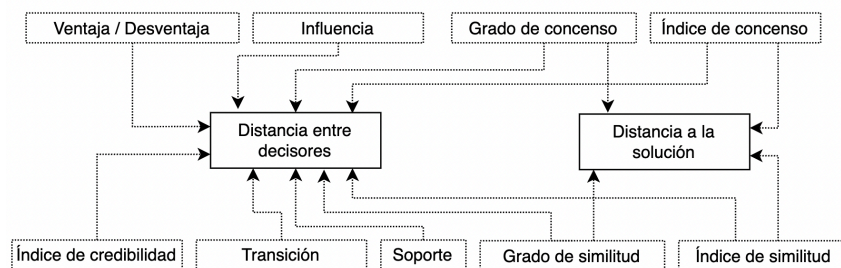


Figura 3.5 – Terminologías utilizadas reiterativamente y su significado.

Independientemente de si la distancia se calcula entre evaluaciones directas, utilizando la matriz de preferencia o mediante el análisis de las clasificaciones, se utilizan múltiples terminologías que se refieren a la misma distancia o incluso a ambas. Para los investigadores novatos o no expertos en el campo, esto puede llevar a malentendidos y conceptos erróneos.

Por lo tanto, se debería adoptar una simplificación más allá de la clasificación propuesta, basada en dos tipos de índice. El primero es el índice de consenso entre expertos (CIE, por sus siglas en inglés), que reúne todas aquellas terminologías que se

refieren al cálculo entre los DMs. Por ejemplo, un estudio puede buscar mejorar el CIE mediante la reducción de las distancias entre los expertos o las diferencias entre las características de las evaluaciones, como la entropía. De manera análoga, la segunda propuesta es el índice de consenso hacia la solución (CIS, por sus siglas en inglés). Este índice se utiliza para unificar las terminologías que se refieren al cálculo entre cada DM y la solución ideal, ya sea utilizando distancias o características de las evaluaciones. Adoptar estos índices, o su inclusión en estudios posteriores, podría ser de gran ayuda para la comunidad.

En cuanto a la comparación e interpretación de los resultados, se ha observado un notable aumento en los métodos propuestos de MCGDM. En la Figura 3.6A se muestran los resultados categorizados por décadas, desde 1950 hasta después de 2020. La Figura 3.6B utiliza esa información para demostrar la dominancia de cada categoría por década.

Es interesante destacar que el inicio se remonta a 1950, cuando la teoría de elección social de Kenneth Arrow (1951) pareció impulsar el interés en los métodos de agregación de opiniones. Las técnicas de teoría de juegos (GT) aparecieron rápidamente para resolver principalmente problemas de poder económico (Shapley y Shubik, 1954), y se propusieron las primeras agregaciones de preferencia de grupo (GrP) (French, 1956) para resolver procesos de discusión. Esta dominancia se extendió durante la década de 1960, cuando algunos autores discutieron las técnicas existentes y propusieron nuevos enfoques de GT (Banzhaf, 1965) y GrP (Theil, 1963).

En las décadas de 1970, 1980 y 1990, se propusieron evaluaciones externas (Keeney y Kirkwood, 1974) o interpersonales (Bodily, 1979; Ramanathan y Ganesh, 1994), nuevos enfoques de GT (Deegan y Packel, 1978) y estudios de Análisis Comparativo de Niveles (CNA) (Brock, 1980; Slevin et al., 1998). Todos ellos formaron parte de lo que consideramos métodos subjetivos.

Sin embargo, a medida que comenzó el siglo XXI, se produjo un cambio de paradigma, pues la tendencia se ha inclinado a favor de métodos más objetivos por varias razones. Aunque las evaluaciones basadas en el análisis de expertos pueden ser más fáciles de aplicar, los métodos EAIA pueden estar sujetos a deshonestidad o sesgo en las evaluaciones interpersonales o por parte de un evaluador superior. Además, también puede surgir injusticia en las técnicas de CNA y GT cuando los DM tienen información de sus competidores. La presentación de necesidades irreales, el uso de ciertos criterios que favorecen a algunos DM de antemano o la preconcepción de coaliciones a través de la delegación de poder pueden conducir a un consenso sesgado.

Por lo tanto, se han propuesto métodos de análisis de evaluación que ignoran a los DM y solo se centran en sus evaluaciones como posibles soluciones a estos problemas. Estas técnicas han crecido exponencialmente desde el año 2000, con importantes contribuciones en los procedimientos de GrP, O, QA y GC, siendo este último especialmente notable.

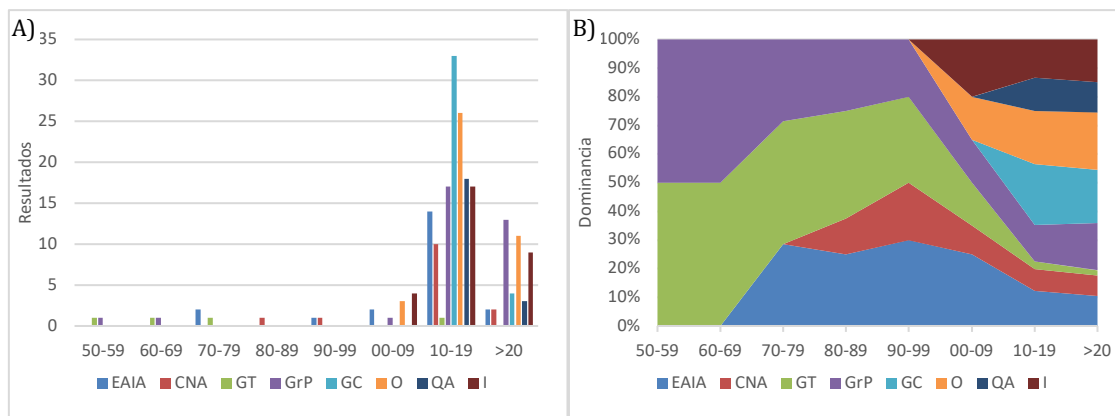


Figura 3.6 – Resultados (A) y dominancia (B) de cada grupo por década.

De hecho, este desarrollo de métodos podría estar directamente relacionado con el creciente interés mostrado en los métodos de MCDM. A medida que el su uso ha ido aumentando debido a su objetividad, paralelamente se pueden haber desarrollado estas técnicas para introducir múltiples opiniones al proceso.

En esta línea, varios artículos utilizan sus propuestas en conjunto con un método MCDM, tal y como se muestra en la Figura 3.7. Aunque se han aplicado numerosos métodos MCDM, TOPSIS y VIKOR son las técnicas más utilizadas, mientras que otros tienen pocas apariciones. Este hecho es sorprendente, considerando la gran cantidad de técnicas MCDM constantemente aplicadas en todos los campos científicos. En cuanto a las categorías, es notable la amplia aplicación de GC. Esto se debe principalmente al trabajo de Yue sobre TOPSIS extendido y Proyección, que aparecen varias veces en la categorización. Por otro lado, es notable la falta de técnicas de GC aplicadas con VIKOR.

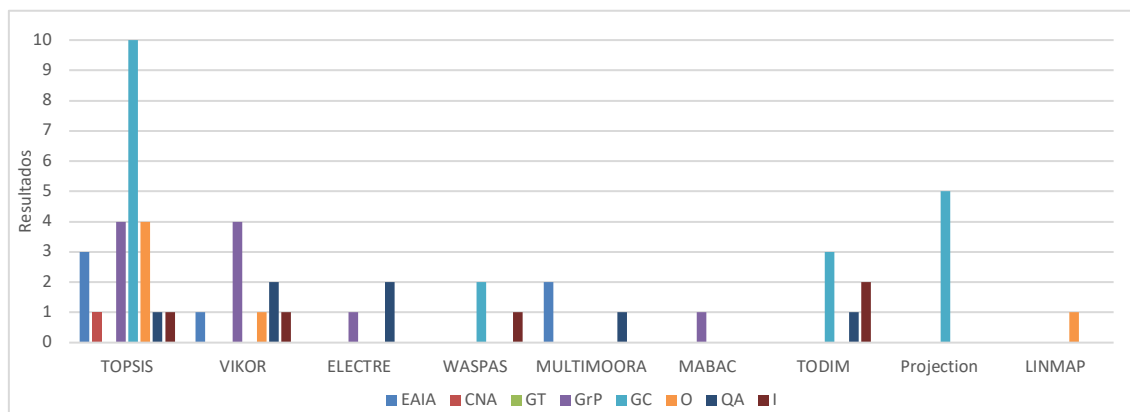


Figura 3.7 – Resultados que desarrollan MCGDM que incluyen el uso de métodos MCDM.

3.4.2. Análisis de características internas

En esta subsección se estudian las características de los métodos desde un punto de vista práctico a la Tesis. Por ello, los principales rasgos de interés son aquellos que representan básicos desde el punto de vista de un sistema de toma de decisiones en grupo para la administración pública.

Justamente la primera característica, refiere al amplio uso de métodos GC que se observa en la Figura 3.7, y a la consideración de su solución ideal. Aunque se han propuesto múltiples posibilidades como solución ideal, los datos mostrados en la Figura 3.8 dejan clara la preferencia general. Esta figura considera los métodos que utilizan una solución ideal y separa los porcentajes según el punto que se considere.

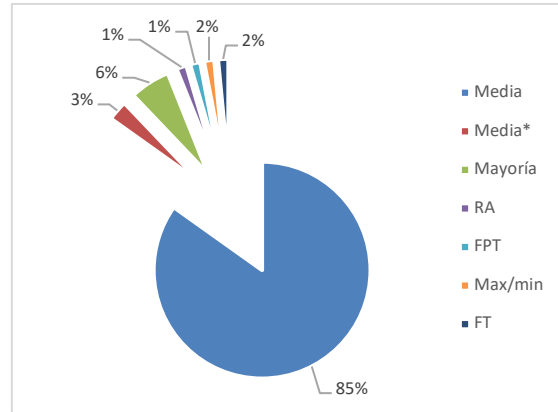


Figura 3.8 –Porcentajes de distribución de soluciones ideales consideradas.

La media es, con mucho, el punto estadístico más utilizado para asumir el consenso en 56 de los 66 resultados, lo que representa un asombroso 84.85%. Por otro lado, pocos artículos utilizan otras aproximaciones y los porcentajes están ampliamente distribuidos. Dos artículos (3.03%) utilizan la media afectada por un peso previo (Liu et al., 2016; Mohagheghi et al., 2017) y 4 (6.06%) consideran el consenso por mayoría (Chatterjee & Bhattacharyya, 2017; Liao et al., 2020; Liu et al., 2017; Xu, 2008). RA (Yang et al., 2017), FTP (Yang & He, 2021), Max/Min (Pramanik et al., 2018) y FT (Liu & Li, 2015) son utilizados solo por 1 artículo cada uno, lo que representa un 1.52% por aproximación.

Es sorprendente el alto grado de aceptación de la media como solución ideal, a pesar de que algunos trabajos se oponen a su uso indiscutible (Hinsz, 1999) y proponen alternativas que mejoran el consenso o presentan la posible pérdida de información producida por su uso (Ma et al., 2020). Cabe destacar que muchos métodos no utilizan la media como solución directa, sino como una aproximación a la solución. Esto puede deberse a la aceptación implícita de los axiomas de la teoría de elección social. Estos axiomas se utilizan para dotar a los métodos matemáticos de una base social que les otorgue peso sociológico y evite situaciones de injusticia, promoviendo la igualdad. Sin embargo, a pesar de que algunos estudios pueden presentar estas consideraciones sociales en los procedimientos, como se muestra en la Figura 3.9, muchos carecen de su incorporación explícita, lo que dificulta conocer sus contribuciones o si realmente se han considerado.

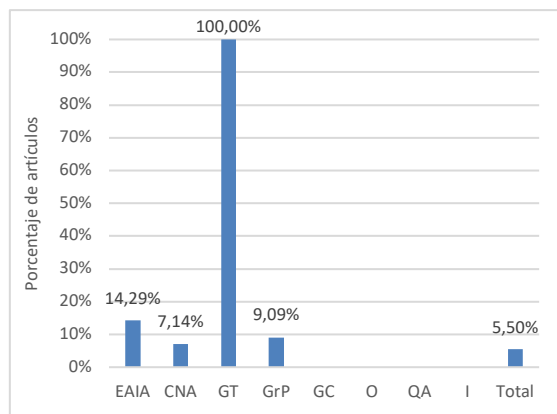


Figura 3.9 –Porcentajes de resultados con reglas sociales.

Solo 11 de los 200 resultados categorizados (5.50%) muestran claramente una regla social, a pesar de que estos métodos se desarrollan para ayudar a los DMs en sus decisiones de selección de alternativas. En el caso de los métodos de análisis de expertos, 8 de los 39 (20.51%) artículos muestran esta característica. Los métodos de GT presentan 4 de 4 (100%) para esta característica, ya que estos enfoques estudian las interacciones entre los DMs y se desarrollaron con una sólida base social referida a influencia previa. En cuanto a otras categorías, EAIA presenta la característica en 3 de 21 (14.29%) artículos y CNA en 1 de 14 (7.14%). Es destacable que los resultados de EAIA (Bodily, 1979; Keeney & Kirkwood, 1974; Ramanathan & Ganesh, 1994) y CNA (Brock, 1980) son todos del siglo pasado.

No obstante, los resultados de los resultados basados en análisis de evaluación son sorprendentes. Solo 3 de los 131 (2.29%) artículos, todos pertenecientes al grupo GrP (3 de 33, el 9.09%), presentan consideraciones sociales a pesar de que estos métodos se han propuesto para mejorar la objetividad y equidad del GDM, y son puntos clave en los enfoques de la teoría de elección social. Al igual que en el caso anterior, 2 de los resultados (French, 1956; Theil, 1963) son del siglo pasado, mientras que el último (P. Liu & Cheng, 2020) es un enfoque relativamente novedoso. Por último, no hay métodos integrados con esta característica.

En cambio, los artículos contienen extensas y detalladas introducciones que explican y refieren al tipo de datos utilizados. Estas introducciones se explican por la gran diversidad de datos en MCDM. La creciente complejidad de los MCDM está relacionada con el desarrollo de datos de entrada que permiten a los DM expresarse de diferentes formas, como por ejemplo rangos, incertidumbre o lingüística, como bien se ha podido ver en las tablas de catalogación. Estas tablas se han utilizado para generar la Figura 3.10, que muestra el porcentaje de tipología de datos según cada una de las clasificaciones propuestas.

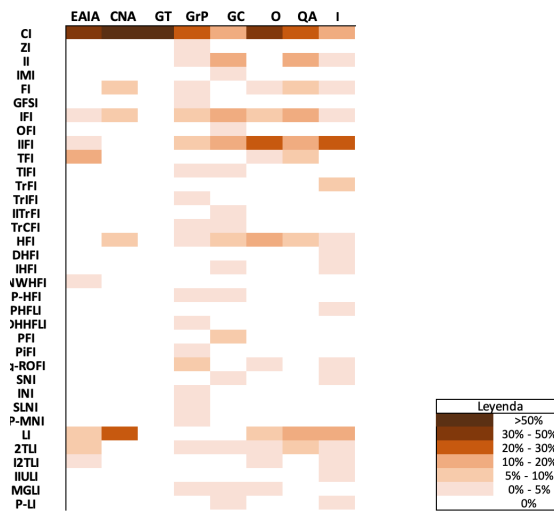


Figura 3.10 – Porcentajes de datos utilizados por categoría.

Se puede observar un claro dominio de valores exactos en la mayoría de las categorías, excepto en GC y los métodos integrados. Esto puede deberse a que el objetivo principal de este capítulo ha sido clasificar nuevos métodos, que generalmente se presentan con valores exactos.

Una vez presentados, su complejidad suele aumentar con la extensión al uso de nuevos datos. Como muchos métodos de GC utilizan la media agregada, varias propuestas se basan en modificar los datos utilizados en este valor. Un claro ejemplo son las múltiples modificaciones de datos de entrada de métodos como ETOPSIS y proyección. Por otro lado, los métodos integrados generalmente parten de la combinación de métodos existentes y, por lo tanto, pueden pasar a utilizar otros datos. Es destacable que todos los métodos de GT se concentran en la categoría de CI, lo que puede ser un indicador de la escasa información obtenida mediante el proceso de búsqueda y la necesidad de ampliarla.

El último análisis de resultados y sus tablas de clasificación es el punto en el que estos métodos se aplican en el proceso de GDM, y refiere a los porcentajes de aplicación de los artículos según la fase en cada categoría mostrados en la Figura 3.11. Se puede observar que los artículos de la fase 0 se encuentran en los métodos de análisis de expertos, ya que como indica la propuesta de clasificación, estas técnicas no necesitan conocer ni las alternativas ni las opiniones de los evaluadores sobre los criterios o atributos. Por lo tanto, es normal que esta fase no aparezca en los métodos de análisis de evaluación. Quizás el valor más destacado sea la fase 0 completa en las técnicas de GT, ya que estas se centran en el análisis del peso previo de los DM.

Sin embargo, los métodos de análisis de evaluación también plantean un punto de discusión interesante. Aunque se desarrollan para trabajar con las fases 1 y 2 para mejorar la objetividad del proceso, es notable la dominancia de la fase 2. Hay muchos artículos directamente relacionados con matrices de preferencia multiplicativa u similares (116 de 131), y pocos se centran únicamente en el análisis de opiniones (16 de 131). Además, 6 de estos 16 artículos están relacionados con la QA, ya que el método compara las características de las evaluaciones. Por lo tanto, solo hay 5 y 4 artículos de la fase 1 en GrP

y O, respectivamente. Hay muchos casos en los que las alternativas no son conocidas o pueden variar. Por lo tanto, los métodos que podrían aplicarse sin conocer las alternativas (fase 0 y 1) son un aspecto interesante para desarrollar.

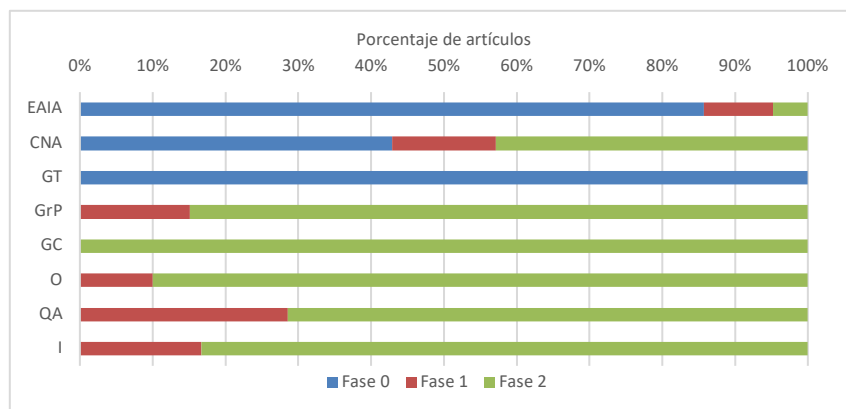


Figura 3.11 -Porcentaje de artículos aplicados en cada fase según su grupo.

Finalmente, se han analizado dos características internas de los métodos debido a su estrecha conexión con la toma de decisiones en el mundo real y el avance de los métodos actuales. Una de ellas es la aceptación de la influencia previa. En la toma de decisiones reales, no es raro que los expertos tengan un peso diferente a la hora de tomar una decisión. Ejemplos de esto pueden ser diferentes roles en una empresa o diferencias en la experiencia o conocimiento de los DMs. La otra característica es el proceso de división de componentes. Algunos estudios han afirmado que dividir un problema de múltiples criterios en análisis criterio por criterio podría mejorar la respuesta del grupo en términos de consenso (Kerr & Tindale, 2004). Por lo tanto, la Figura 3.12 muestra el porcentaje de artículos que utilizan o comentan cada una de estas características.

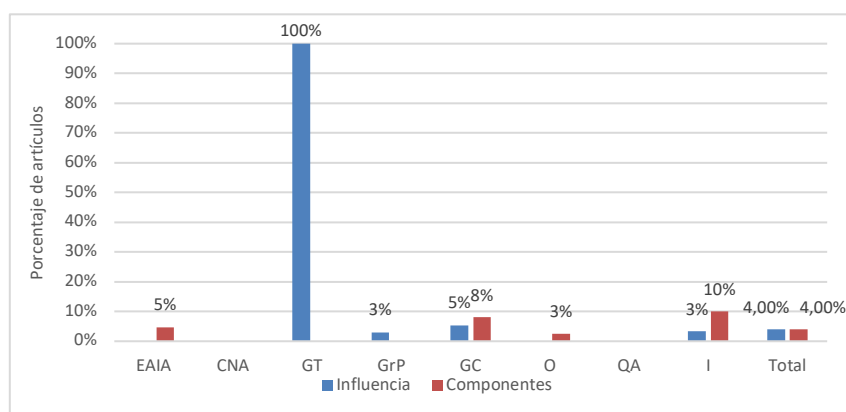


Figura 3.12 -Porcentaje de artículos que contienen las características de estudio.

Los porcentajes de influencia previa son llamativos. Aunque es un punto clave en la GDM, no se ha considerado ampliamente, con una ocurrencia del 4% (8 de 200 resultados). Si se excluyen los datos de GT, ya que estos métodos están especializados en la influencia previamente asignada, el valor disminuye a una ocurrencia del 2.04% (4 de 196 resultados). Si bien los métodos de análisis de expertos pueden gestionar la influencia previa de manera más fácil (por ejemplo, a través de la consideración de asesores externos o la contemplación de roles), los métodos de análisis de evaluación requieren un sistema

estructurado para tenerlo en cuenta. Esto explica por qué estos valores de porcentaje son tan bajos.

Aun así, hay artículos que lo consideran. Liu et al. (Liu et al., 2019) utilizan el enfoque de GrP como coeficiente corrector para la influencia previa. En los métodos de GC, Hamdani y Aydoğdu (Aydoğdu et al., 2023; Hamdani et al., 2017) solo mencionan su existencia, y en los métodos integrados, se utiliza el índice de poder de Shapley como suposición de la influencia previa (Chen et al., 2021).

En cuanto a la división de componentes, el mismo porcentaje de artículos muestra esta característica, un 4% (8 de 200 resultados). El procedimiento más común es asignar un peso diferente a cada DM por cada criterio evaluado en los métodos de análisis de expertos (Kelemenis et al., 2011), GC (Chai et al., 2013; Zhang et al., 2019), O (Liu et al., 2021) y métodos integrados (Pang et al., 2020; Wan, Xu, et al., 2015). Sin embargo, también se han propuesto otros sistemas. Por ejemplo, en GC existe un sistema que modifica el peso asignado previamente por los DM en función de cuántos de ellos han elegido utilizar ciertos criterios, asignando un peso de DM por criterio (Hamdani et al., 2017), y en los métodos integrados se ha presentado un enfoque que asigna un peso de membresía a cada DM respecto a cada criterio (Ren et al., 2018).

3.5. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se ha presentado un nuevo esquema de clasificación de métodos GDM, el cual se ha utilizado para comparar y seleccionar la metodología más adecuada para el SEPIP a desarrollar en esta Tesis Doctoral; los métodos GDM de asignación de peso a los decisores.

Sin embargo, mediante una revisión sistemática de estas técnicas, se han detectado un conjunto de deficiencias y vacíos en los métodos actuales que hacen inviable su implementación en un sistema de toma de decisiones para la administración pública:

- En primer lugar, los métodos analizados carecen de una fuerte base social y de teorías sociológicas, lo que puede conllevar a complicaciones de equidad, igualdad y objetividad entre múltiples decisores en la estructura matemática. Dado que se plantea un proceso de selección de alternativas en la administración pública, dónde múltiples partes interesadas toman o deberían tomar parte de la decisión, este problema se convierte en primordial.
- La segunda deficiencia, íntimamente relacionada con la primera, refiere a la inclusión de la influencia inicial. En la toma de decisiones públicas, las partes interesadas pueden tener un peso distinto, cómo partidos políticos, expertos, o la opinión ciudadana. Sin embargo, la mayoría (o casi totalidad) de métodos MCGDM analizados carece de esta característica.
- También se debe evitar el uso meramente de la media como solución ideal directa. Varios autores han cuestionado la veracidad de esta estadística objetiva y han analizado otras posibilidades. En la misma línea, la

separación de componentes debe ser estudiado como un interesante factor de desarrollo, pues otros autores comentan que, a efectos prácticos, puede aumentar la eficacia del método.

- Finalmente, los nuevos métodos también deben promover enfoques en ausencia de conocimiento de alternativas. En un mundo donde las posibilidades están en constante crecimiento y las alternativas pueden tener múltiples modificaciones, no es realista suponer que las alternativas se conocen de antemano. Mucho menos en el sector público de infraestructuras, dónde es usual que aparezcan licitaciones o presupuestos, y posteriormente se presenten las alternativas.

En definitiva, este capítulo ha detectado que ningún método existente es implementable para la presente Tesis Doctoral, por lo que se debe desarrollar un nuevo método MCGDM que encaje con las características necesarias.

4. TOMA DE DECISIONES EN GRUPO: EL MÉTODO HIVES

4.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se ha estudiado en profundidad la adecuación de los métodos MCGDM existentes, para conocer si su implementación en el SEPIP era posible. Sin embargo, mediante la revisión literaria sistemática, se ha hallado que, debido a las necesidades de la administración pública en la toma de decisiones, los métodos actuales no están lo suficientemente preparados como para ser introducidos en el SEPIP.

En este capítulo se utilizan las conclusiones del capítulo 3 para desarrollar un nuevo método MCGDM que cumpla con las expectativas de la administración pública, que es presentado en la segunda sección. En la tercera, se muestra un ejemplo ilustrativo del método, que a su vez es comparado con otras técnicas MCGDM actuales, para analizar su rendimiento. La sección 4 contiene el análisis de sensibilidad del método desarrollado, mientras que la sección 5 muestra un caso de estudio complejo para finalizar la verificación de rendimiento. Finalmente, la última sección extrae las conclusiones del capítulo.

4.2. PRESENTACIÓN DEL MÉTODO HIVES

En este apartado se exponen distintos puntos del método desarrollado. Primeramente, se muestra la idea detrás de la técnica y los Axiomas sociales aplicados. Seguidamente, se detallan sus características matemáticas principales; la gestión de influencia previa y los conceptos matemáticos que se han desarrollado para poder generar el método presentado. Finalmente, se muestra un resumen del algoritmo completo.

4.2.1. Idea del método

Como se ha presentado en el capítulo anterior, existe una falta de enfoques matemáticos que incluyan características de la teoría de elección social. En la toma de decisiones para la administración pública, este hecho es extremadamente importante, ya que la teoría de elección social tiene una larga historia de desarrollo de enfoques de agregación de múltiples participantes más allá de las aproximaciones matemáticas, incluyendo consideraciones psicológicas o de bienestar social para garantizar la equidad en una decisión.

Además, la revisión de literatura destacó otras posibles mejoras. Por ejemplo, se propone la división de componentes, ya que algunos autores han presentado una mejora en la respuesta de consenso del grupo (Kerr & Tindale, 2004) con su uso. También es necesario analizar cómo se aborda la influencia previa, ya que en las decisiones del mundo real los participantes pueden no tener la misma importancia.

Con esto en mente, fue necesario desarrollar una metodología que pudiera lograr 5 objetivos. (i) Primero, se debe alcanzar un consenso maximizando la satisfacción del grupo. (ii) Segundo, se debe considerar la teoría de elección social en forma de restricciones metodológicas matemáticas. (iii) Tercero, el método debe ser capaz de manejar pesos o influencias previamente dados. (iv) Cuarto, la metodología debe ser aplicable incluso sin conocimiento de las alternativas. (v) Finalmente, la técnica de análisis debe dividir la MCGDM en componentes para mejorar la respuesta de satisfacción.

La metodología propuesta se ha desarrollado teniendo en cuenta estos objetivos y se ha denominado Integración Jerárquica de Valores y Evaluaciones bajo Restricciones Sociales (HIVES, por sus siglas en inglés). HIVES es una metodología dinámica que utiliza la influencia inicial de los participantes y sus evaluaciones dadas en valores porcentuales no negativos para simular el comportamiento del grupo de partes interesadas o decisores, llamado comportamiento de la colmena (HB, por sus siglas en inglés).

El HB se utiliza para maximizar la satisfacción del grupo en todos los componentes de la decisión, ya que cada componente se analiza de manera específica. La representación de cómo funciona HIVES se muestra en la Figura 4.1, inspirada en el consenso de la colmena de abejas.

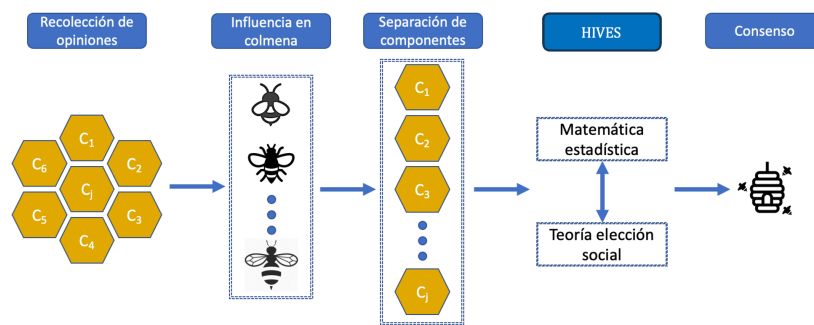


Figura 4.1 –Representación del proceso del método HIVES.

Cada evaluación de los participantes contiene un vector de pesos con respecto al conjunto de criterios analizados. Este vector está influenciado por la influencia previa respectiva de los participantes, que se representa mediante diferentes roles de la colmena, como una abeja obrera o una abeja reina, y significa que HIVES puede considerar a los participantes de manera igualitaria o desigual. Una vez que las evaluaciones han sido influenciadas por los pesos de los participantes, se realiza un análisis HIVES para cada componente del conjunto de criterios, aplicando matemáticas estadísticas con restricciones teóricas sociales para encontrar la solución de grupo más deseable.

Esta solución se basa en una metodología de juego en la que los participantes obtienen una puntuación en función de su posición en comparación con el grupo. Esta puntuación se asigna utilizando dos nuevos conceptos: el punto de consenso social ideal (SICP, por sus siglas en inglés) y la campana de puntuación (SB, por sus siglas en inglés). La puntuación de los participantes determina sus pesos, permitiendo la agregación de componentes para encontrar la solución final.

4.2.2. Axiomas sociales

La teoría de la elección social se ha utilizado para analizar diversas formas de combinar preferencias y opiniones individuales para llegar a una decisión colectiva aceptable. En este marco teórico, se han propuesto numerosos axiomas, afirmaciones o premisas que se consideran verdaderos para garantizar la equidad y la imparcialidad. Algunos autores (Ramanathan & Ganesh, 1994) presentaron 4 de los axiomas más comunes y propusieron otro más a considerar.

Estos cinco axiomas, mostrados en la Figura 4.1, se han utilizado para desarrollar las restricciones sociales matemáticas estadísticas de HIVES y se han adaptado para considerar las preferencias de los criterios en lugar de las alternativas debido al dominio de HIVES. A continuación, se presentan los axiomas de la elección social que se utilizan:

- **Axioma 1:** Dominio universal. El método de agregación de preferencias de grupo debe definir un patrón de preferencia de grupo para todas las preferencias individuales que sean lógicamente posibles. En otras palabras, no debe ser imposible proporcionar la preferencia de grupo para cualquier conjunto de preferencias individuales.

- **Axioma 2:** Optimalidad de Pareto. Si A y B son dos criterios, si todos los miembros del grupo prefieren A a B, entonces la decisión del grupo debe favorecer A.
- **Axioma 3:** Independencia de criterios irrelevantes. Si se elimina un criterio de consideración, el nuevo ordenamiento del grupo para los criterios restantes debe ser equivalente (es decir, el mismo ordenamiento) al ordenamiento original del grupo para los mismos criterios.
- **Axioma 4:** No dictadura. No existe un individuo cuyas preferencias automáticamente se conviertan en las preferencias del grupo, independientemente de las preferencias de otros miembros del grupo.
- **Axioma 5:** Reconocimiento. Las preferencias del grupo se alcanzan solo después de considerar las preferencias de todos los miembros. Esto significa que se deben considerar todas las preferencias de los participantes o DM.

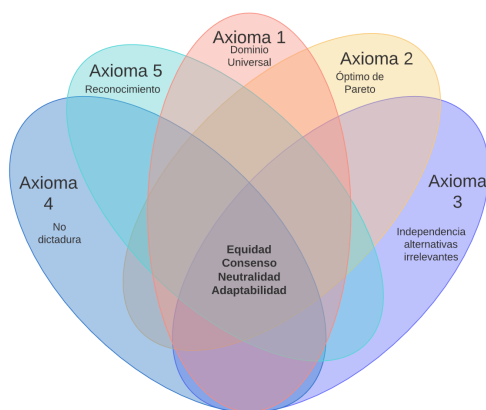


Figura 4.2 –Axiomas sociales utilizados en HIVES.

En cuanto al método HIVES, se deben destacar dos características de los axiomas. En primer lugar, el Axioma 3 "Independencia de criterios irrelevantes" se ha adaptado para establecer el ordenamiento de los criterios en lugar de las alternativas. Como HIVES trabaja con puntuaciones de criterios porcentuales, se puede producir el mismo ordenamiento. Esto significa que la nueva metodología debe ser capaz de aceptar la eliminación de un criterio.

En segundo lugar, el Axioma 4 "no dictadura" está directamente relacionado con los pesos previos de los participantes. Esto significa que, en una condición inicial afectada por la igualdad, el método asegura este axioma. Si hay pesos previos que se deben aplicar, ese axioma podría ser violado. Por ejemplo, si un participante tiene el 60% del poder de decisión antes de aplicar HIVES, es obvio que este axioma no se puede aplicar.

Además de estos aspectos destacados, HIVES garantiza una metodología adaptable que mejora la objetividad y neutralidad del proceso. Al mismo tiempo, los axiomas de elección social aumentan la equidad y la imparcialidad en la técnica.

4.2.3. Gestión de la influencia previa

En el mundo real, la igualdad de influencia es poco común. Diferentes niveles de conocimiento, jerarquías laborales o porcentajes de representación ciudadana son situaciones en las que los participantes en la toma de decisiones pueden tener diferentes pesos. HIVES introduce el concepto de "voto" para introducir diferentes influencias iniciales en la metodología.

En otras palabras, HIVES considera cada evaluación como un voto del participante para generar el proceso. Para hallar la cantidad de votos de cada participante (v^i), HIVES compara su influencia ($Influencia^i$) con la del participante menos influyente ($Influencia_{min}$), tal y como se muestra en la ecuación 4.1.

$$v^i = \frac{Influencia^i}{Influencia_{min}} \quad [4.1]$$

Por tanto, se garantiza el Axioma 5 de representatividad, ya que se representa siempre al participante con menos peso. Las pequeñas diferencias entre los participantes dependen del aspecto relativo del peso, ya que en algunos casos serán insignificantes. Este sistema se utiliza ampliamente en la democracia, donde los cargos parlamentarios se asignan mediante un número mínimo de votos.

4.2.4. Conceptos matemáticos desarrollados

Como se ha mencionado, HIVES se basa en el concepto de HB generado por las evaluaciones de los participantes. Estas evaluaciones grupales se introducen en dos nuevos conceptos metodológicos, el SICP y la SB, que crean un juego donde todas las evaluaciones introducidas por los participantes obtienen una puntuación a partir de la distancia al SICP, mientras que los Axiomas se utilizan como restricciones matemáticas. Estas puntuaciones se utilizan para ponderar a los participantes en cada componente del conjunto de criterios.

Punto de consenso social ideal (SICP)

Aunque el promedio de los datos se ha utilizado ampliamente como consenso ideal, algunos estudios académicos han cuestionado su utilidad (Crott et al., 1991; J. H. Davis et al., 1997). Además, su uso directo puede violar los Axiomas presentados. Por ejemplo, un participante extremadamente sesgado puede modificar el resultado, violando el Axioma 4.

Por lo tanto, en este artículo se desarrolla un nuevo consenso ideal, denominado como el punto de consenso social ideal. El SICP se genera mediante el promedio de las evaluaciones de los criterios comprendidas entre el primer y tercer cuartil de los datos. Estas evaluaciones tienen las mayores probabilidades de ser aceptadas por el grupo debido a su posición y se colocan en un rango llamado zona de influencia (IZ, por sus siglas en inglés). Por otro lado, las evaluaciones de los criterios comprendidas entre el mínimo y el primer cuartil y entre el tercer cuartil y el máximo se colocan en un rango llamado zona de dispersión (DZ, por sus siglas en inglés). Estas evaluaciones están lejos de un posible consenso, lo que significa que los participantes deben ceder para llegar a una solución.

Como se muestra en la Figura 4.3, la representación de IZ y DZ crea una combinación de diagrama de caja y vela japonesa.

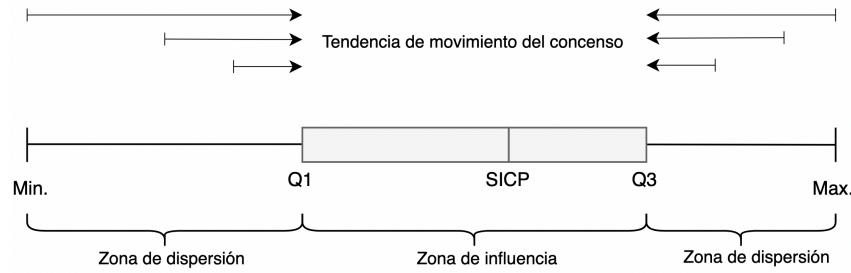


Figura 4.3 –Representación de las zonas de influencia y dispersión.

Por lo tanto, el SICP se determina de la siguiente manera. Para mayor conveniencia, en este artículo, sea $M = \{1, 2, \dots, m\}$, $N = \{1, 2, \dots, n\}$; $i \in M$ y $j \in N$. Y sea $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$ un conjunto discreto de criterios y $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_m\}$ un grupo de participantes. Supongamos que cada $d_i \in D$ evalúa la importancia de cada criterio del conjunto de criterios mediante un vector de pesos $W_i = \{w_{i1}, w_{i2}, w_{i3}, \dots, w_{in}\}$, tal que $0 \geq w_{ij} \geq 100$, $\sum_{j=1}^n w_{ij} = 100$, para $\forall j \in N$ y $\forall i \in M$. Entonces, todas las evaluaciones del grupo de participantes constituyen una matriz de decisión expresada por:

$$GE = (w_{ij})_{m \times n} = \begin{matrix} & c_1 & c_2 & \dots & c_n \\ d_1 & w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ d_2 & w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_m & w_{m1} & w_{m2} & \dots & w_{mn} \end{matrix} \quad [4.2]$$

dónde w_{ij} expresa la evaluación o opinión del DM d_i sobre el criterio c_j . para cada criterio c_j existe un $SICP_j$ generado por el set de evaluaciones w_{ij} que se posicionan entre el segundo y tercer cuartil de datos c_j . Por tanto, sea $F_j = \{j_1, j_2, \dots, j_r\}$; $j_r \in F_j$ el sub-set discreto de c_j en el que sus componentes cumplen $Q_1^j \leq w_{ij} \leq Q_3^j$, dónde Q_1^j and Q_3^j son el primer y tercer cuartil, respectivamente. Estas evaluaciones conforman un set $W_{r,j} = \{w_{j1,j}, w_{j2,j}, w_{j2,j}, \dots, w_{j_r,j}\}$ utilizado para encontrar el $SICP_j$, como sigue:

$$SICP_j = \frac{1}{jf} \cdot \sum_{jr=j_1}^{jf} w_{r,j} \quad [4.3]$$

Campana de puntuación (SB)

Una vez presentado el SICP, se necesita una herramienta de puntuación para evaluar la posición de cada participante del grupo respecto a cada $SICP_j$. Esta herramienta seleccionada es la SB, una función similar a una función de densidad de probabilidad por dos razones: (i) su capacidad para vincular el estado de influencia de las evaluaciones (IZ, DZ, SICP) mostradas en la Figura 4.3 y su relevancia real con el conjunto de datos y (ii) la posibilidad de tratar la función en partes, asignando valores fijos que conviertan los Axiomas considerados en restricciones matemáticas.

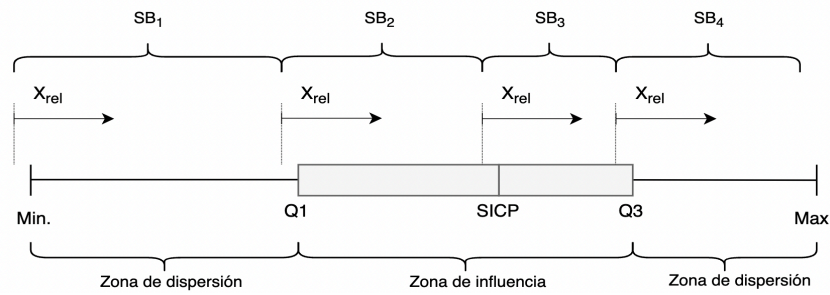


Figura 4.4 –Representación de las zonas de influencia y dispersión y las partes de la SB.

Por lo tanto, el SB está formado por 4 funciones dependiendo de su respectiva zona de aplicación. La primera abarca desde la evaluación mínima hasta el valor Q1. La segunda abarca desde el valor Q1 hasta el SICP. La tercera comprende desde el SICP hasta el valor Q3. La cuarta incluye desde el valor Q3 hasta la evaluación máxima. Cada ecuación SB contiene una puntuación de posición relativa. Esto significa que se debe asignar un valor de puntuación a los límites de la ecuación. Por lo tanto, para cada criterio hay cuatro ecuaciones SB:

$$SB_1 = e^{\ln(S_{Mean}) \cdot \left(\frac{x_{rel}}{x_{Q1} - x_{min}}\right)^f} \quad [4.4]$$

$$SB_2 = (S_{max} + 1) - e^{\ln(S_{max} + 1 - S_{Mean}) \cdot \left(1 - \frac{x_{rel}}{x_{Máx inf.} - x_{Q1}}\right)^f} \quad [4.5]$$

$$SB_3 = (S_{max} + 1) - e^{\ln(S_{max} + 1 - S_{Mean}) \cdot \left(\frac{x_{rel}}{x_{Q3} - x_{Máx inf.}}\right)^f} \quad [4.6]$$

$$SB_4 = e^{\ln(S_{Mean}) \cdot \left(1 - \frac{x_{rel}}{x_{máx} - x_{Q3}}\right)^f} \quad [4.7]$$

Dónde

S_{mean} es el valor de inflexión de Q1 y Q3,

S_{max} es el valor máximo obtenido en el SICP,

X_{rel} es valor de x de la evaluación según el dominio de la Figura 4.4,

X_{min} es valor de x de la mínima evaluación,

X_{Q1} es valor de x de la evaluación del Q1,

$X_{Máx inf.}$ es valor de x del SICP,

X_{Q3} es valor de x de la evaluación del Q3,

$X_{máx}$ es valor de x de la máxima evaluación,

f es el valor de forma de la función.

El desarrollo de HIVES ha destacado algunas características. La puntuación mínima debe ser 1 debido a la restricción del Axioma 5. Se asigna una puntuación media de 50 a los valores de Q1 y Q3 y una puntuación máxima de 100 al SICP, utilizando un factor de forma de 2 para expresar la diferencia de influencia entre las zonas. Por lo tanto, las cuatro ecuaciones SB son las siguientes:

$$SB_1 = e^{\ln(50) \cdot \left(\frac{x_{rel}}{x_{Q1} - x_{min}}\right)^2} \quad [4.8]$$

$$SB_2 = (101) - e^{\ln(51) \cdot \left(1 - \frac{x_{rel}}{x_{Máx inf.} - x_{Q1}}\right)^2} \quad [4.9]$$

$$SB_3 = (101) - e^{\ln(51) \cdot \left(\frac{x_{rel}}{x_{Q3} - x_{Máx inf.}}\right)^2} \quad [4.10]$$

$$SB_4 = e^{\ln(50) \cdot \left(1 - \frac{x_{rel}}{x_{máx} - x_{Q3}}\right)^2} \quad [4.11]$$

Estas cuatro ecuaciones mostradas en la Figura 4.5 están directamente relacionadas con el tratamiento de la influencia. Las ecuaciones de DZ disminuyen exponencialmente la puntuación de los DMs a medida que su opinión se aleja del SICP. Por otro lado, las ecuaciones de IZ consideran una puntuación en aumento de forma exponencialmente plana, dada la proximidad al SICP. Una vez generado el SB, cada DM recibe un vector de puntuación $S_i = \{S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, \dots, S_{in}\}$, para todo $i \in M$, directamente relacionado con $W_i = \{w_{i1}, w_{i2}, w_{i3}, \dots, w_{in}\}$, que define su puntuación en cada criterio. Los pesos de los DM se definirán mediante los vectores de puntuación.

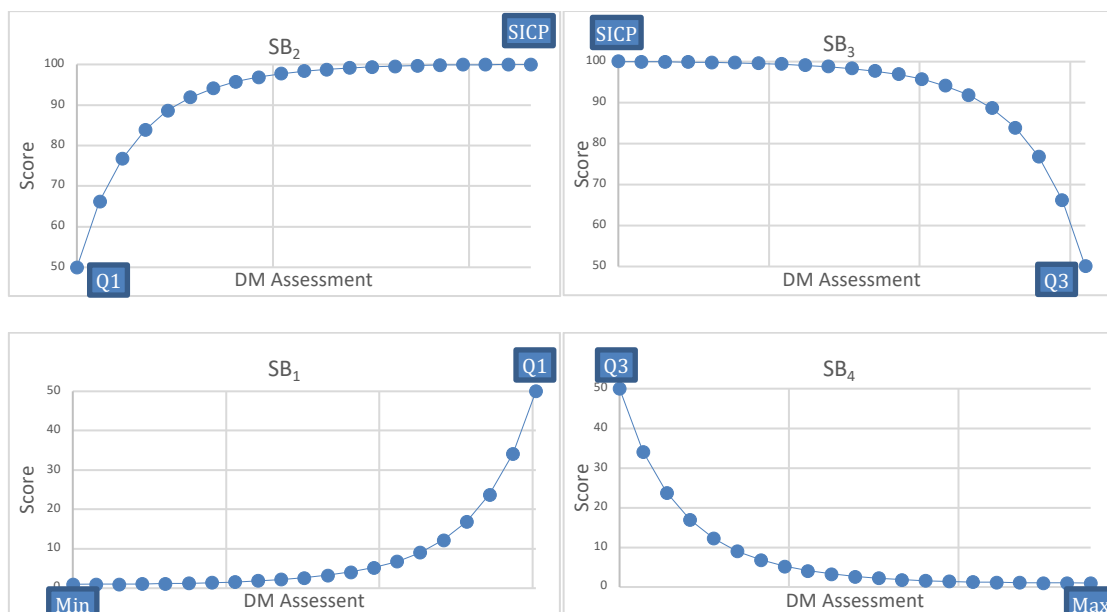


Figura 4.5 – Representación gráfica de la SB y sus cuatro partes.

4.2.5. Resumen y algoritmo del método

Una vez presentados los conceptos sociales y matemáticos utilizados y desarrollados, se muestra el algoritmo HIVES para determinar el consenso y los pesos de los DMs en la Figura 4.6. Esta figura incluye los pasos previos de preparación del MCGDM, que son la selección de los DMs, el análisis de la influencia y la recopilación de evaluaciones. Aunque estos pasos son comunes en todos los procesos de MCGDM, su inclusión se utiliza para mostrar la técnica de votación y la aplicación de la separación de componentes.

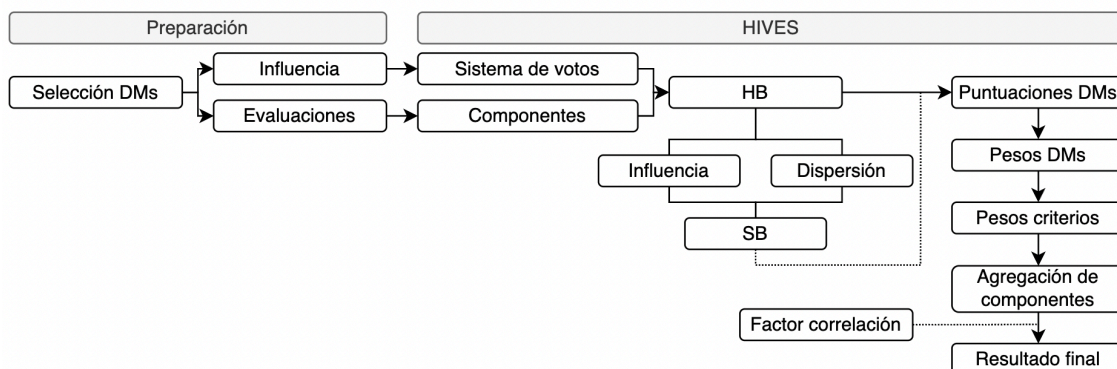


Figura 4.6 –Representación del algoritmo de aplicación de HIVES.

Como se muestra, HIVES se aplica una vez que se ha utilizado la técnica de votación para considerar una posible influencia anterior, y cuándo se ha realizado la separación de componentes para dividir el problema MCGDM en el análisis de c_j . Para cada criterio, hay un conjunto generado por las evaluaciones de los tomadores de decisiones con respecto a su importancia. Para cada uno de ellos, HIVES sigue estos pasos:

- **Paso 1:** Cálculo de SICP. Se utilizan las evaluaciones; mínima, Q1, Q3 y máxima para generar IZ y DZ. SICP se determina mediante la ecuación 4.3.
- **Paso 2:** Designación de la zona de evaluación del DM y derivación de x_{rel} . Como SB se genera mediante 4 funciones con sus respectivos dominios, cada evaluación de cada DM debe posicionarse en una de ellas como se muestra en la Figura 4.4, para obtener su x_{rel} .
- **Paso 3:** Aplicación de la campana de puntuación. Con el x_{rel} de cada evaluación de cada DM, y conociendo la información de IZ, DZ y SICP, se puede aplicar la campana de puntuación mediante las ecuaciones 4.8 a 4.11. Cada DM obtendrá un vector de puntuación S_i directamente relacionado con su W_i .
- **Paso 4:** Peso del criterio del DM. Para cada c_j , cada DM obtiene un porcentaje de puntuación (S_j) con respecto a otros DM. Este porcentaje representa el peso d_i sobre los criterios analizados y se obtiene mediante la ecuación 4.12

$$\lambda_{ij} = \frac{s_{ij}}{\sum_{i=1}^m s_{ij}} \cdot 100 \quad [4.12]$$

- **Paso 5:** Pesos de los criterios. Una vez que los DMs han obtenido sus respectivos pesos de decisión, se utiliza el método WSM para agregar las evaluaciones. Por lo tanto, el peso del criterio c_j , referido como γ_j es calculado mediante la ecuación 4.13.

$$\gamma_j = \sum_{i=1}^m \lambda_{ij} \cdot w_{ij} \quad [4.13]$$

- **Paso 6:** Agregación de componentes. La suma de los criterios puede no ser 100, ya que HIVES maximiza la satisfacción de los DMs en todos los criterios. Esto significa que, en algunos casos, se necesita el factor de corrección mostrado en la ecuación 4.14 para transformar el resultado en $\sum_{j=1}^n \gamma_j = 100$. Este factor de corrección no afecta la decisión final, ya que el aspecto relativo entre los pesos de los criterios se mantiene constante. Entonces, el peso final modificado del criterio γ'_j es calculado mediante la ecuación 4.15.

$$\beta = \frac{100}{\sum_{j=1}^n \gamma_j} \quad [4.14]$$

$$\gamma'_j = \beta \cdot \gamma_j \quad [4.15]$$

4.3. EJEMPLO DE APLICACIÓN

A continuación, se proporciona un problema adaptado de Shih et al. (2007) para ilustrar el método HIVES, y así mostrar paso a paso su aplicación. Además, los resultados obtenidos son comparados con ETOPSIS y Projection (Yue, 2011a, 2012a). Estos métodos han sido seleccionados por tres motivos: (i) Son métodos nuevos y modernos dentro del conjunto MCGDM que han tenido un gran impacto científico en el campo, (ii) se centran en asignar pesos a los DMs analizando sus evaluaciones, por lo que forman parte del mismo subgrupo de clasificación que HIVES, y (iii) ambos son utilizados con números reales no negativos.

4.3.1. Ejemplo ilustrativo

Una empresa química local está tratando de contratar a un gerente en línea, y el departamento de recursos humanos de la empresa proporciona el resultado de las pruebas de selección. Estas pruebas incluyen pruebas de conocimiento (idioma, nivel de educación, profesional y de seguridad) y pruebas de habilidades (profesionales e informáticas). Después de estas pruebas, los candidatos (considerados como alternativas marcadas como A1, A2, ..., A15) obtienen las puntuaciones que se muestran en la Tabla 4.1. Luego, siete DMs (marcados como d_1, d_2, \dots, d_7) dan los pesos que creen que se deben considerar en cada una de las pruebas de selección (consideradas en este ejemplo como

criterios) mostrados en la Tabla 4.2. Se supone que hay equidad de importancia entre los DMs; por lo tanto, tienen el mismo peso inicial.

Tabla 4.1 – Tabla de resultados de las pruebas (criterios) de los candidatos.

Candidatos	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
A1	11	22	16	69	67	16
A2	92	72	10	31	45	36
A3	74	49	15	6	20	42
A4	77	87	72	94	35	98
A5	51	81	13	9	21	75
A6	90	68	12	4	57	39
A7	32	77	13	8	51	90
A8	87	15	37	6	4	31
A9	67	45	38	10	93	42
A10	55	79	14	33	41	61
A11	16	89	80	23	13	45
A12	28	96	11	74	19	17
A13	59	78	75	90	50	93
A14	83	30	68	94	39	13
A15	48	58	34	28	30	20

Tabla 4.2 – Opiniones de peso de las pruebas (criterios) de los decisores.

DMs	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
d ₁	23	8	14	30	15	10
d ₂	10	9	7	45	20	9
d ₃	7	9	14	20	25	25
d ₄	15	10	10	35	20	10
d ₅	38	17	8	20	2	15
d ₆	25	25	15	10	15	10
d ₇	30	20	10	17	13	10

El método HIVES se aplica utilizando esta información. Dado que no existe influencia inicial, primero se debe realizar la separación de componentes:

$$c_1 = \{ 23, 10, 7, 15, 38, 25, 30 \} \quad [4.16]$$

$$c_2 = \{ 8, 9, 9, 10, 17, 25, 20 \} \quad [4.17]$$

$$c_3 = \{ 14, 7, 14, 10, 8, 15, 10 \} \quad [4.18]$$

$$c_4 = \{ 30, 45, 20, 35, 20, 10, 17 \} \quad [4.19]$$

$$c_5 = \{ 15, 20, 25, 20, 2, 15, 13 \} \quad [4.20]$$

$$c_6 = \{ 10, 9, 25, 10, 15, 10, 10 \} \quad [4.21]$$

- **Paso 1:** Cálculo de SICP. Se utilizan las evaluaciones; mínima, Q1, Q3 y máxima para generar IZ y DZ y el SICP se determina mediante la ecuación 4.3, obteniendo los datos mostrados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 – Información de evaluaciones del problema.

	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
Min.	7.00	8.00	7.00	10.00	2.00	9.00
Q1	12.50	9.00	9.00	18.50	14.00	10.00
SICP	21.00	11.25	12.00	23.33	17.50	10.00
Q3	27.50	18.50	14.00	32.50	20.00	12.50
Max.	38.00	25.00	15.00	45.00	25.00	25.00

- **Paso 2:** Designación de la zona de evaluación del DM y derivación de x_{rel} . Utilizando la información contenida en la Tabla 4.3 y las evaluaciones de cada DM, se asigna a cada evaluación la zona y la x_{rel} mostradas en las Tablas 4.4 y 4.5.

Tabla 4.4 – Asignación de zonas a cada evaluación.

DMS	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
d ₁	3	1	3	3	2	3
d ₂	1	2	1	4	3	1
d ₃	1	2	3	2	4	4
d ₄	2	2	2	4	3	3
d ₅	4	3	1	2	1	4
d ₆	3	4	4	1	2	3
d ₇	4	4	2	1	1	3

Tabla 4.5 – Asignación de posición a cada evaluación.

DMS	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
d ₁	2.00	0.00	2.00	6.67	1.00	0.00
d ₂	3.00	0.00	0.00	12.50	2.50	0.00
d ₃	0.00	0.00	2.00	1.50	5.00	12.50
d ₄	2.50	1.00	1.00	2.50	2.50	0.00
d ₅	10.50	5.75	1.00	1.50	0.00	2.50
d ₆	4.00	6.50	1.00	0.00	1.00	0.00
d ₇	2.50	1.50	1.00	7.00	11.00	0.00

- **Paso 3:** Aplicación de la campana de puntuación. Con el x_{rel} de cada evaluación de cada DM, y conociendo la información de IZ, DZ y SICP, se puede aplicar la campana de puntuación mediante las ecuaciones 4.8 a 4.11 para obtener las puntuaciones mostradas en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 – Asignación de puntuaciones a cada evaluación.

DMS	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
d ₁	99.55	1.00	50.00	93.00	93.57	100.00
d ₂	3.20	50.00	1.00	1.00	50.00	1.00
d ₃	1.00	50.00	50.00	94.51	1.00	1.00
d ₄	93.91	97.63	95.26	12.23	50.00	100.00
d ₅	1.00	89.14	2.66	94.51	1.00	12.23
d ₆	96.57	1.00	1.00	1.00	93.57	100.00
d ₇	9.69	10.12	95.26	14.20	26.77	100.00

- **Paso 4:** Peso del criterio del DM. Para cada c_j , cada DM obtiene el porcentaje de peso mostrado en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 – Pesos de los decisores para cada criterio.

DMS	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
d ₁	32.65%	0.33%	16.94%	29.96%	29.62%	24.14%
d ₂	1.05%	16.73%	0.34%	0.32%	15.83%	0.24%
d ₃	0.33%	16.73%	16.94%	30.44%	0.32%	0.24%
d ₄	30.80%	32.66%	32.27%	3.94%	15.83%	24.14%
d ₅	0.33%	29.82%	0.90%	30.44%	0.32%	2.95%
d ₆	31.67%	0.33%	0.34%	0.32%	29.62%	24.14%
d ₇	3.18%	3.39%	32.27%	4.57%	8.47%	24.14%

- **Paso 5:** Pesos de los criterios. Con la información contenida en la Tabla 4.7, se utiliza el método WSM de la ecuación 4.13 para agregar las evaluaciones.

$$\gamma_j = \{ 21.25, 12.14, 11.34, 23.50, 16.40, 10.18 \} \quad [4.22]$$

- **Paso 6:** Agregación de componentes. Dado que la suma de los criterios de la ecuación 4.22 no es 100, se aplica el factor de corrección mostrado en la ecuación 4.14 para obtener los valores finales de la ecuación 4.23.

$$\gamma'_j = \{ 22.41, 12.80, 11.96, 24.78, 17.30, 10.74 \} \quad [4.23]$$

Estos pesos son utilizados para agregar los datos de la Tabla 4.1, obteniendo los valores finales mostrados en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 – Valores finales y solución del problema.

Candidatos	$c_1 \cdot \gamma_2$	$c_2 \cdot \gamma_2$	$c_3 \cdot \gamma_2$	$c_4 \cdot \gamma_2$	$c_5 \cdot \gamma_2$	$c_6 \cdot \gamma_2$	Σ	Ranquin
A1	246.56	281.58	191.43	1710.01	1159.17	171.81	3760.56	10
A2	2062.14	921.53	119.64	768.27	778.55	386.58	5036.70	4
A3	1658.68	627.15	179.47	148.70	346.02	451.01	3411.02	14
A4	1725.92	1113.51	861.43	2329.58	605.54	1052.35	7688.34	1
A5	1143.14	1036.72	155.54	223.04	363.32	805.37	3727.13	12
A6	2017.31	870.33	143.57	99.13	986.16	418.79	4535.30	7
A7	717.27	985.52	155.54	198.26	882.35	966.45	3905.38	9
A8	1950.07	191.98	442.68	148.70	69.20	332.89	3135.52	15
A9	1501.78	575.95	454.64	247.83	1609.00	451.01	4840.21	5
A10	1232.80	1011.12	167.50	817.83	709.34	655.03	4593.63	6
A11	358.63	1139.11	957.15	570.00	224.91	483.22	3733.03	11
A12	627.61	1228.70	131.61	1833.93	328.72	182.55	4333.11	8
A13	1322.46	998.32	897.33	2230.45	865.05	998.66	7312.27	2
A14	1860.41	383.97	813.57	2329.58	674.74	139.60	6201.87	3
A15	1075.90	742.34	406.79	693.92	519.03	214.77	3652.74	13

4.3.2. Comparación con otros métodos

Para comenzar la comparación, se analiza la parte teórica de cada método en la Tabla 4.9. Esta tabla contiene una comparación teórica con las principales características, lo que permite distinguir elementos.

Tabla 4.9 – Comparación teórica entre los métodos ETOPSIS, Proyección y HIVES.

Característica	ETOPSIS	Proyección	HIVES
Base	Selección y ranquin de un número de expertos	Selección y ranquin de un número de expertos	Selección y ranquin de un número de expertos
Necesidad de conocer alternativas	Si	Si	Si
Número de DMs	$N \geq 2$	$N \geq 2$	$N \geq 3$
Aceptación de influencia previa	No	No	Yes
Separación de componentes	No	No	Si
Soluciones ideales	(3) Media, mínima, máxima	(1) Media	(1) Media de la mayoría
Punto clave	Distancia relativa	Proyección de evaluaciones	Puntuación respecto al comportamiento grupal
Factores núcleo	Distancia de cada DM a las ideales	Distancia y ángulo de cada DM a la ideal	Puntuación relativa de cada DM respecto al grupo
Decisión final	Rankin de alternativas	Rankin de alternativas	Ponderación de criterios y ranquin de alternativas
Objetivos	Maximizar rendimiento del grupo de DMs y minimizar el riesgo/arrepentimiento	Maximizar rendimiento del grupo de DMs	Maximizar el rendimiento y la satisfacción del grupo de DMs

Aunque los tres métodos comparten el mismo propósito, existen diferencias que deben ser señaladas. Sin embargo, es importante destacar que cada método tiene sus propias ventajas y desventajas. Por ejemplo, ETOPSIS se puede utilizar no solo para obtener el máximo beneficio, sino también para evitar el máximo riesgo. Además, los métodos ETOPSIS y Proyección son más fáciles de aplicar.

Por otro lado, también se necesita una comparación práctica para evaluar el rendimiento de HIVES en comparación con estos métodos. Con este fin, se utilizan los datos del ejemplo ilustrativo para obtener los vectores de peso de criterios de ETOPSIS y Proyección que se muestran en la Tabla 4.10, juntamente a los resultados de HIVES.

Tabla 4.10 – Resultados obtenidos mediante los métodos ETOPSIS, Proyección y HIVES.

Método	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
HIVES	22,41%	12,80%	11,96%	24,78%	17,30%	10,74%
ETOPSIS	21,00%	13,88%	11,22%	25,45%	15,88%	12,56%
Proyección	22,01%	14,26%	10,99%	25,20%	15,12%	12,43%

Como se puede ver, aunque los valores porcentuales son similares, hay algunas diferencias notables. Los Criterios 1 y 5 obtienen un valor más alto, ya que HIVES ha sido capaz de analizar la existencia de DM discordantes, d_3 y d_5 , y ha aumentado su valor. Lo contrario ocurre en los Criterios 2 y 6, ya que d_3 , d_6 y d_7 dieron valores discordantes y HIVES ha disminuido su valor.

Sin embargo, para analizar el rendimiento de cada método, es necesario realizar una comparación a través de la correlación de clasificaciones. Con este objetivo, se

selecciona el coeficiente de correlación de Spearman (Kendall & Smith, 1939) para evaluar la diferencia estadística entre las clasificaciones, ya que es uno de los coeficientes de comparación de clasificaciones más utilizados (Kannan et al., 2014). Su valor varía de -1 a 1 y se calcula utilizando la ecuación 4.24.

$$\rho = 1 - \frac{6S(d^2)}{(n^3 - n)} \quad [4.24]$$

Dónde

$S(d^2)$ es la suma de diferencias entre dos rangos observados,

n son las alternativas consideradas.

Por lo tanto, las clasificaciones finales de HIVES, ETOPSIS y Proyección deben compararse con la clasificación individual de cada DM. Aplicando los pesos de la Tabla 4.10 a las puntuaciones de los participantes en la Tabla 4.1, tanto los métodos ETOPSIS como Proyección obtienen la misma clasificación final $R = \{A_4, A_{13}, A_{14}, A_2, A_9, A_{10}, A_6, A_{12}, A_7, A_5, A_{11}, A_1, A_{15}, A_3, A_8\}$, pero diferente de la clasificación de HIVES. La correlación de Spearman entre estas clasificaciones y la clasificación de HIVES se muestra en la Tabla 4.11. Esta tabla muestra un valor de correlación para cada DM y el método comparado, incluyendo el valor agregado.

Tabla 4.11 – Correlaciones de Spearman para cada método.

DMs	HIVES	ETOPSIS	Projection
d ₁	0,414	0,471	0,471
d ₂	-0,089	-0,032	-0,032
d ₃	0,146	0,061	0,061
d ₄	0,257	0,143	0,143
d ₅	0,689	0,632	0,632
d ₆	-0,161	-0,304	-0,304
d ₇	0,571	0,514	0,514
Total	1,829	1,486	1,486

Esta tabla destaca la mejora en la correlación que logra el método HIVES. Una de las principales razones de este buen rendimiento radica en la separación de componentes: Aunque algunos DMs han propuesto evaluaciones “sesgadas” respecto al grupo, HIVES ha protegido su ponderación en los criterios que no lo estaban, lo que conduce a un análisis más preciso y justo. Por ejemplo, d₃, d₅, d₆ y d₇, que recibieron un peso menor en algunos criterios debido a su discordancia con el grupo, mejoraron su correlación con la clasificación final. Sin embargo, cabe señalar la disminución de correlación de d₁ y d₂.

En resumen, la aplicación del método ha destacado tres puntos. (i) En primer lugar, HIVES es fácilmente computable incluso en situaciones complejas. (ii) De hecho, HIVES supera a otros métodos en estas situaciones complejas, con un mayor número de criterios y DM. (iii) Se ha demostrado la maximización de beneficios del grupo con HIVES. Utilizando la división de componentes, el método ha sido capaz de detectar las mayorías en cada criterio y generar una clasificación con una mayor correlación de DM, mejorando los beneficios del grupo.

4.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Algunos aspectos técnicos de HIVES deben ser estudiados en detalle para garantizar que se cumplan los axiomas sociales propuestos. En estos casos, el método se prueba típicamente en las situaciones más críticas. En HIVES, las situaciones críticas son aquellas generadas por 3 DM, pues este es el número mínimo de participantes requerido para obtener los datos estadísticos. Además, la existencia de DM "sesgados" podría llevar a una alta alteración de los resultados.

Una vez seleccionado el número de participantes, se propone un doble análisis de sensibilidad, como se muestra en la Figura 4.7. El primero se centra en el comportamiento de HIVES con 3 DM con combinaciones extremas de evaluaciones. Contiene 6 estudios de casos diferentes con 3 tipos posibles de evaluaciones. El primer tipo es Neutral (N), en el que todos los criterios tienen el mismo valor. El segundo tipo es Extremista (E), en el que solo importa un criterio. El último tipo es Sesgado (B), en el que se sacrifica un criterio en beneficio de otro.

El segundo análisis de sensibilidad se centra en la influencia previa y la técnica de votación. Contiene 3 estudios de casos diferentes en relación con influencias mínimas, diferencias sutiles e influencias significativas.

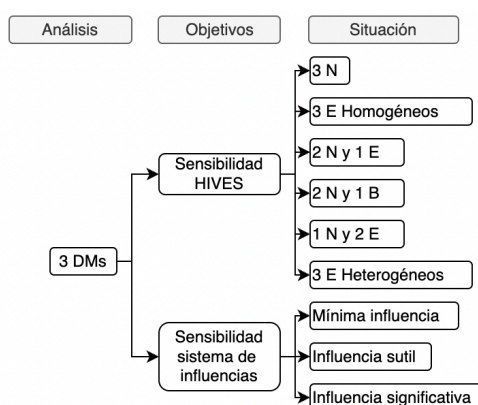


Figura 4.7 –Análisis de sensibilidad propuestos.

4.4.1. Análisis de sensibilidad de HIVES

Como se muestra en la Figura 4.7, se lleva a cabo un análisis del comportamiento de HIVES con 3 DMs, considerando 6 situaciones. Además, estas situaciones consideran DM+1 criterios para resaltar las distribuciones de pesos.

Primero, dos situaciones están relacionadas con un punto de vista unificado. Se consideran 3 evaluaciones Neutrales que tienen en cuenta la equidad de los pesos de los criterios y 3 evaluaciones Extremistas Homogéneas que consideran los mismos criterios al mismo tiempo. En segundo lugar, las situaciones 3 a 5 están relacionadas con una mayoría de consenso. En estos casos, 2 de los 3 DMs comparten intereses.

La última situación presenta un desacuerdo total. Todos los DMs utilizan evaluaciones Extremistas, aunque cada uno se centra en un criterio diferente.

La Tabla 4.12 muestra el grupo de DMS, expresado como $D = \{d_1, d_2, d_3\}$, y el conjunto de criterios propuestos $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$. Para cada $c_j, j \in N$. Cada DM asigna un peso a cada criterio obteniendo el vector de pesos denominado $W_i = \{w_1, w_2, w_3, w_4\}, i \in M$. En la misma tabla se muestran las asignaciones de pesos de los DMs obtenidas mediante HIVES para cada criterio, expresadas como $\lambda_i = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4\}, i \in M$, y el resultado final de la agregación ponderada.

Tabla 4.12 – Resultados del análisis de sensibilidad de HIVES.

		c_1	c_2	c_3	c_4	c_1	c_2	c_3	c_4	
d_1	Situación 1	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	Situación 2
d_2		25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
d_3		25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
λ_1		33.33%	33.33%	33.33%	33.33%	33.33%	33.33%	33.33%	33.33%	
λ_2		33.33%	33.33%	33.33%	33.33%	33.33%	33.33%	33.33%	33.33%	
λ_3		33.33%	33.33%	33.33%	33.33%	33.33%	33.33%	33.33%	33.33%	
Resultado		25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
d_1	Situación 3	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	Situación 4
d_2		25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	
d_3		100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	25.00%	25.00%	0.00%	50.00%	
λ_1		49.75%	49.75%	49.75%	49.75%	33.33%	33.33%	49.75%	49.75%	
λ_2		49.75%	49.75%	49.75%	49.75%	33.33%	33.33%	49.75%	49.75%	
λ_3		0.50%	0.50%	0.50%	0.50%	33.33%	33.33%	0.50%	0.50%	
Resultado		25.37%	24.88%	24.88%	24.88%	25.00%	25.00%	24.88%	25.12%	
d_1	Situación 5	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	Situación 6
d_2		100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	
d_3		25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	
λ_1		49.75%	49.75%	49.75%	49.75%	0.50%	49.75%	49.75%	33.33%	
λ_2		49.75%	49.75%	49.75%	49.75%	49.75%	0.50%	49.75%	33.33%	
λ_3		0.50%	0.50%	0.50%	0.50%	49.75%	49.75%	0.50%	33.33%	
Resultado		99.63%	0.12%	0.12%	0.12%	33.33%	33.33%	33.33%	0.00%	

4.4.2. Análisis de sensibilidad del sistema de influencias previas

El impacto de considerar el sistema de influencia previa de HIVES se estudia mediante un análisis de votación. Este análisis permite mostrar cómo cambian los pesos de los DM a medida que cambian sus evaluaciones (mientras que la influencia inicial es estática), para arrojar luz sobre la relación entre la influencia inicial de los DMs y la influencia final asignada por HIVES.

Como se muestra en la Figura 4.7, el análisis considera un grupo de 3 DM expresado como $D = \{d_1, d_2, d_3\}$ en 3 situaciones diferentes. Solo se considera un criterio con el objetivo de centrar en análisis en el flujo de pesos de los DMs, y en cada situación se consideran los dos escenarios mostrados en la Tabla 4.13. El estudio de los pesos obtenidos por los DMs en cada escenario permitirá conocer cómo HIVES asigna pesos y cómo cambian en la situación propuesta. Además, ambas muestras se preparan para contener puntos críticos de evaluación como la nulidad, el promedio y la totalidad.

Tabla 4.13 – Valor del criterio en los dos escenarios para cada decisor.

	c ¹	c ²
d ₁	00.00%	50.00%
d ₂	50.00%	0.00%
d ₃	100.00%	100.00%

Una vez presentadas las características del análisis, la técnica de votación se aplica en las tres situaciones. Para cada situación, se propone un vector de porcentaje de influencia inicial de los DMs, expresado como $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}$, donde $\sum_{i=1}^3 \alpha_i = 100, i \in M$:

- La primera situación posiciona a un DM con una influencia menor en la decisión, como, por ejemplo, la opinión pública sobre proyectos o decisiones municipales. La propuesta α para esta situación es $\alpha = \{5, 40, 55\}$, donde el primer DM presenta la menor influencia.
- La segunda situación considera una diferencia sutil de influencia entre los DM, como, por ejemplo, la influencia de un cargo en concreto en una empresa. En estos casos, es común que un CEO tenga un voto o influencia doble. La propuesta α para esta situación es $\alpha = \{20, 40, 40\}$.
- La última situación estudia el impacto de un DM dominante en la decisión. Como ejemplo, están las decisiones administrativas o empresariales donde se deben considerar opiniones secundarias. La propuesta α para esta situación es $\alpha = \{10, 10, 80\}$.

Los vectores α propuestos se traducen en votos mediante la ecuación de votación 4.1. Estos se expresan como $V = \{v_1, v_2, v_3\}$, correspondientes al voto respectivo de cada DM. Con esta ecuación, se obtienen los siguientes números de votos: $V_{S1} = \{1, 8, 11\}$, $V_{S2} = \{1, 2, 2\}$, $V_{S3} = \{1, 1, 8\}$ para cada situación. Como la metodología HIVES se ha presentado claramente en la sección anterior, los resultados se muestran directamente en la Tabla 15. La Tabla 4.14 contiene los votos, evaluaciones y pesos obtenidos por los DM, así como el resultado final.

Tabla 4.14 – Resultados del análisis de influencia inicial.

	Situación 1		Situación 2		Situación 3	
	c ¹	c ²	c ¹	c ²	c ¹	c ²
v ₁	1		1		1	
v ₂	8		2		1	
v ₃	11		2		8	
d ₁	0.00%	50.00%	0.00%	50.00%	0.00%	50.00%
d ₂	50.00%	0.00%	50.00%	0.00%	50.00%	0.00%
d ₃	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
λ_1	0.11%	9.52%	0.50%	33.33%	0.12%	0,33%
λ_2	42.06%	38.10%	49.75%	33.33%	0.33%	0,12%
λ_3	57.83%	52.38%	49.75%	33.33%	99.54%	99,54%
Resultado	78.86%	57.14%	74.62%	50.00%	99.71%	99.71%

4.4.3. Discusión de los resultados obtenidos

En cuanto al análisis de sensibilidad del comportamiento de HIVES, el método ha presentado las reacciones esperadas. Primeramente, en situaciones en las que los DMs presentan un punto de vista unificado, sus pesos se distribuyen de manera equitativa. Esta paridad se obtiene porque todas sus evaluaciones coinciden con el SICP. Una condición similar se muestra en las situaciones 3, 4 y 5. HIVES puede detectar la mayoría del grupo (2 DMs) y permite priorizar los intereses compartidos.

Aun así, es necesario tener en cuenta la consideración de los DMs discordantes para cumplir con el Axioma 5. Con un peso de decisión bajo, este DM puede modificar ligeramente la decisión final. Además, esta ligera modificación está relacionada con la fuerza de la evaluación discordante. Se demuestra el cumplimiento del Axioma 4 de no dictadura, ya que las otras evaluaciones no tienen preferencias.

Cuando estos DMs tienen una preferencia clara, como en la situación 5, la evaluación neutral no modifica la priorización de los criterios. En este caso, c_1 se mantiene como el primer criterio mientras que los c_2 a c_4 reciben un peso mínimo. Al mismo tiempo, las situaciones 2, 3, 4 y 5 demuestran el cumplimiento del Axioma 2. Cuando la mayoría presenta una preferencia de criterio, el resultado es coherente con esta preferencia.

Por otro lado, la situación 6 presenta un desacuerdo completo entre los DMs. HIVES detecta la mayoría en las evaluaciones nulas, asignando equidad entre los pesos. En esta situación, al igual que en la situación 2, se cumple por completo el Axioma 3 de independencia de criterios irrelevantes. Se destaca que estos criterios (c_4 y c_2 , c_3 , c_4 en las situaciones 6 y 2 respectivamente) se pueden eliminar sin afectar el proceso.

La conclusión del análisis de sensibilidad del comportamiento de HIVES es que se ha obtenido un buen rendimiento. Se han podido calcular todas las situaciones críticas, lo que garantiza el cumplimiento del Axioma 1. Además, la división de componentes presenta un avance importante, ya que permite considerar múltiples análisis asignando diferentes pesos a los DMs en función del grupo. Estos pesos dependen únicamente de las evaluaciones que han dado los DMs, y cuando se da una evaluación sesgada o extrema, HIVES puede reducir su impacto.

El análisis de sensibilidad de la influencia previa también ha mostrado unos resultados prometedores. En los 3 estudios de caso, se resalta la importancia de las evaluaciones de los DMs y el número de votos que emiten. Por ejemplo, en la situación 1, d_1 multiplica su peso de decisión en más del 86% del caso 1 al caso 2. Este aumento de influencia significativo se genera por la posición de evaluación de d_1 , ya que en el caso 2 de la situación 1, el SICP se sitúa en el 57.50%. Al proponer la evaluación más cercana al SICP, d_1 obtiene un gran aumento de influencia. Este efecto de distancia con respecto al SICP también se puede observar en la situación 2; con solo un voto en el caso 2, d_1 asume el mismo peso que los otros DMs (que duplican su influencia inicial).

Otra característica de la técnica de votación de HIVES es la proporcionalidad de los votos. En las situaciones 1 y 2, los d_2 y d_3 obtienen un peso proporcional en relación con el número de votos. En la situación 1 del caso 1, cada voto corresponde al 5.26% del peso, y

se asigna un 42.06% y un 57.83% del peso a d_2 y d_3 respectivamente, con 8 y 11 votos. En la situación 2, caso 2, d_2 y d_3 obtienen un peso del 49.75% ya que cada voto corresponde a un 24.88% del peso.

Esta particularidad se puede explicar por cómo la técnica de votación afecta a las matemáticas estadísticas inherentes a HIVES. El primer y tercer cuartil se ven alterados por las evaluaciones repetidas N veces, generando la IZ entre las evaluaciones de d_2 y d_3 . Si la evaluación del DM restante no se encuentra dentro de este intervalo, HIVES considera el SICP como el promedio de estos valores, asignando el mismo peso a cada voto de la IZ. Por otro lado, si la evaluación del DM restante se encuentra dentro de la zona de influencia, esta afecta a la generación del SICP, obteniendo un peso mayor.

La situación 3 examina cómo HIVES puede ser monopolizado con suficiente influencia previa. En ambos casos, se muestra que el Axioma 4 de no dictadura no se cumple. Sin embargo, este Axioma carece de sentido con esta diferencia de influencia, pues son decisiones que, de antemano, son dirigidas por un decisor. En cualquier condición en la que un DM tenga una influencia tan grande, el Axioma 4 debe ser ignorado.

Además, la técnica de votación de HIVES ha asegurado el cumplimiento del Axioma 1 de dominio universal y del Axioma 5 de reconocimiento. Cualquier influencia previa puede ser procesada y cada DM está representado en la decisión final, obteniendo resultados coherentes según la posición que toma cada decisor.

4.5. CASO DE ESTUDIO

En esta sección se muestra un caso de estudio de HIVES aplicado a un estudio real. Como punto de partida, se han tomado los datos del estudio de evaluación y priorización de infraestructuras llevado a cabo por el ayuntamiento de Barcelona (Pujadas et al., 2017), pues es de extremo interés para la presente Tesis Doctoral. Utilizando estos datos, en la primera subsección se aplica HIVES para obtener los resultados del estudio en base a la consideración de las múltiples partes interesadas que conforman el gobierno del ayuntamiento. Este estudio se lleva a cabo considerando influencia inicial y equidad, para poder llevar a cabo un análisis de comportamiento.

Además, en la segunda subsección se muestra el análisis de resultados, y en la tercera, de nuevo la comparación práctica con los métodos ETOPSIS y Proyección ya conocidos.

4.5.1. Caso de estudio

La administración pública de Barcelona lanzó una convocatoria para propuestas de mantenimiento y mejora de infraestructuras municipales. En la convocatoria de propuestas, se sugirieron los 15 proyectos mostrados en la Tabla 4.15 como el conjunto de alternativas $A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_{15}\}$.

Tabla 4.15 – Alternativas presentadas para ser evaluadas. Fuente: Pujadas et al. (2017).

	Descripción del proyecto	Distrito
A ₁	Urbanización del área alrededor del nuevo edificio para realojamiento social.	Sant Andreu
A ₂	Ampliación del área de acera, trasladando las terrazas de bares y el estacionamiento de motocicletas más cerca de la carretera.	Eixample
A ₃	Aumento del número y la variedad de la flora y fauna en el área de Collserola.	Barcelona ciudad
A ₄	Optimización del número y la distribución de las luces en toda la ciudad.	Barcelona ciudad
A ₅	Programa de expropiación de suelos para desarrollar el proyecto de transformación de barrios.	Les Corts
A ₆	Proyecto inicial para recopilar todos los diferentes puntos de vista de las partes interesadas, con dimensiones sociales y ambientales especiales.	Eixample
A ₇	Obras para consolidar el sistema de alcantarillado en el área.	Sants Montjuic
A ₈	Enumeración de los principales problemas para crear una nueva metodología de evaluación de la variedad de calles en la ciudad.	Barcelona ciudad
A ₉	Programa del ayuntamiento para resolver los problemas de suelo para viviendas.	Barcelona ciudad
A ₁₀	Creación de una nueva metodología con una perspectiva de Ciudad Inteligente para repensar el espacio social.	Barcelona ciudad
A ₁₁	Implementación de medidas para evaluar la eficiencia de las acciones actuales en la evaluación de la calidad del aire.	Barcelona ciudad
A ₁₂	Plan social para promover una cultura de ahorro de energía entre los ciudadanos.	Barcelona ciudad
A ₁₃	Reorganización de los espacios públicos, mejorando los jardines y las entradas del metro.	Gràcia
A ₁₄	Túnel urbano para redirigir el tráfico de Barcelona en uno de los puntos de mayor densidad de tráfico.	Sant Martí
A ₁₅	Organización del área con una perspectiva sostenible y equitativa, incorporando las perspectivas de todas las partes interesadas.	Sant Martí

Sin embargo, debido a la falta de fondos públicos, los proyectos propuestos tuvieron que ser priorizados utilizando un método MCDM. MIVES fue el método elegido para generar un índice de priorización basado en la sostenibilidad, generando el árbol jerárquico mostrado en la Figura 4.8, que se basa en 8 indicadores. En la etapa inicial del proceso, cada alternativa obtuvo los valores mostrados en la Tabla 4.16. Cabe destacar que, para este caso de estudio, los indicadores de Pujadas se consideran criterios.

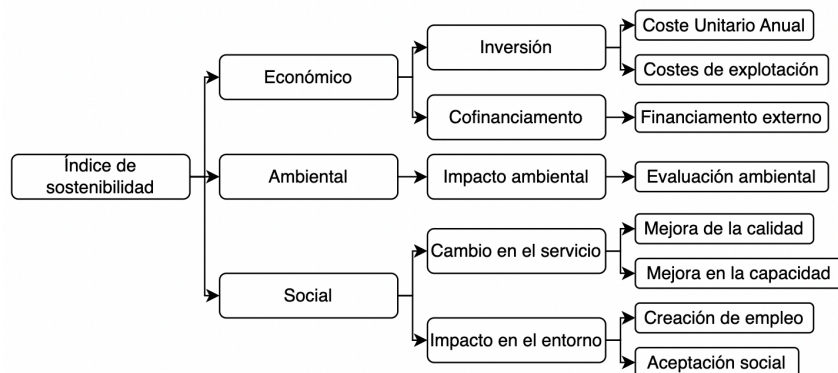


Figura 4.8 –Árbol jerárquico utilizado en el caso de estudio.

Tabla 4.16 – Valores de las alternativas presentadas. Fuente: Pujadas et al. (2017).

	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇	c ₈
A ₁	0.50	0.46	0.00	0.27	0.47	0.42	0.08	1.00
A ₂	0.96	0.25	0.02	0.12	0.40	0.64	0.02	1.00
A ₃	0.66	0.27	0.00	0.72	0.73	0.89	0.27	1.00
A ₄	0.01	0.48	0.00	0.19	0.24	0.20	0.32	0.75
A ₅	0.98	0.60	0.00	0.48	0.67	0.55	0.08	1.00
A ₆	0.96	0.49	0.00	0.47	0.48	0.75	0.02	1.00
A ₇	0.77	0.81	0.00	0.39	0.58	0.87	0.27	1.00
A ₈	0.89	0.49	0.00	0.35	0.26	0.62	0.17	0.75
A ₉	0.56	0.67	0.00	0.31	0.37	0.62	0.61	0.50
A ₁₀	1.00	0.27	0.05	0.78	0.84	0.79	1.00	1.00
A ₁₁	0.19	0.69	0.04	0.58	0.66	0.77	0.61	0.75
A ₁₂	0.43	0.69	0.04	0.58	0.18	0.64	0.61	0.75
A ₁₃	0.98	0.46	0.00	0.27	0.32	0.72	0.04	1.00
A ₁₄	0.85	0.21	0.01	0.37	0.56	0.58	0.38	1.00
A ₁₅	0.14	0.23	0.00	0.67	0.74	0.83	0.22	1.00

Sin embargo, en ese estudio solo se consideraron los pesos propuestos por expertos para el conjunto de criterios. Aunque estos eran proyectos públicos para un ayuntamiento que representa a los ciudadanos a través de diferentes partidos políticos, no se tuvo en cuenta su opinión en la decisión. Por lo tanto, se aplica HIVES para tener en cuenta a los partidos políticos existentes en el ayuntamiento.

Aplicación de HIVES considerando influencia inicial

Para agregar los valores de la Tabla 4.16, se decide considerar la opinión de los distintos partidos políticos del ayuntamiento sobre la importancia de cada criterio. La introducción de estas partes interesadas debe llevarse a cabo manteniendo la representación ciudadana que estos tienen, por lo cual se propone el siguiente proceso:

- **Paso 1:** Los expertos deciden que los interesados serán ellos mismos, como profesionales, y los partidos políticos del órgano de gobierno institucional, el ayuntamiento de Barcelona.
- **Paso 2:** El Ayuntamiento de Barcelona está compuesto por seis partidos políticos que representan a sus ciudadanos: ERC (d₂), BCNC (d₃), PSC (d₄), Ciudadanos (d₅), Junts (d₆) y PP (d₇), con 10, 10, 8, 6, 5 y 2 escaños, respectivamente. Considerando a los expertos (d₁), se obtiene un conjunto de DMs denotado como $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_7\}$. Considerando las participaciones porcentuales, los expertos tienen un peso del 14.29% (1/7 de los DM), y los partidos políticos asignan el 85.71% restante (6/7 de los DM) de influencia según su representación, obteniendo pesos del 20.90%, 20.90%, 16.72%, 12.54%, 10.45% y 4.18%, respectivamente.
- **Paso 3:** Una vez encontrados los pesos de influencia inicial para cada interesado, se aplica la ecuación 4.1 para obtener sus respectivos v_i , representados por el conjunto V denotado como $V = \{3, 5, 5, 4, 3, 2, 1\}$.

Finalmente, los expertos recopilan la opinión de cada grupo político, obteniendo los valores de evaluación mostrados en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17 – Opiniones del peso de los criterios de cada decisor.

	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇	c ₈
d ₁	11.20	4.80	4.00	40.00	10.00	10.00	6.00	14.00
d ₂	7.35	3.15	4.50	45.00	19.60	8.40	6.00	6.00
d ₃	1.80	4.20	14.00	20.00	18.00	18.00	7.20	16.80
d ₄	9.00	6.00	10.00	35.00	18.00	2.00	10.00	10.00
d ₅	37.80	16.20	6.00	20.00	1.80	16.20	1.80	0.20
d ₆	8.34	8.34	16.67	33.33	8.33	8.33	8.33	8.33
d ₇	38.40	9.60	12.00	10.00	4.80	19.20	4.80	1.20

Con esta información, se aplica HIVES:

- **Paso 1:** Cálculo de SICP. Se utilizan las evaluaciones; mínima, Q1, Q3 y máxima para generar IZ y DZ y el SICP se determina mediante la ecuación 4.3, obteniendo los datos mostrados en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18 – Información de evaluaciones del problema.

	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇	c ₈
Min.	1.80	3.15	4.00	10.00	1.80	2.00	1.80	0.20
Q1	7.35	4.20	4.50	20.00	9.17	8.37	6.00	6.00
SICP	8.79	4.95	9.03	28.63	16.00	10.96	6.46	9.19
Q3	11.20	7.17	14.00	40.00	18.00	17.10	7.77	14.00
Max.	38.40	16.20	16.67	45.00	19.60	19.20	10.00	16.80

- **Paso 2:** Designación de la zona de evaluación del DM y derivación de x_{rel} . Utilizando la información contenida en la Tabla 4.18 y las evaluaciones de cada DM, se asigna a cada evaluación una zona y su x_{rel} .
- **Paso 3:** Aplicación de la campana de puntuación. Con el x_{rel} de cada evaluación de cada DM, y conociendo la información de IZ, DZ y SICP, se puede aplicar la campana de puntuación mediante las ecuaciones 4.8 a 4.11 para obtener las puntuaciones mostradas en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19 – Asignación de puntuaciones a cada evaluación.

DMs	v _i	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇	c ₈
d ₁	3	50.00	99.83	1.00	50.00	80.28	99.28	50.00	50.00
d ₂	5	50.00	1.00	50.00	1.00	1.00	54.92	50.00	50.00
d ₃	5	1.00	50.00	50.00	50.00	50.00	3.59	97.48	1.00
d ₄	4	99.97	98.59	99.84	97.56	50.00	1.00	1.00	99.88
d ₅	3	1.00	1.00	95.20	50.00	1.00	83.48	1.00	1.00
d ₆	2	99.52	19.42	1.00	99.04	21.68	47.97	8.85	99.67
d ₇	1	1.00	8.07	96.92	1.00	1.91	1.00	7.36	1.12

- **Paso 4:** Peso del criterio del DM. Para cada c_j , cada DM obtiene el porcentaje de peso mostrado en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20 – Pesos de los decisores para cada criterio.

DMs	v_i	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8
d ₁	3	4.96%	10.00%	0.08%	4.37%	10.79%	10.54%	5.44%	4.96%
d ₂	5	4.96%	0.10%	3.89%	0.09%	0.13%	5.83%	5.44%	4.96%
d ₃	5	0.10%	5.01%	3.89%	4.37%	6.72%	0.38%	10.60%	0.10%
d ₄	4	9.92%	9.87%	7.76%	8.53%	6.72%	0.11%	0.11%	9.91%
d ₅	3	0.10%	0.10%	7.40%	4.37%	0.13%	8.86%	0.11%	0.10%
d ₆	2	9.87%	1.94%	0.08%	8.65%	2.91%	5.09%	0.96%	9.89%
d ₇	1	0.10%	0.81%	7.53%	0.09%	0.26%	0.11%	0.80%	0.11%

- **Paso 5:** Pesos de los criterios. Con la información contenida en la Tabla 4.20, se utiliza el método WSM de la ecuación 4.13 para agregar las evaluaciones.

$$\gamma_j = \{8.87, 5.33, 8.97, 30.14, 14.76, 11.14, 6.68, 9.27\} \quad [4.25]$$

- **Paso 6:** Agregación de componentes. Dado que la suma de los criterios de la ecuación 4.25 no es 100, se aplica el factor de corrección mostrado en la ecuación 4.14 para obtener los valores finales de la ecuación 4.26.

$$\gamma'_j = \{9.32, 5.60, 9.43, 31.68, 15.51, 11.71, 7.02, 9.74\} \quad [4.26]$$

Estos pesos son utilizados para agregar los datos de la Tabla 4.16, obteniendo los valores finales mostrados en la Tabla 4.21 y un ranquin $R^1 = \{A_{10}, A_3, A_{15}, A_{11}, A_7, A_5, A_6, A_{14}, A_{12}, A_{13}, A_8, A_9, A_1, A_2, A_4\}$.

Tabla 4.21 – Resultados de agregación por alternativa.

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	Σc
A ₁	4.66	2.57	0.00	8.55	7.29	4.92	0.56	9.74	38.298
A ₂	8.95	1.40	0.19	3.80	6.20	7.49	0.14	9.74	37.915
A ₃	6.15	1.51	0.00	22.81	11.32	10.42	1.89	9.74	63.852
A ₄	0.09	2.69	0.00	6.02	3.72	2.34	2.24	7.31	24.415
A ₅	9.13	3.36	0.00	15.21	10.39	6.44	0.56	9.74	54.833
A ₆	8.95	2.74	0.00	14.89	7.45	8.78	0.14	9.74	52.687
A ₇	7.18	4.53	0.00	12.36	9.00	10.19	1.89	9.74	54.883
A ₈	8.29	2.74	0.00	11.09	4.03	7.26	1.19	7.31	41.916
A ₉	5.22	3.75	0.00	9.82	5.74	7.26	4.28	4.87	40.939
A ₁₀	9.32	1.51	0.47	24.71	13.03	9.25	7.02	9.74	75.049
A ₁₁	1.77	3.86	0.38	18.38	10.24	9.02	4.28	7.31	55.224
A ₁₂	4.01	3.86	0.38	18.38	2.79	7.49	4.28	7.31	48.493
A ₁₃	9.13	2.57	0.00	8.55	4.96	8.43	0.28	9.74	43.676
A ₁₄	7.92	1.18	0.09	11.72	8.69	6.79	2.67	9.74	48.797
A ₁₅	1.30	1.29	0.00	21.23	11.48	9.72	1.54	9.74	56.300

Aplicación de HIVES considerando equidad

En este caso, se aplica HIVES con un valor de $v=1$ para cada DM. Para no repetir todo el proceso, se muestra únicamente la Tabla 4.22 de resultados obtenida, utilizada para obtener el ranquin final $R^2 = \{A_{10}, A_3, A_7, A_{11}, A_{15}, A_5, A_6, A_{12}, A_{14}, A_{13}, A_8, A_9, A_2, A_1, A_4\}$.

Tabla 4.22 – Resultados de agregación por alternativa, en escenario de equidad.

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	Σc
A ₁	5.11	3.27	0.00	8.54	6.11	5.12	0.55	8.77	37.467
A ₂	9.81	1.78	0.20	3.80	5.20	7.80	0.14	8.77	37.495
A ₃	6.74	1.92	0.00	22.78	9.49	10.85	1.85	8.77	62.398
A ₄	0.10	3.41	0.00	6.01	3.12	2.44	2.19	6.57	23.850
A ₅	10.01	4.27	0.00	15.18	8.71	6.71	0.55	8.77	54.196
A ₆	9.81	3.48	0.00	14.87	6.24	9.14	0.14	8.77	52.450
A ₇	7.87	5.76	0.00	12.34	7.54	10.61	1.85	8.77	54.728
A ₈	9.09	3.48	0.00	11.07	3.38	7.56	1.16	6.57	42.328
A ₉	5.72	4.76	0.00	9.81	4.81	7.56	4.18	4.38	41.222
A ₁₀	10.22	1.92	0.51	24.67	10.93	9.63	6.85	8.77	73.491
A ₁₁	1.94	4.91	0.41	18.35	8.58	9.39	4.18	6.57	54.326
A ₁₂	4.39	4.91	0.41	18.35	2.34	7.80	4.18	6.57	48.950
A ₁₃	10.01	3.27	0.00	8.54	4.16	8.78	0.27	8.77	43.805
A ₁₄	8.69	1.49	0.10	11.70	7.28	7.07	2.60	8.77	47.707
A ₁₅	1.43	1.64	0.00	21.19	9.62	10.12	1.51	8.77	54.275

4.5.2. Análisis de resultados

Para analizar el rendimiento de HIVES en este caso de estudio, se utiliza nuevo el coeficiente de Spearman (Kendall & Smith, 1939) aplicado en el análisis del ejemplo ilustrativo. Mediante la ecuación 4.24 se obtienen los datos de la Tabla 4.23, que contiene los ránquines individuales de cada DM y los ránquines obtenidos a través de las aplicaciones de HIVES con influencia inicial (S_1) y con equidad (S_2), así como las influencias y las correlaciones de cada DM en cada caso.

Como se puede observar, HIVES muestra un rendimiento destacado considerando la existencia de influencias políticas. Aquellos DMs con más poder en S_1 que en S_2 (d_2 , d_3 y d_4) ven mejorar su correlación con el resultado obtenido, mientras que aquellos con una influencia reducida (d_5 , d_6 y d_7) muestran una disminución en la correlación. Es importante mencionar que esta relación entre pesos y correlación puede no ser siempre lineal o directa. Un DM cuyo peso se reduce, pero cuya opinión está cercana a la de un DM de alta importancia recibirá un peso mayor por parte del sistema HIVES, y su correlación se incrementará. Por ejemplo, d_1 muestra una mayor correlación en S_1 , a pesar de que su peso inicial es el mismo en ambos escenarios. La razón es el alto grado de consenso que d_1 tiene con d_2 , d_3 y d_4 , a los cuales se les ha asignado un peso elevado. Con d_2 , hay una diferencia de menos del 5% en 6 criterios y menos del 10% en los otros 2. Con d_3 , hay una diferencia de menos del 5% en 3 criterios y menos del 10% en 4. Finalmente, con d_4 , hay una diferencia de menos del 5% en 5 criterios y menos del 10% en los otros 3.

Más allá de la proximidad de las evaluaciones, el proceso de separación de componentes de HIVES garantiza la equidad de la decisión, tal y como se ha mostrado en el ejemplo ilustrativo. De nuevo, aunque algunos DMs propusieron juicios "sesgados" en algunos criterios, alejados de las opiniones de otros DMs, el análisis múltiple por componentes ha protegido su peso en criterios "no sesgados". Por ejemplo, los datos de la Tabla 4.20 muestran que d_1 tiene un 29.99% de peso de decisión en c_2 , pero solo un 0.23% en c_3 .

Tabla 4.23 – Análisis de los resultados del caso de estudio.

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	S_1	S_2
A ₁₀	A ₁₀	A ₁₀	A ₁₀	A ₁₀	A ₁₀	A ₁₀	A ₁₀	A ₁₀
A ₃	A ₃	A ₃	A ₃	A ₆	A ₃	A ₆	A ₃	A ₃
A ₁₅	A ₁₅	A ₁₅	A ₁₁	A ₅	A ₁₁	A ₅	A ₁₅	A ₇
A ₅	A ₁₁	A ₁₁	A ₁₅	A ₇	A ₇	A ₇	A ₁₁	A ₁₁
A ₆	A ₅	A ₇	A ₅	A ₁₃	A ₁₅	A ₁₃	A ₇	A ₁₅
A ₇	A ₇	A ₅	A ₇	A ₃	A ₅	A ₃	A ₅	A ₅
A ₁₁	A ₆	A ₆	A ₆	A ₈	A ₁₂	A ₈	A ₆	A ₆
A ₁₂	A ₁₂	A ₁₄	A ₁₄	A ₁₄	A ₆	A ₂	A ₁₄	A ₁₂
A ₁₄	A ₁₄	A ₁₂	A ₁₂	A ₂	A ₁₄	A ₁₄	A ₁₂	A ₁₄
A ₁₃	A ₈	A ₁₃	A ₉	A ₁₂	A ₁₃	A ₉	A ₁₃	A ₁₃
A ₈	A ₁₃	A ₁	A ₁₃	A ₉	A ₈	A ₁₂	A ₈	A ₈
A ₉	A ₉	A ₂	A ₈	A ₁₁	A ₉	A ₁₁	A ₉	A ₉
A ₁	A ₁	A ₉	A ₁	A ₁	A ₁	A ₁	A ₁	A ₂
A ₂	A ₂	A ₈	A ₂	A ₁₅	A ₂	A ₁₅	A ₂	A ₁
A ₄	A ₄	A ₄	A ₄	A ₄	A ₄	A ₄	A ₄	A ₄
14.29%	20.90%	20.90%	16.72%	12.54%	10.45%	4.18%	Influencia inicial (S_1)	
14.29%	14.29%	14.29%	14.29%	14.29%	14.29%	14.29%	Influencia inicial (S_2)	
0.00%	6.62%	6.62%	2.44%	-1.74%	-3.83%	-10.10%	Influencia inicial (Δ)	
0.868	0.882	0.646	0.854	0.207	0.643	0.068	Correlación (S_1)	
0.621	0.607	0.407	0.664	0.300	0.811	0.332	Correlación (S_2)	
0.246	0.275	0.239	0.189	-0.093	-0.168	-0.264	Correlación (Δ)	

Finalmente, se debe destacar el alto grado de correlación obtenido en S_1 . Aunque HIVES busca maximizar el beneficio y beneficio del grupo de DMs, el enfoque propuesto S_1 (4.168) muestra un valor de correlación aún mayor que la igualdad S_2 (3.742). La razón principal radica en el uso de la influencia previa, pues HIVES utiliza las reglas de la teoría de elección social como restricciones matemáticas para garantizar un resultado equitativo, ético, objetivo y justo para todas las partes interesadas. Sin embargo, como explica el desarrollo de HIVES, la influencia previa obliga al método a ignorar uno de estos Axiomas (no dictadura). Por lo tanto, HIVES identifica la mayoría (o el grupo más influyente) y mejora sus ganancias al tiempo que reduce la correlación de las partes interesadas con juicios sesgados. En lo referente a la comparación con los datos obtenidos en el estudio original, debido que solo se consideraron las opiniones de los expertos, el ranquin de ese estudio equivale al ranquin del primer decisor en la Tabla 4.23. Siguiendo la ecuación 4.24, el vector de correlación de Pearson para cada d_i es $P = \{1, 0.800, 0.514, 0.657, 0.089, 0.746, 0.121\}$, lo que conduce a una correlación del grupo de 3.929. Es notable cómo este valor es mayor que la correlación de S_2 (3.742), en la que se ha considerado la opinión de cada parte interesada, pero no se ha contemplado el poder político. La razón principal de

este resultado es la misma que en el análisis anterior: el alto grado de consenso que d_1 tiene con d_2 , d_3 y d_4 , generando un grupo mayoritario en la decisión.

Sin embargo, es importante mencionar que más allá de una mera correlación de ranquin, el método propuesto tiene otras ventajas de naturaleza más psicológica. El municipio encargó a expertos la elaboración del índice de priorización en el proyecto inicial, y los expertos y un funcionario de la ciudad asignaron pesos directos a los criterios. Esto puede generar conflictos con otros actores interesados en la ciudad (por ejemplo, partidos políticos), que pueden estar en desacuerdo con la decisión y obstaculizar el proceso de implementación. Incluso con un cambio de gobierno, puede haber un cambio drástico en las decisiones de inversión y los proyectos pueden quedar sin terminar o archivados. Considerar a todos los interesados en una decisión puede hacer que se sientan escuchados y representados, con un poder de toma de decisiones objetivo y asignado por los ciudadanos, mejorando la gobernanza de la ciudad inteligente a través de acuerdos interpartidistas.

4.5.3. Comparación con otros métodos

Para llevar a cabo la comparación con otros métodos, vuelven a utilizarse las técnicas de ETOPSIS y Proyección propuestas por Yue. Es importante destacar que en la comparación se utilizan los valores del escenario de equidad para este análisis, ya que estas metodologías no pueden manejar influencia previa. Siguiendo los pasos de ambas técnicas, se obtienen los conjuntos de pesos de criterios presentados en las ecuaciones 4.27 y 4.28.

$$\gamma_{ETOPSIS} = \{15.17, 7.16, 9.69, 29.82, 11.87, 11.36, 6.50, 8.43\} \quad [4.27]$$

$$\gamma_{PROYECCIÓN} = \{17.47, 7.71, 9.22, 28.86, 11.05, 11.93, 6.08, 7.67\} \quad [4.28]$$

Ambos vectores de pesos se agregan a los datos de la Tabla 4.16, obteniendo el mismo ranking para ambas técnicas, $R_{T/P} = \{A_{10}, A_3, A_5, A_7, A_6, A_{11}, A_{15}, A_{14}, A_{12}, A_{13}, A_8, A_9, A_2, A_1, A_4\}$. Esto significa que, aunque los pesos de los DMS son diferentes en ambas técnicas, no son lo suficientemente diferentes como para modificar el ranquin. Con estos datos, se aplica la ecuación 4.24 para obtener los valores de correlación mostrados en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24 – Resultados de correlación de los DMS con cada método analizado.

	ETOPSIS	Proyección	HIVES (S ₂)
d_1	0.739	0.739	0.621
d_2	0.511	0.511	0.607
d_3	0.232	0.232	0.407
d_4	0.568	0.568	0.664
d_5	0.154	0.154	0.300
d_6	0.586	0.586	0.811
d_7	0.014	0.014	0.332
Total	2.804	2.804	3.743

ETOPSIS y Proyección presentan los mismos resultados de correlación, ya que sus ránkines son iguales. Sin embargo, es destacable la correlación obtenida utilizando el método HIVES. Aunque d_1 disminuye ligeramente su correlación, todos los demás DMs aumentan significativamente sus correlaciones con la clasificación final. En otras palabras, el uso de esta técnica conduce a una maximización de la correlación de hasta 3.743, un incremento del 34.65% en comparación con métodos similares, al tiempo que se garantiza una decisión objetiva, justa y ética mediante la aplicación de los axiomas sociales. Este aumento en los beneficios del grupo es aún mayor que el incremento presentado en el ejemplo ilustrativo, en el que la mejora es del 23.08%.

4.6. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se ha desarrollado HIVES, un método específico de toma de decisiones en grupo basado en teorías sociales y matemáticas estadísticas para la agregación de opiniones de las partes interesadas.

Siguiendo los hallazgos del capítulo anterior, el método cumple con todas las necesidades que puede tener la administración pública, al maximizar la satisfacción de las partes interesadas a la vez que asegura una solución objetiva, justa y ética. HIVES no tiene límites en la distribución de datos y puede manejar un conjunto indefinido de DMs y criterios. Además, no se necesita conocimiento previo de las alternativas, lo que permite que se aplique previamente en el proceso de toma de decisiones. Este componente es fundamental para la administración pública, pues puede generar el marco de evaluación sin necesidad de conocer posibles alternativas que sesgarían la opinión.

La inclusión de axiomas sociales y la división de componentes aseguran la equidad, imparcialidad y neutralidad para las partes interesadas. Éstas reciben pesos específicos en función de sus propias evaluaciones propuestas y el comportamiento del grupo, recibiendo mayor peso si su opinión facilita el consenso. Esta característica se mejora teniendo en cuenta la capacidad previa de HIVES para considerar la influencia previa, pues los decisores que apoyan el consenso del grupo con evaluaciones comúnmente racionales pueden mejorar considerablemente su influencia en la decisión.

Finalmente, cabe destacar el excelente rendimiento del método, pues tanto en el ejemplo ilustrativo como en el caso de estudio, HIVES ha superado por más del 20% y 30%, respectivamente, los valores obtenidos con técnicas similares.

5. CONSIDERACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

5.1. INTRODUCCIÓN

Como se ha mostrado en el Capítulo 2 (§ 2.5), el SEPIP debe ser capaz de considerar la incertidumbre, debido al posible desconocimiento del valor exacto de los indicadores utilizados. Por ello, puede ser necesario llevar a cabo aproximaciones o suposiciones basadas en la probabilidad. Además, es posible que en algunos casos los expertos o decisores no puedan dar unos valores exactos de importancia, por lo que el método HIVES, previamente desarrollado, no pueda ser utilizado.

Considerando estas necesidades, la segunda sección de este capítulo contiene una introducción a la incertidumbre relativa a la toma de decisiones en el ámbito de la inversión pública, en la que distintas técnicas son presentadas y analizadas. En la tercera, se seleccionan y desarrollan distintos métodos para la gestión de esta incertidumbre, que sean aplicables según las posibles necesidades de la administración pública. Finalmente, se muestran las conclusiones del capítulo.

5.1.1. Razón de ser

En el marco de la toma de decisiones en inversiones públicas, dónde recurrentemente se analizan inversiones de alta complejidad antes de ser implementadas, existe cierto desconocimiento sobre el valor real que tomarán los indicadores. Este desconocimiento se traslada matemáticamente a los métodos MCDM modificando sus datos de entrada, adoptando formas ordinales o cardinales (Pelissari et al., 2021). Los datos en forma ordinal, con categorías naturales y ordenadas, suelen ser expresados de forma lingüística (muy bueno, bueno, malo...) y tienen a ser usados en evaluaciones cualitativas. Por contraparte, los datos cardinales son valores numéricos a los cuales se les pueden aplicar operaciones matemáticas más o menos complejas, siendo datos cuantitativos como intervalos o ratios.

Sin embargo, esta modificación en la tipología de datos de entrada no sólo refiere a los valores que pueden tomar los indicadores. También es posible que, en el proceso de asignación de importancia, los decisores requieran de estas técnicas debido a desconocimiento, duda o vacilación. Por ello, se requiere de un análisis sobre las técnicas de gestión de incertidumbre que puedan ser introducidas en el SEPIP, dando herramientas al sistema para aplicarlas en caso de ser necesarias.

5.2. INTRODUCCIÓN A LA GESTIÓN DE INCERTIDUMBRE

En esta sección se desarrolla una breve explicación sobre los tipos de incertidumbre, conocidas también como fuentes de incertidumbre. Además, se exponen las principales técnicas de gestión de incertidumbre, las cuales son ampliamente aplicadas en métodos de toma de decisión.

5.2.1. Tipos de incertidumbre

Las fuentes o tipos de incertidumbre se dividen en tres grupos dependiendo de su naturaleza (Pelissari et al., 2021):

- **Ambigüedad:** Esta tipología de incertidumbre aparece cuando los propios datos pueden dar lugar a más de una interpretación. Si bien aparece principalmente en escalas ordinales de variables lingüísticas (dónde la etiqueta lingüística puede ser interpretada según el lector) y se denomina vaguedad (Ashtiani & Azgomi, 2016; Vasant & Bhattacharya, 2007), también está presente en escalas cardinales. En este caso, se distingue como imprecisión (Dursun & Karsak, 2010; Tuan et al., 2020), y los datos toman valores de intervalos o porcentajes.
- **Estocasticidad:** En este caso, los datos toman una forma estocástica, o aleatoria, en sus valores. Dentro de un rango de valores definidos, pueden adoptar cualquier valor, por lo que se aplican distribuciones de probabilidad discretas (Y. Li et al., 2021) en el caso de escalas ordinales y distribuciones de probabilidad continua (Jodrá, 2008) en escalas cardinales.

- **Información parcial:** Ya sea en la información disponible de los indicadores de decisión o en los pesos de decisión emitidos por los decisores, pueden darse casos en los que se desconozca parte de los valores.

5.2.2. Técnicas de gestión de la incertidumbre

Una vez presentados los tipos de incertidumbre, deben exponerse los múltiples sistemas existentes para tratar con ella. Aunque muchos han sido los métodos propuestos, basados en múltiples teorías y enfoques, en la presente Tesis Doctoral se han considerado cuatro grandes grupos: conjuntos difusos, conjuntos aproximados, aproximaciones mediante la teoría de la probabilidad, y aproximaciones mediante la teoría de Dempster-Shafer.

Conjuntos difusos

Los conjuntos difusos, o FSs (del inglés, “*Fuzzy sets*”), se basan en asignar a cada dato un grado de pertenencia a ciertas categorías. Presentada como una extensión de la teoría clásica de conjuntos, que dictamina que un elemento pertenece o no a un conjunto, su idea radica en que en la vida real difícilmente una categoría es absoluta i precisa, por lo que el elemento en cuestión puede pertenecer a más de un conjunto (Zadeh, 1965). Por tanto, estos conjuntos vienen definidos mediante una función de pertenencia que asigna a cada elemento un grado de pertenencia, entre 0 y 1, a las distintas categorías posibles. Esta función representa la pertenencia de un elemento dentro y fuera de cada conjunto a lo largo de todos los valores posibles.

Como ejemplo, se puede tomar la categorización de un individuo según si es joven, de edad media o se encuentra en la vejez (O’Brien, 2008). Dado que definir una edad exacta que marque el cambio de categoría es una tarea que puede resultar incierta, se pueden proponer las funciones de membresía mostradas en la Figura 5.1. En estas funciones, puede observarse como se distribuye la pertenencia del individuo a cada categoría al pasar los años. Considerando el grado de pertenencia, aproximadamente de 0 a 28 años el individuo corresponde totalmente a la categoría “joven”. A partir de ahí y hasta los aproximadamente 32 años, la función de la categoría joven se superpone con la de “madurez”, lo que supone un traspaso de pertenencia lineal hasta pertenecer completamente a esta segunda categoría. Análogamente, lo mismo ocurre con el cambio de categoría de “madurez” a “vejez”.

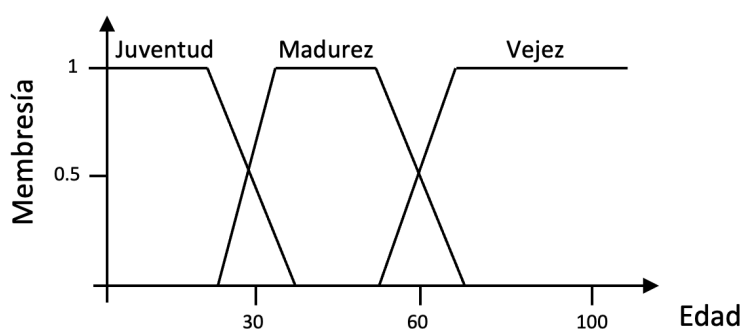


Figura 5.1 –Funciones de membresía para categorización de edad. Adaptado de O’Brien (2008).

Cabe mencionar que esta técnica de gestión de la incertidumbre ha sido, de lejos, la más utilizada para adaptar la imprecisión de datos en los métodos MCDM (Mardani et al., 2015). Además, como bien se ha podido comprobar en el Capítulo 3 (§ 3.3.2), dónde se pueden encontrar múltiples referencias, los conjuntos difusos tienen una gran cantidad de extensiones que han respondido a las necesidades que la comunidad científica ha detectado a lo largo del tiempo. De entre estas extensiones, es de especial interés remarcar los conjuntos difusos de tipo 2 (T2FSs), los conjuntos difusos intuicionistas (IFSs), los conjuntos difusos vacilantes (HFSs) y las variables lingüísticas (LVs), pues son algunos de los conjuntos principales:

- **T2FSs:** Los T2FSs son conjuntos que introducen una segunda capa de incertidumbre, pues el grado de pertenencia de un elemento para una categoría es expresado mediante otro FS (Mendel & John, 2002). Por tanto, esta técnica permite aumentar el grado de consideración de incerteza.
- **IFSs:** De forma muy similar a los T2FSs, los IFSs también fueron diseñados para gestionar casos en los que la pertenencia a una cierta categoría era incierta (Atanassov, 1986). Sin embargo, en este caso, a cada elemento se le asignan dos grados de membresía. El primero hace referencia a un FS, y el segundo opera de forma similar a un conjunto clásico, pues expone la pertenencia o no pertenencia a esa categoría.
- **HFSs:** En la misma línea que los IFSs, los HFSs basan su idea en que el grado de pertenencia de un elemento puede tomar múltiples valores (Torra & Narukawa, 2009). Estos conjuntos han sido muy utilizados en situaciones en los que los decisores consideran que pueden darse múltiples posibilidades o combinaciones pertenencia, así como en situaciones de GDM (ver Capítulo 3). Las formulaciones matemáticas desarrolladas en HFSs permiten considerar la opinión de varios decisores como una probabilidad distinta, por lo que inherentemente ya están preparadas para agregar las opiniones grupales y encontrar la solución de consenso.
- **LVs:** Las LVs tienen la interesante característica que sus categorías no son valores numéricos, sino que son generadas por palabras o conjuntos de palabras de un lenguaje natural. Estas variables son extremadamente útiles para gestionar la incertidumbre desde un punto de vista cualitativo más que cuantitativo, en los casos en los que los datos de evaluación son altamente inciertos. Al utilizar LVs, los decisores o expertos pueden expresar sus preferencias y evaluaciones en términos más intuitivos y lingüísticos, permitiendo una mayor flexibilidad y adaptabilidad.

Conjuntos aproximados

La idea principal de los conjuntos aproximados, o RSs (del inglés, “*Rough sets*”), es que los problemas a resolver contienen información que puede ser redundante o repetida, contradictoria entre sí, o no exacta (Pawlak, 1982). En los RSs, se utilizan dos tipos diferentes de conjuntos: los aproximados superiores y los aproximados inferiores.

En los conjuntos aproximados superiores, los elementos que lo conforman tienen la característica de ser, de forma certera y segura, partes de una categoría en concreto. En otras palabras, los elementos del conjunto son parte de la categoría, no existiendo incertidumbre alguna sobre ellos. En los conjuntos aproximados inferiores, los elementos que lo conforman pueden ser o no ser parte de la categoría analizada. Por ello, a estos elementos se les conoce como potenciales miembros de la categoría, pero existe incerteza sobre su pertenencia a esta. Al unir ambos conjuntos, se genera un RS completo. Sin embargo, esta técnica se utiliza principalmente para la clasificación de elementos en categorías, más que para la gestión de datos en métodos MCDM.

La principal diferencia de los conjuntos aproximados con los conjuntos difusos se encuentra en consideración de pertenencia de los elementos a los conjuntos. Los conjuntos difusos se centran en la pertenencia gradual de los elementos, mientras que los conjuntos aproximados se centran en la categorización basada en características o propiedades.

Aproximaciones mediante la teoría de la probabilidad

En las técnicas que conforman este grupo, los indicadores o criterios pueden tomar valores aleatorios dentro de un rango definido. En la teoría de la probabilidad, cada posible valor tiene asignado un cierto grado de incertidumbre o certeza entre 0 y 1, que equivale a la probabilidad de ocurrencia. Si el grado es 0, se indica que hay una certeza absoluta que el elemento en cuestión no tomará ese valor. Por el contrario, si el grado es 1, con total seguridad el elemento tomará ese valor, convirtiéndose en un valor exacto.

Los métodos basados en la teoría de la probabilidad contienen funciones de distribución que relacionan el valor de los datos en el rango definido, y la probabilidad existente de que el elemento analizado tome ese valor (Nam et al., 2014). Así pues, es de especial importancia en estos métodos la selección de la función de distribución, pues estas pueden adoptar múltiples formas (ver Figura 5.2). Entre estas técnicas, las más conocidas y aplicadas en el campo de MCDM, han sido la simulación de Monte Carlo, el análisis de sensibilidad probabilística, y el análisis de decisión bayesiano.

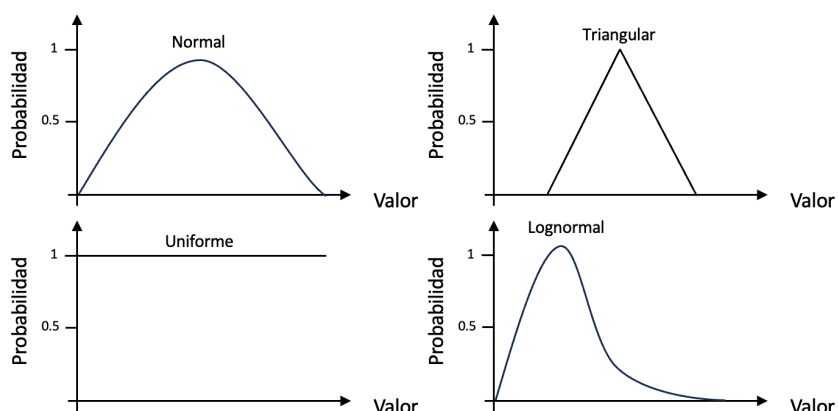


Figura 5.2 –Ejemplo de funciones de distribución.

La simulación de Monte Carlo se basa en la generación de un conjunto de muestras aleatorias de los posibles valores de los datos de entrada, para poder ser introducidas,

posteriormente, a los modelos MCDM (Allahdadi & Golestane, 2016). Mediante el uso de las funciones de distribución y la generación aleatoria de datos, se obtienen los posibles valores que un indicador puede tomar (ver Figura 5.3), lo que permite obtener más información sobre los riesgos de cada alternativa.

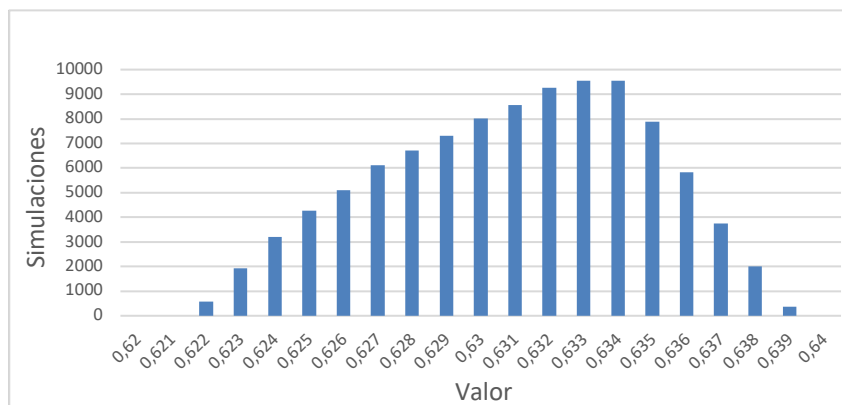


Figura 5.3 –Ejemplo de muestreo Monte Carlo.

Por otro lado, el análisis de sensibilidad probabilística se centra en analizar cómo la incerteza en los datos de los indicadores puede afectar el valor final de un modelo MCDM. Como en la simulación Monte Carlo, se generan múltiples muestras aleatorias que siguen las distribuciones de probabilidad explicitadas por los decisores o expertos. Sin embargo, estas simulaciones son utilizadas para el análisis de varianza del resultado final (Adalsteinsson & Toumi, 2013). Mediante este análisis, se puede identificar qué indicadores o elementos tienen un mayor impacto en el resultado, pudiendo focalizar el interés en los mismos.

Finalmente, el análisis decisión bayesiano aúna la teoría de la probabilidad con la teoría de la decisión. Si bien las dos últimas técnicas se basaban en la generación de muestras aleatorias, este análisis se focaliza en la actualización de las preferencias de los decisores (evaluaciones u opiniones generadas) a medida que se van obteniendo nuevos datos (Oakley & O'Hagan, 2004). Este análisis utiliza un sistema de probabilidades subjetivas y funciones de utilidad, muy similares a las ya expuestas en esta Tesis Doctoral al explicar las técnicas MCDM MAUT, para generar una primera aproximación al problema. Conforme nuevos datos reemplazan o complementan a los anteriores, se utiliza el análisis bayesiano para obtener nuevas aproximaciones.

Aproximaciones mediante la teoría de Dempster-Shafer

La teoría de Dempster-Shafer, ya comentada y con múltiples referencias en el Capítulo 3 (§ 3.3.3), es una teoría que se ha reconocido en el mundo científico como teoría de la evidencia, ya que se basa en la consideración de las creencias de los decisores (Dempster, 1967; Shafer, 1976). Esta teoría aborda la gestión de la incertidumbre desde el punto de vista de la representación y la combinación de elementos que contienen evidencia sobre el valor de un dato o su pertenencia a una cierta categoría, por lo que un elemento puede pertenecer al mismo tiempo a varias categorías, o incluso a ninguna, si la categoría a la que pertenece el elemento no está dentro del rango considerado. Esta flexibilidad permite que estas aproximaciones puedan ser aplicadas, también, con

información parcial o nula. Dado que la teoría de Dempster-Shafer utiliza un sistema de funciones de creencia (conocidas también como funciones de masa) que representa el grado de certeza, creencia o confianza que se tiene sobre un cierto elemento y su valor o categoría, la suma de los grados de creencia no tiene por qué sumar 100%.

5.3. LA INCERTIDUMBRE EN EL SEPIP

Una vez mostradas las técnicas de gestión de incertidumbre en la sección anterior, debe indicarse cuáles de ellas se implementarán en el SEPIP. Por ello, en esta sección se proponen distintos métodos para tratar la falta de información o vacilación en los dos puntos clave de datos de entrada. El primero, refiere a los valores de los indicadores. El segundo a las evaluaciones proporcionadas por los decisores sobre la importancia, o peso, de los elementos analizados.

5.3.1. Incertidumbre en los datos de entrada

Para determinar qué técnicas son más apropiadas para manejar la incertidumbre presente en los datos de entrada del sistema, es crucial considerar el tipo y la naturaleza de la incerteza que el sistema abordará. Dado que se contempla la aplicabilidad del sistema en dos contextos distintos (la evaluación de proyectos en su etapa inicial de concepción y la evaluación de proyectos en etapas más avanzadas), se hace indispensable proporcionar dos herramientas que difieren en su enfoque de manera notable: Los atributos de base lingüística y la simulación de Monte Carlo.

Esta dualidad surge de las complejidades inherentes a la obtención de datos, ya que en el primer escenario los datos pueden ser generalmente parciales o inexistentes, mientras que en el segundo simplemente pueden resultar difíciles de obtener o de aproximar con precisión.

Atributos de base lingüística

Los atributos de base lingüística han sido ampliamente utilizados en MIVES, en gran medida cuando el método se ha aplicado a evaluaciones en fase de concepción (Pujadas et al., 2017). En esta fase, obtener datos cuantitativos exactos es prácticamente imposible, por lo que se requiere de expertos que puedan aportar su conocimiento sobre los indicadores que se evalúan. Por ello, los decisores desarrollan un conjunto de categorías con etiquetas lingüísticas para cada indicador (llamadas atributos), a los que les asignan una descripción y una puntuación, tal y como se muestra en la Tabla 5.1. Mediante este proceso, para cada alternativa a evaluar los expertos pueden asignar un atributo a cada indicador, lo que permite obtener un valor cuantitativo a partir de una evaluación cualitativa.

Tabla 5.1 – Ejemplo para un indicador de prevención de accidentes.

Atributo	Descripción	Valor
Riesgo alto	La inversión tiene un potencial limitado para prevenir accidentes de tránsito, pero aún existen riesgos considerables de que no sea efectiva en todos los escenarios	3
Riesgo medio	La inversión se considera tener una probabilidad moderada de contribuir a la prevención de accidentes de tránsito	2
Riesgo bajo	La inversión tiene un potencial sólido para prevenir accidentes de tránsito en la mayoría de los casos	1

Sin embargo, pueden existir casos dónde esta incertidumbre sea menor, ya sea por datos disponibles de la propia alternativa de inversión, información relativa a inversiones previas similares, o por el conocimiento de los expertos encargados de la evaluación. Para estos casos, esta Tesis Doctoral propone el uso de la distribución discreta de perfiles (DPD, por sus siglas en inglés), un método desarrollado para asignar la probabilidad de alcanzar perfiles, o atributos, específicos (Kunsch & Ishizaka, 2018). A efectos prácticos, este método equivale al uso de atributos de base lingüística con una función de membresía de conjuntos difusos. Esto conduce a una valoración de perfil binario, análoga a una función de probabilidad, que se utiliza para calcular la nota media del indicador (NMI) en valores exactos. Considerando un conjunto de atributos o perfiles $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_m\}$; $r \in P$ y su correspondiente conjunto de valores de pertenencia $V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_m\}$; $r \in V$, para cada indicador el NMI se define mediante la ecuación 5.1.

$$NMI = \sum_{r=1}^m P_r \cdot V_r \quad [5.1]$$

Dónde

m es el número máximo de perfiles o atributos,

P_r es el perfil o atributo “ r ”,

V_r es el porcentaje de pertenencia del indicador al perfil o atributo “ r ”.

Tomando como ejemplo el indicador definido por los atributos de la Tabla 5.1, una alternativa podría ser evaluada mediante su porcentaje de pertenencia a cada uno de esos atributos. Si los expertos asignaran a esta alternativa unos valores de riesgo muy alto, riesgo alto, riesgo medio, riesgo bajo i riesgo nulo equivalentes a $\{0, 0, 80, 20, 0\}$, el NMI resultante sería de 2.8.

Simulación de Monte Carlo

En los casos en los que exista información cuantitativa disponible de los indicadores, pero esta sea incierta, se propone el uso del método de Monte Carlo. Esta técnica ya ha sido aplicada satisfactoriamente en modelos MIVES (de La Cruz et al., 2014; Jato-Espino et al., 2014), y permite capturar la estocasticidad de los valores mediante la compilación de múltiples resultados obtenidos a base de simulaciones.

Dado que el SEPIP debe ser capaz de analizar inversiones tanto en la fase de concepción, la fase inicial o la fase de planificación, se propone el uso de funciones de distribución triangulares, las cuales han demostrado una gran capacidad para capturar datos cuantitativos en base a tres parámetros de referencia (Hihn & Lum, 2004). Estos parámetros, explicitados por los expertos que evalúan los indicadores, conforman los valores más destacados y generan el rango de posibilidades. Tal y como se muestra en la Figura 5.4, estos parámetros corresponden al mínimo valor o límite inferior (L), el valor más probable o moda (M), y el máximo valor o límite superior (H) que puede tomar el indicador.

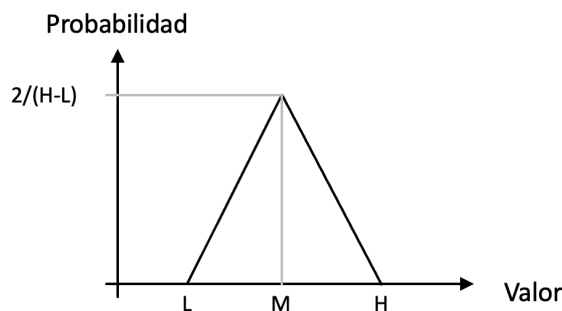


Figura 5.4 –Representación de la distribución triangular de Monte Carlo.

5.3.2. Incertidumbre en los pesos de decisión

En la asignación de peso en procesos de decisión grupal, múltiples métodos que incluyen la incertidumbre han sido desarrollados (ver Capítulo 3). Sin embargo, dado que se ha desarrollado HIVES como sistema principal de asignación de importancia, en esta subsección se propone su adaptación para considerar la incertidumbre. De entre todas las posibles extensiones de la técnica, cómo FSs o LVs, se ha escogido adaptar HIVES a un sistema de intervalos.

En el contexto de la toma de decisiones en el entorno de la administración pública, la adaptación del método de intervalos es una elección prudente y eficiente, ya que es un enfoque comprensible y accesible para aquellos actores que no poseen una formación técnica en datos complejos. Los intervalos ofrecen una representación más intuitiva y menos abstracta de los datos, lo que facilita la participación de los decisores no expertos, como podría ser actores políticos o civiles. En comparación con los conjuntos difusos u otras tipologías de datos, son más familiares y cercanos a la forma en que las personas no especializadas perciben la información. Además, los intervalos reducen la ambigüedad inherente a los conceptos difusos y minimizan la necesidad de comprender funciones de membresía complejas.

En los siguientes subapartados se presenta una breve introducción a los datos de intervalos, la adaptación y extensión de HIVES a HIVES Intervalos, y un ejemplo ilustrativo.

Preliminares de los datos en intervalos

En este subapartado se revisa la noción de los números de intervalo no negativos y algunas leyes operativas utilizadas en el desarrollo del método propuesto y su aplicación:

- **Definición 1** (Jahanshahloo et al., 2009): A es un número intervalo en la línea real \mathbb{R} si está expresado como $A = [a^l, a^u] = \{a: a^l \leq a \leq a^u, a \in \mathbb{R}\}$.
- **Definición 2** (Xu, 2005b): Sea $a = [a^l, a^u]$ y $b = [b^l, b^u]$ números intervalos y $\lambda \geq 0$. Entonces se cumplen las propiedades mostradas en las ecuaciones 5.2, 5.3 y 5.4.

$$a = b \leftrightarrow a^l = b^l \text{ y } a^u = b^u \quad [5.2]$$

$$a + b = [a^l, a^u] + [b^l, b^u] = [a^l + b^l, a^u + b^u] \quad [5.3]$$

$$\lambda \cdot a = \lambda \cdot [a^l, a^u] = [\lambda \cdot a^l, \lambda \cdot a^u] \quad [5.4]$$

- **Definición 3** (Z. Xu, 2005b): Sean $a = [a^l, a^u] \in \Omega$ y $b = [b^l, b^u] \in \Omega$ números intervalos y Ω el set de todos los elementos intervalo. Entonces, $l_a = a^u - a^l$ y $l_b = b^u - b^l$. EL grado de posibilidad de que $a \geq b$ se define mediante la ecuación 5.5

$$p(a \geq b) = \max \left\{ 1 - \max \left(\frac{b^u - a^l}{l_a + l_b}, 0 \right), 0 \right\} \quad [5.5]$$

Lo que conduce a $0 \leq p(a \geq b) \leq 1$, $p(a \geq b) = 1 \leftrightarrow b^u \leq a^l$, $p(a \geq b) = 0 \leftrightarrow a^u \leq b^l$, $p(a \geq a) = 1/2$, $p(a \geq b) + p(b \geq a) = 1$.

HIVES Intervalos

Dado que el desarrollo de HIVES ya ha sido detallado en profundidad en el Capítulo 4, en este subapartado se procede únicamente a mostrar la adaptación de este a los datos intervalo, utilizando el algoritmo presentado.

Supóngase que cada $d_i \in D$ evalúa la importancia de cada criterio del set de criterios mediante un vector de peso $W_i = \{w_{i1}, w_{i2}, w_{i3}, \dots, w_{in}\}$, tal que cada $w_{ij} = [w_{ij}^l, w_{ij}^u]$ para $\forall j \in N$ y $\forall i \in M$. Con esta información, el algoritmo de HIVES Intervalos se aplica para cada criterio:

- **Paso 1:** Cálculo de SICP. Se divide el conjunto de criterios en criterios individuales y divide cada evaluación de cada DM en sus límites inferior y superior. Para cada criterio c_j , se generan un $SICP_j^L$ y un $SICP_j^U$ generados por el set de pesos w_{ij}^l y w_{ij}^u respectivamente, que están posicionados entre el primer y tercer cuartil del conjunto de datos de c_j . Por tanto, sea $F_j^L = \{j1^l, j2^l, \dots, jf^l\}$; $jr^l \in F_j^L$ y $F_j^U = \{j1^u, j2^u, \dots, jf^u\}$; $jr^u \in F_j^U$ los subconjuntos discretos de c_j en los que sus componentes cumplen $Q_1^{j,L} \leq w_{ij}^l \leq Q_3^{j,L}$, and $Q_1^{j,U} \leq w_{ij}^u \leq Q_3^{j,U}$, respectivamente. Estos pesos considerados conforman dos conjuntos tales que $W_{rj}^L = \{w_{j1}^l, w_{j2}^l, w_{j3}^l, \dots, w_{j|F_j^L|}^l\}$ que son utilizados para obtener los valores de $SICP_j^L$ y $SICP_j^U$, mediante la ecuación 5.6.

$$SICP_j^L = \frac{1}{jfl} \cdot \sum_{jr^l=j1^l}^{jfl} w_{rj,j}^l \quad ; \quad SICP_j^U = \frac{1}{jfu} \cdot \sum_{jr^u=j1^u}^{jfu} w_{rj,j}^u \quad [5.6]$$

- **Paso 2:** Designación de la zona de evaluación del DM y derivación de x_{rel} . Como SB se genera mediante 4 funciones con sus respectivos dominios, cada límite inferior y límite superior de cada evaluación de cada DM debe posicionarse en una de ellas para obtener su x_{rel} .
- **Paso 3:** Aplicación de la campana de puntuación. Con los x_{rel} , se puede aplicar la campana de puntuación mediante las ecuaciones 5.7 a 5.10. Nótese que cada DM_i $i \in M$ obtendrá un vector de puntuación S_i directamente relacionado con su W_i , tal que sus componentes seguirán la notación de intervalos $s_{ij} = [s_{ij}^l, s_{ij}^u]$ para $\forall j \in N$ y $\forall i \in M$.

$$SB_1^L = e^{Ln(50) \cdot \left(\frac{x_{rel}^l}{x_{Q1}^l - x_{min}^l}\right)^2} ; SB_1^U = e^{Ln(50) \cdot \left(\frac{x_{rel}^u}{x_{Q1}^u - x_{min}^u}\right)^2} \quad [5.7]$$

$$SB_2^L = (101) - e^{Ln(51) \cdot \left(1 - \frac{x_{rel}^l}{x_{Máx inf}^l - x_{Q1}^l}\right)^2} ; SB_2^U = (101) - e^{Ln(51) \cdot \left(1 - \frac{x_{rel}^u}{x_{Máx inf}^u - x_{Q1}^u}\right)^2} \quad [5.8]$$

$$SB_3^L = (101) - e^{Ln(51) \cdot \left(\frac{x_{rel}^l}{x_{Q3}^l - x_{Máx inf}^l}\right)^2} ; SB_3^U = (101) - e^{Ln(51) \cdot \left(\frac{x_{rel}^u}{x_{Q3}^u - x_{Máx inf}^u}\right)^2} \quad [5.9]$$

$$SB_4^L = e^{Ln(50) \cdot \left(1 - \frac{x_{rel}^l}{x_{máx}^l - x_{Q3}^l}\right)^2} ; SB_4^U = e^{Ln(50) \cdot \left(1 - \frac{x_{rel}^u}{x_{máx}^u - x_{Q3}^u}\right)^2} \quad [5.10]$$

- **Paso 4:** Peso del criterio del DM. Utilizando la puntuación obtenida en el paso 3, la ecuación 5.11 se aplica para obtener el peso de cada d_i sobre los criterios c_j y según los límites superior e inferior.

$$\lambda_{ij}^l = \frac{s_{ij}^l}{\sum_{i=1}^m s_{ij}^l} \cdot 100 \quad ; \quad \lambda_{ij}^u = \frac{s_{ij}^u}{\sum_{i=1}^m s_{ij}^u} \cdot 100 \quad [5.11]$$

- **Paso 5:** Pesos de los criterios. El valor de peso γ_j^l y γ_j^u , correspondientes a los límites inferior y superior del criterio c_j , se obtienen mediante la ecuación 5.12.

$$\gamma_j^L = \sum_{i=1}^m \lambda_{ij}^l \cdot w_{ij}^l \quad ; \quad \gamma_j^U = \sum_{i=1}^m \lambda_{ij}^u \cdot w_{ij}^u \quad [5.12]$$

- **Paso 6:** Agregación de componentes. La suma de los límites inferior y superior de los criterios puede no ser 100, como se ya se ha comentado en el capítulo anterior. Por ello, se aplica el factor de corrección de la ecuación 5.13 para encontrar los pesos finales de los criterios mediante la ecuación 5.14.

$$\beta^L = \frac{100}{\sum_{j=1}^n \gamma_j^L} \quad ; \quad \beta^U = \frac{100}{\sum_{j=1}^n \gamma_j^U} \quad [5.13]$$

$$\gamma_j'^L = \beta^L \cdot \gamma_j^L \quad ; \quad \gamma_j'^U = \beta^U \cdot \gamma_j^U \quad [5.14]$$

Por tanto, la aplicación de HIVES Intervalos permite obtener un conjunto de criterios $\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_n\}$ en el que todos sus componentes son intervalos tales que $\gamma_j = [\gamma_j^l, \gamma_j^u]$ para $\forall j \in N$, $\sum_{j=1}^n \gamma_j^l = 100$ y $\sum_{j=1}^n \gamma_j^u = 100$.

Ejemplo ilustrativo

A continuación se resuelve un ejemplo ilustrativo que permita mostrar la aplicación del algoritmo desarrollado.

En este ejemplo, una universidad está considerando mejorar los sistemas de calidad del aire en las aulas de estudiantes debido a las experiencias relacionadas con el COVID-19. Las alternativas que se están considerando son la mejora de los sistemas de ventilación mecánica (A_1), la mejora de la ventilación natural mediante la construcción de nuevas ventanas (A_2) y la mejora de la ventilación cruzada de las aulas (A_3). Estas alternativas se evalúan en función de cinco criterios de beneficio $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5\}$, que toman los valores de intervalo que se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 – Valores obtenidos por cada alternativa en cada criterio.

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
A_1	[3000.0, 4000.0]	[100.0, 200.0]	[8.0, 10.0]	[5.5, 7.0]	[2.5, 4.0]
A_2	[4500.0, 7000.0]	[80.0, 120.0]	[5.0, 9.0]	[7.5, 9.5]	[7.0, 10.0]
A_3	[2000.0, 3000.0]	[50.0, 90.0]	[3.0, 7.0]	[4.5, 5.5]	[6.0, 9.0]

Antes de aplicar un sistema de toma de decisiones, los cuatro gestores de proyectos universitarios $D = \{d_1, d_2, d_3, d_4\}$, deben ponerse de acuerdo sobre la importancia de cada criterio. Debido a los múltiples factores de incertidumbre existentes, deciden utilizar HIVES en intervalos para dar una valoración de la importancia basada en rangos, como se muestra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 – Valores de peso asignados por cada decisor.

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
d_1	[15, 20]	[1, 5]	[5, 10]	[40, 50]	[15, 20]
d_2	[5, 10]	[15, 20]	[15, 20]	[15, 20]	[15, 25]
d_3	[5, 10]	[10, 15]	[1, 5]	[50, 60]	[20, 30]
d_4	[20, 30]	[30, 40]	[20, 25]	[10, 15]	[10, 15]

Con esta información, se procede a aplicar HIVES Intervalos:

- **Paso 1:** Cálculo de SICP. Una vez que el conjunto de criterios ha sido dividido en sus componentes, y cada componente ha sido separada entre sus límites inferior y superior, se aplica la ecuación 5.6 para obtener el

conjunto SICP = {[8.33, 13.33], [12.50, 17.50], [10.00, 15.00], [27.50, 35.00], [15.00, 22.50]}.

- **Paso 2:** Designación de la zona de evaluación del DM y derivación de x_{rel} . Utilizando las evaluaciones y las características de cada conjunto (SICP, cuartiles, mínimos y máximos) se asigna una zona a cada elemento evaluado. Mediante esta zona como referencia, se obtienen las x_{rel} de cada elemento, tal y como se muestra en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 – Posiciones relativas de cada elemento respecto a su zona.

	$[Xrel_1^L, Xrel_1^U]$	$[Xrel_2^L, Xrel_2^U]$	$[Xrel_3^L, Xrel_3^U]$	$[Xrel_4^L, Xrel_4^U]$	$[Xrel_5^L, Xrel_5^U]$
d_1	[6.67, 6.67]	[0.00, 0.00]	[1.00, 1.25]	[12.50, 15.00]	[0.00, 1.25]
d_2	[0.00, 2.50]	[2.50, 2.50]	[5.00, 5.00]	[1.25, 1.25]	[0.00, 2.50]
d_3	[0.00, 2.50]	[2.25, 2.50]	[0.00, 0.00]	[7.50, 7.50]	[3.75, 3.75]
d_4	[3.75, 15.00]	[11.25, 15.00]	[3.75, 3.75]	[0.00, 0.00]	[0.00, 0.00]

- **Paso 3:** Aplicación de la campana de puntuación. Con la información obtenida en el paso anterior, se aplican las ecuaciones 5.7 a 5.10 para obtener los datos de la Tabla 5.5. En esta tabla, se muestran las puntuaciones obtenidas por cada decisor, respecto a cada elemento explicitado en la evaluación.

Tabla 5.5 – Puntuaciones obtenidas en HIVES Intervalos.

	$[s_1^L, s_1^U]$	$[s_2^L, s_2^U]$	$[s_3^L, s_3^U]$	$[s_4^L, s_4^U]$	$[s_5^L, s_5^U]$
d_1	[84.75, 93.00]	[1.00, 1.00]	[85.66, 88.62]	[85.66, 83.03]	[100.00, 95.26]
d_2	[50.00, 50.00]	[99.12, 99.45]	[88.62, 88.62]	[75.22, 72.49]	[100.00, 95.26]
d_3	[50.00, 50.00]	[98.03, 98.33]	[1.00, 1.00]	[1.00, 1.00]	[1.00, 1.00]
d_4	[1.00, 1.00]	[1.00, 1.00]	[1.00, 1.00]	[1.00, 1.00]	[1.00, 1.00]

- **Paso 4:** Peso del criterio del DM. Utilizando la puntuación obtenida en el paso 3, la ecuación 5.11 se aplica para obtener los pesos de cada decisor en cada criterio y límite, tal y como se muestra en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 – Peso de los decisores en cada criterio y límite.

	$[\lambda_1^L, \lambda_1^U]$	$[\lambda_2^L, \lambda_2^U]$	$[\lambda_3^L, \lambda_3^U]$	$[\lambda_4^L, \lambda_4^U]$	$[\lambda_5^L, \lambda_5^U]$
d_1	[45.63, 47.94]	[0.50, 0.50]	[48.59, 49.44]	[52.59, 52.71]	[49.50, 49.48]
d_2	[26.92, 25.77]	[49.77, 49.78]	[50.27, 49.44]	[46.18, 46.02]	[49.50, 49.48]
d_3	[26.92, 25.77]	[49.22, 49.22]	[0.57, 0.56]	[0.61, 0.63]	[0.50, 0.52]
d_4	[0.54, 0.52]	[0.50, 0.50]	[0.57, 0.56]	[0.61, 0.63]	[0.50, 0.52]

- **Paso 5:** Pesos de los criterios. Los datos de la Tabla 5.6 son agregados con la información contenida en la Tabla 5.3 para encontrar los límites inferiores y superiores de los criterios, tal y como muestra la ecuación 5.15.

$$\gamma = \{[9.64, 14.90], [12.54, 17.56], [10.09, 15.00], [28.33, 36.04], [15.00, 22.50]\} \quad [5.15]$$

- **Paso 6:** Agregación de componentes. Como denota la ecuación 5.15, la suma de los límites de los criterios no es el total aceptable. Por tanto, se aplican los factores de corrección $\beta^L = 1.323$ y $\beta^U = 0.943$, obtenidos mediante la ecuación 5.13, para obtener los valores finales de los criterios, mostrados en la ecuación 5.16.

$$\gamma' = \{[12.75, 14.05], [16.57, 16.59], [13.34, 14.15], [34.00, 37.47], [19.84, 21.23]\} \quad [5.16]$$

Como puede observarse, HIVES Intervalos ha revertido los límites inferiores y superiores de los criterios 2 y 4, para mantener la coherencia del intervalo. Los valores finales de la ecuación 5.16 pueden agregarse ya a los datos de las alternativas mostrados en la Tabla 5.2, utilizando cualquier método MCDM preparado para la gestión de intervalos. Sin embargo, dada la naturaleza de HIVES, explicitada en el Capítulo 4, también podría tomarse la media de estos valores para proceder con cualquier MCDM existente. Por ejemplo, tómesese el MCDM TOPSIS preparado para la gestión de datos intervalo en los indicadores, pero que considera como valores exactos los pesos asignados a cada criterio (Dymova et al., 2013). En este caso, se genera un vector de pesos tal que $\gamma' = \{13.41, 16.58, 13.75, 35.73, 20.53\}$.

Siguiendo los pasos de Dymova (2013), se halla la matriz normalizada ponderada de la Tabla 5.7 utilizando la Tabla 5.2 y el vector de pesos γ' . Mediante la ecuación 5.5, se comparan los valores alternativos para generar las soluciones ideales $A^+ = \{[5.82, 9.06], [5.81, 11.62], [6.07, 7.59], [16.12, 20.42], [8.47, 12.09]\}$ y $A^- = \{[2.59, 3.88], [2.91, 5.23], [2.28, 5.31], [9.67, 11.82], [3.02, 4.84]\}$.

Tabla 5.7 – Matriz normalizada ponderada.

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
A_1	[3.88, 5.18]	[5.81, 11.62]	[6.07, 7.59]	[11.82, 15.05]	[3.02, 4.84]
A_2	[5.82, 9.06]	[4.65, 6.97]	[3.80, 6.83]	[16.12, 20.42]	[8.47, 12.09]
A_3	[2.59, 3.88]	[2.91, 5.23]	[2.28, 5.31]	[9.67, 11.82]	[7.26, 10.88]

Con estos datos, los siguientes pasos pueden ser aplicados para encontrar el coeficiente de cercanía a las soluciones ideales $RC_1 = 0.45$, $RC_2 = 0.83$, $RC_3 = 0.20$, y por tanto, $A_2 > A_1 > A_3$.

5.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se han expuesto los principales métodos de gestión de incertidumbre que se emplean en conjunto con las técnicas MCDM. Mediante el análisis de las necesidades que el SEPIP en desarrollo puede presentar en su aplicación, se ha procedido a la implementación de tres técnicas y al desarrollo de una cuarta.

Para la gestión de incertidumbre en los datos de entrada, se ha considerado crítica la característica temporal del sistema. Este debe ser capaz de ser aplicado tanto en la fase de conceptualización como en fases más avanzadas de inversiones, por lo debe ser capaz de tratar una gran variabilidad de datos. Tal y como muestra la Figura 5.5, se ha propuesto la implementación de los Atributos con base lingüística, los Atributos con base lingüística

y membresía, y la simulación de Monte Carlo como soluciones para tratar todo el rango posible entre datos exactos e incertidumbre total, pudiendo ser escogido el método más adecuado para gestionar cada indicador.

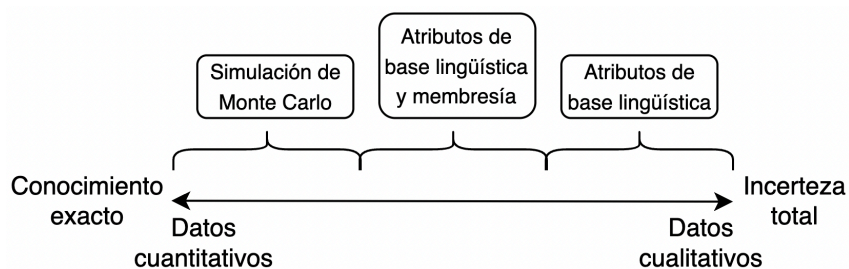


Figura 5.5 –Métodos implementados en el sistema, en base al nivel de incerteza de los indicadores.

Por otro lado, en el caso de la incertidumbre en la asignación de peso a los criterios, se ha desarrollado una extensión del método HIVES (presentado en el Capítulo 4) para permitir que los datos de entrada sean en intervalos. Como ya se ha comentado, el uso de intervalos (y no de otras tipologías de datos en incertidumbre) asegura que el sistema en desarrollo, especialmente preparado para la administración pública, tenga un nivel óptimo de comprensibilidad y accesibilidad para todos los actores que participan en el proceso de toma de decisión.

6. GESTIÓN DE RESULTADOS: CLASIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN

6.1. INTRODUCCIÓN

Siguiendo las directrices marcadas en el Capítulo 2 (§ 2.5), el SEPIP requiere contar con herramientas que aumenten la libertad de elección entre inversiones u optimicen la combinación agregada según los presupuestos disponibles. Por ello, en este capítulo se introducen las técnicas de clasificación y optimización.

La segunda sección presenta una introducción a los modelos de categorización de alternativas más conocidas, así como el procedimiento de aplicación general de la técnica. En base a los resultados, se presenta un nuevo método de clasificación de alternativas, que puede ser introducido en el sistema que se desarrolla en esta Tesis. La tercera sección lleva a cabo el procedimiento análogo con los métodos de optimización. En base a un estudio sobre los principales métodos existentes, se selecciona la técnica más adecuada para ser implementada en el sistema en desarrollo. Finalmente, se muestran las conclusiones del capítulo.

6.1.1. Razón de ser

Si bien el proceso de toma de decisiones permite obtener una lista de priorización de inversiones, pueden existir escenarios en los que las necesidades de la administración pública no sean satisfechas. Ante estos casos, la clasificación y optimización de resultados se presentan como herramientas fundamentales para guiar y respaldar la toma de decisiones en la administración.

La clasificación de alternativas, basada en la categorización de inversiones en niveles o grupos, proporciona a la administración pública una valiosa flexibilidad en la elección y planificación de acciones. Al presentar una lista de alternativas categorizadas, se otorga cierto margen de maniobra para seleccionar aquellas opciones que se ajusten mejor a las necesidades y prioridades específicas del decisor. Por ejemplo, clasificar las alternativas en categorías A, B y C permite a los responsables de la toma de decisiones enfocarse en las opciones más prometedoras o de mayor relevancia, al tiempo que brinda una visión general del espectro completo de posibilidades (Belton & Gear, 1983).

Por otro lado, la optimización de resultados es especialmente relevante en contextos donde la administración pública opera con recursos limitados, como presupuestos restringidos. Al aplicar técnicas de optimización, se busca maximizar los beneficios (los índices resultantes de la combinación final) asociados con la implementación de las alternativas priorizadas. Esto se traduce en una asignación eficiente de los recursos disponibles, lo que a su vez puede aumentar el impacto y la efectividad de las decisiones tomadas (Chakraborty & Chakraborty, 2022).

Por ello, en las siguientes secciones se estudia la implementación de estas herramientas en el sistema que se desarrolla en la presente Tesis Doctoral.

6.2. SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS

Tal y como se ha comentado, los sistemas de clasificación de alternativas son una herramienta primordial para la administración pública, que ha aplicado estos procesos en gran diversidad de decisiones (Rutgers, 2008). Por ello, a continuación, se presenta una introducción a estos métodos y se desarrolla una técnica aplicable al SEPIP.

6.2.1. Introducción a los sistemas de clasificación

Los sistemas de clasificación nacen de la necesidad de asignar una etiqueta, o una expresión lingüística (comúnmente llamadas clases o niveles) a las distintas alternativas evaluadas. En lugar de proporcionar un valor preciso y numérico para cada alternativa, la clasificación permite una evaluación más simple y visual, lo que puede ser útil para los decisores en múltiples situaciones.

Utilizar los métodos de clasificación tiene tres claras ventajas. La primera es la simplificación de situaciones complejas, al analizar cada alternativa únicamente en base a su pertenencia a las distintas clases, lo que a su vez conlleva a la segunda ventaja, que es una mejora en la comunicación de resultados. Finalmente, la categorización permite cierta flexibilidad en la toma de decisiones, ya que las alternativas se agrupan en diferentes

niveles de calidad. Por ejemplo, varias alternativas pueden pertenecer a la misma clase aun mostrando distintos niveles de su índice de rendimiento.

Es destacable mencionar que el uso de la categorización, más allá del simple etiquetaje, también puede ayudar a reducir el sesgo en la evaluación al evitar que los decisores se centren en pequeñas diferencias numéricas entre las alternativas. Generalmente, el interés se traslada a la consideración de las diferencias entre las distintas categorías.

Las técnicas de clasificación responden directamente a uno de los cinco problemas a los que intentan dar solución los métodos MCDM: Según Roy (1981), estos problemas son:

- **Problema de elección:** El objetivo del método MCDM es seleccionar una única alternativa o reducir el grupo de alternativas a un subconjunto equivalente o incomparable.
- **Problema de clasificación:** Las alternativas se clasifican en categorías ordenadas y predefinidas, objetivo principal del presente capítulo. Posteriormente, se propuso un subproblema dentro de esta categoría, nombrado problema de eliminación (Bana E Costa, 1996), que contiene únicamente dos clases definidas: alternativas aceptadas o alternativas eliminadas.
- **Problema de ranquin:** Las alternativas se ordenan en función de su preferencia decreciente, con ordenes completos o parciales si se consideran alternativas incomparables.
- **Problema de descripción:** El principal objetivo de este problema es facilitar información referente a cada una de las alternativas, para llevar a cabo una toma de decisión informada y coherente. Usualmente, después de aplicar un método MCDM se procede a un estadio de discusión y debate con los decisores.
- **Problema de diseño:** Añadido posteriormente por Keeney (1992), el objetivo de este problema es determinar la estrategia de diseño de una alternativa que cumpla con las principales necesidades y preferencias del decisor. Generalmente, el método MCDM es utilizado para generar una guía de diseño óptima de la alternativa.

En la práctica, múltiples autores han adaptado los métodos MCDM presentados en el Capítulo 2 (§ 2.3.1) para poder operar mediante la clasificación. Estas modificaciones se basan en la consideración de clases y en la inclusión de los conceptos conocidos como umbrales, utilizados para dividirlos. Por tanto, para poder aplicar un método de clasificación es primordial conocer el método MCDM que se utiliza para la evaluación de las alternativas. Dado que en la presente Tesis Doctoral MIVES ha sido escogido como núcleo del SEPIP, y no existiendo una extensión de clasificación, esta se debe desarrollar para ser implementada en el SEPIP.

6.2.2. MIVES Sorting

En este subapartado se presenta la extensión de MIVES para considerar la clasificación, llamada MIVES Sorting (llamada así por su significado en inglés). Una vez expuesta la técnica y el algoritmo completo para su aplicación, se muestra un breve ejemplo ilustrativo que permita clarificar su implementación.

Desarrollo de MIVES Sorting

Tal y como se ha comentado, para la adaptación de un método MCDM de ranking a un método MCDM de clasificación, es necesaria la consideración de categorías y de umbrales. Las categorías son grupos ordenados y predefinidos, llamados clases, en los cuales se organizan las alternativas. Cada clase representa una categoría específica en la que las alternativas que la componen comparten características o atributos similares, y sus taxonomías son decididas por los decisores. Así pues, pueden existir conjuntos de clase básica (A, B, C...) o lingüísticamente más complejas (Excelente, Notable, Bien...), que conforman un set de clases. En este set de n clases, existen $n-1$ umbrales que generan divisiones entre cada una de ellas, como puede apreciarse en la Figura 6.1.

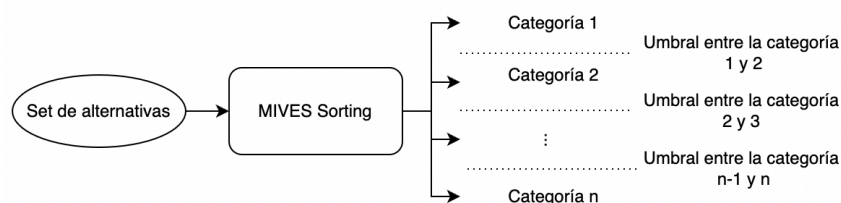


Figura 6.1 –Proceso de categorización de MIVES Sorting.

Sin embargo, la generación de umbrales es más compleja que la mera definición de las categorías, ya que depende directamente del conocimiento que tiene el decisor sobre cada una de las clases. Por ello, se propone el uso de dos tipos distintos de umbrales: los perfiles límite y los perfiles centrales. Si el decisor tiene conocimiento sobre las clases, puede utilizar los perfiles límite (Ishizaka et al., 2012). Los perfiles límite (lp , por sus siglas en inglés) son perfiles que indican el mínimo rendimiento (o índice) que una alternativa debe alcanzar para ser asignada a una clase, como se muestra en la Figura 6.2A. En este caso, sea $A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_m\}$; $i \in A$ el set de alternativas, set $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_r\}$; $r \in C$ el set de clases y $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_{r-1}\}$; $r \in T$ el set de perfiles límite. Una vez evaluada mediante MIVES, cada alternativa deberá ser comparada con cada perfil límite mediante la ecuación 6.1 para conocer a qué clase pertenece.

$$A_i \geq t_1 \Rightarrow A_i \in C_1$$

$$t_{r-1} > A_i \geq t_r \Rightarrow A_i \in C_r$$

...

[6.1]

$$t_{t-2} > A_i \geq t_{t-1} \Rightarrow A_i \in C_{t-1}$$

$$A_i < t_{t-1} \Rightarrow A_i \in C_t$$

Por otro lado, si el decisor no tiene claros cuáles son los valores que tienen los perfiles límite que delimitan cada una de las categorías, se pueden aplicar los perfiles centrales. Estos perfiles centrales (*cp*, por sus siglas en inglés) son ejemplos típicos de cada categoría, que contienen los valores de evaluación usuales en la misma. En este caso, se utiliza el sistema de proximidad mostrado en la Figura 6.2B, calculado mediante la ecuación 6.2. Es necesario comentar que esta formulación contiene la asignación optimista y pesimista, en el caso que la alternativa obtenga la misma proximidad a dos clases.

$$A_i \geq cp_1 \Rightarrow A_i \in C_1$$

$$A_i < cp_1 \text{ Y } (cp_1 - A_i) < (cp_2 - A_i) \Rightarrow A_i \in C_1$$

$$A_i < cp_1 \text{ Y } (cp_1 - A_i) = (cp_2 - A_i) \Rightarrow A_i \in C_1 \text{ optimista} \quad [6.2]$$

$$A_i < cp_1 \text{ Y } (cp_1 - A_i) = (cp_2 - A_i) \Rightarrow A_i \in C_2 \text{ pesimista}$$

$$cp_2 < A_i < cp_1 \text{ AND } (cp_1 - A_i) > (cp_2 - A_i) \Rightarrow A_i \in C_2$$

...

$$A_i < cp_t \Rightarrow A_i \in C_t$$

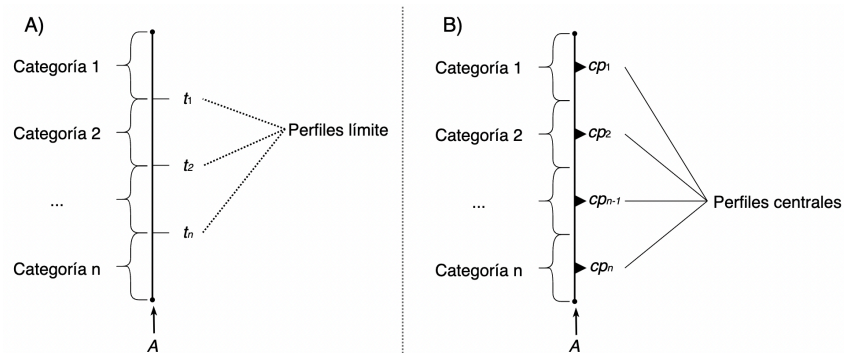


Figura 6.2 –Categorización en base a perfiles límite (A) y perfiles centrales (B).

MIVES Sorting permite generar dos tipologías de categorización diferentes. La primera, llamada categorización simple, es una división basada en el índice final obtenido por cada alternativa, permitiendo aplicar etiquetaje de clases como A, B, C..., entre otras. La segunda, llamada categorización compleja, es una categorización basada en el cumplimiento de ciertos requisitos. Basándose en el árbol jerárquico general de MIVES, pueden generarse etiquetas automáticas sobre ciertos valores, tapizando las alternativas. Por ejemplo, las alternativas, aparte de obtener un cierto índice final, pueden obtener etiquetas como “Ambientalmente sostenible: Excelente” y similares.

Por tanto, el algoritmo final de MIVES Sorting, mostrado en la Figura 6.3, actúa como una extensión del método original. Una vez generado el árbol jerárquico, y sus partes constituyentes (requerimientos, criterios e indicadores), pueden utilizarse las mismas para generar las categorías, especialmente en los casos de categorización compleja. Con estas categorías, debe procederse a la generación de umbrales.

El uso de MAUT en MIVES permite que estos umbrales (tanto los perfiles límite como los perfiles centrales) puedan asignarse tanto mediante los valores obtenidos por las funciones de valor, como con los valores de entrada de cada indicador. Finalmente, el valor obtenido de cada perfil es contrastado con el resultado de cada alternativa, lo que conlleva a la asignación de categorías.

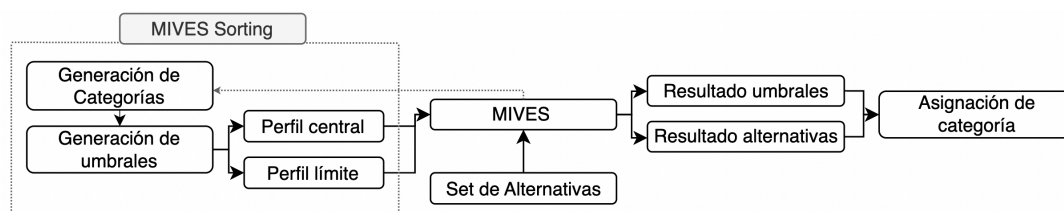


Figura 6.3 –Proceso de aplicación de MIVES Sorting.

Con todo, se considera que el proceso de aplicación del algoritmo tiene los siguientes pasos:

- **Paso 1:** Definir y estructurar el problema mediante el árbol jerárquico de MIVES, utilizando requerimientos (r), criterios (c) e indicadores (I). Definir las funciones de valor de cada indicador y asignar los pesos de decisión. Obtener el set de alternativas (A).
- **Paso 2:** Definir los tipos y el número de n clases de categorización (C) en base a los objetivos del problema. En este paso, se debe precisar el uso de la categorización simple y la compleja. Una vez decididos los tipos, se debe generar un set de clases, que puede ser ordenado y contener etiquetas.
- **Paso 3:** Definir los perfiles de cada clase. Este paso se lleva a cabo mediante la especificación de perfiles límite lp_{rj} , que indica el mínimo rendimiento necesario en cada criterio c_j para pertenecer a la clase C_r , o mediante los perfiles centrales cp_{rj} , que muestra el rendimiento de un ejemplo típico en el criterio c_j para pertenecer a la clase C_r . Se necesitan definir $j \cdot n - 1$ perfiles límite o $j \cdot n$ perfiles centrales.

- **Paso 4:** Asignar las clases. Mediante la comparación de los resultados de cada alternativa con los perfiles generados, se lleva a cabo la asignación de categoría.

Ejemplo ilustrativo

Para el ejemplo ilustrativo se vuelven a utilizar los datos del estudio de evaluación y priorización de infraestructuras llevado a cabo por el ayuntamiento de Barcelona (Pujadas et al., 2017), pues este artículo ofrece toda la información necesaria para realizar este ejercicio. Partiendo del mismo, se aplica el algoritmo de MIVES Sorting:

- **Paso 1:** Definir y estructurar el problema. Este paso viene dado por el propio estudio de Pujadas. La estructura del árbol jerárquico, con sus requerimientos, criterios e indicadores se muestra en la Figura 6.4. Los pesos asignados, y los valores obtenidos para cada alternativa en cada indicador (*c*, en el presente ejemplo ilustrativo) se muestran en las Tablas 6.1 y 6.2, respectivamente. Esta última tabla es una recuperación de la Tabla 4.16, que se muestra en este apartado para facilitar la comprensión del cálculo posterior.

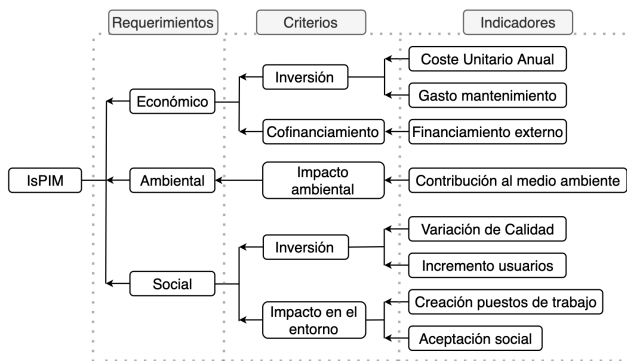


Figura 6.4 – Árbol MIVES generado a partir de la información del estudio de Pujadas et al. (2017).

Tabla 6.1 –Peso asignado a los indicadores. Fuente: Pujadas et al. (2017).

Indicador	Peso final
Coste unitario anual	11.20%
Gasto en mantenimiento	4.80%
Financiamiento externo	4.00%
Contribución al medio ambiente	40.00%
Variación de calidad	10.00%
Incremento de usuarios	10.00%
Generación de puestos de trabajo	6.00%
Aceptación social	14.00%

Tabla 6.2 – Valores de las alternativas presentadas. Fuente: Pujadas et al. (2017).

	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇	c ₈
A ₁	0.50	0.46	0.00	0.27	0.47	0.42	0.08	1.00
A ₂	0.96	0.25	0.02	0.12	0.40	0.64	0.02	1.00
A ₃	0.66	0.27	0.00	0.72	0.73	0.89	0.27	1.00
A ₄	0.01	0.48	0.00	0.19	0.24	0.20	0.32	0.75
A ₅	0.98	0.60	0.00	0.48	0.67	0.55	0.08	1.00
A ₆	0.96	0.49	0.00	0.47	0.48	0.75	0.02	1.00
A ₇	0.77	0.81	0.00	0.39	0.58	0.87	0.27	1.00
A ₈	0.89	0.49	0.00	0.35	0.26	0.62	0.17	0.75
A ₉	0.56	0.67	0.00	0.31	0.37	0.62	0.61	0.50
A ₁₀	1.00	0.27	0.05	0.78	0.84	0.79	1.00	1.00
A ₁₁	0.19	0.69	0.04	0.58	0.66	0.77	0.61	0.75
A ₁₂	0.43	0.69	0.04	0.58	0.18	0.64	0.61	0.75
A ₁₃	0.98	0.46	0.00	0.27	0.32	0.72	0.04	1.00
A ₁₄	0.85	0.21	0.01	0.37	0.56	0.58	0.38	1.00
A ₁₅	0.14	0.23	0.00	0.67	0.74	0.83	0.22	1.00

- **Paso 2:** Definir los tipos y el número de n clases de categorización (C) en base a los objetivos del problema. Para mostrar con claridad el procedimiento propuesto, en este ejemplo se utilizará la categorización simple, simultáneamente a tres tipos de categorización compleja.

La categorización simple contendrá tres clases (A, B, C) en base al resultado obtenido en el índice final. Por otro lado, las tres categorizaciones complejas referirán a etiquetas que señalarán alternativas sobresalientes en cada uno de los requerimientos. Por tanto, existirá la etiqueta “Excelentemente sostenible: Económico”, “Excelentemente sostenible: Ambiental” y “Excelentemente sostenible: Social”.

Nótese que el uso de estas etiquetas ofrece un valor añadido en los resultados. Pueden existir alternativas que, aún no estén posicionadas en lo alto del ranquin, sean sobresalientes en estos aspectos. Además, el etiquetaje mediante categorización compleja ofrece un añadido en la capacidad de comunicación de resultados, cómo se verá en este ejemplo ilustrativo.

- **Paso 3:** Definir los perfiles de cada clase. En este ejemplo se utilizarán perfiles límite lp_{rj} para el set de clases simples y las tres categorías complejas. Cómo se ha comentado, para generar estos perfiles se pueden establecer los índices mínimos obtenidos por las funciones de valor o los valores mínimos en los valores de los indicadores. Debido a la naturaleza del estudio, que utiliza múltiples atributos para evaluar cada uno de los indicadores, se ha optado por esta segunda opción.

Por tanto, deben generarse perfiles límite mediante la creación de alternativas que cumplan el mínimo valor. Para el set de clases simple, se necesitan dos perfiles, que corresponden a las divisiones entre las 3 clases.

Para las clases complejas, se requiere de un perfil por clase, ya que en este caso se contabiliza únicamente la membresía o no de la alternativa. Considerando un HI de 3, los valores dados a los atributos de cada uno de estos perfiles límite se muestran en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 – Atributos asignados a cada perfil límite.

	<i>Ip_A</i>	<i>Ip_B</i>	Económico	Ambiental	Social
Inversión inicial	4.500.000,00	4.500.000,00	3.750.000,00	-	-
Vida útil	20	15	10	-	-
Variación gastos de explotación	Gran ahorro	Ahorro	Ahorro	-	-
Probabilidad de financiamiento externo	Alta	Media	Alta	-	-
Cantidad financiada	Alta	Media	Media	-	-
Sumatorio Políticas activas ambientales	54	45	-	66	-
Sumatorio Campos de mejora en calidad	45	36	-	-	42
Incremento de usuarios	Alto	Medio	-	-	Medio
Puestos de trabajo directos ejecución	50-100	30-50	-	-	30-50
Puestos de trabajo directos explotación	2-6	2-6	-	-	10-20
Puestos de trabajo indirectos explotación	20-60	20-60	-	-	100-200
Aceptación social	Muy alta	Muy alta	-	-	Muy alta

- **Paso 4:** Asignar las clases. Mediante la introducción de los perfiles límite en el sistema de evaluación, se han obtenido los correspondientes valores mínimos. Para la clasificación simple, una alternativa debe obtener un índice mínimo de 0.499 para ser considerada Clase B, y 0.601 para ser Clase A.

Por otra parte, los perfiles referentes a cada una de las etiquetas de excelencia en sostenibilidad han marcado los valores mínimos a obtener para cada requerimiento. Estos valores son 0.124, 0.222 y 0.282 en los requerimientos económico, ambiental y social, respectivamente. Para ser consideradas parte de alguna de estas categorías complejas, cada alternativa debe mostrar estos valores mínimos, indiferentemente de los obtenidos en los otros requerimientos.

En la Tabla 6.4, se muestran los valores de los indicadores ponderados agregados por requerimiento, con su clase asignada y si tienen membresía a una categoría compleja.

Como puede observarse, en vez de un ranquin se obtiene una clasificación por clase que viene acompañada de una etiqueta de excelencia por rendimiento. Si bien estas etiquetas se han generado en base a un umbral positivo mínimo, también pueden utilizarse valores máximos para asignar etiquetas de alerta por rendimientos preocupantemente negativos. Esta característica puede aumentar el atractivo de los métodos MCDM de evaluación de alternativas al dar margen de maniobra a la administración pública en la selección de proyectos.

Tabla 6.4 – Valores agregados de las alternativas, su clase y su membresía a las categorías complejas.

	Económico	Ambiental	Social	Total	Clase	Económica	Ambiental	Social
A1	0.078	0.108	0.234	0.420	C	NO	NO	NO
A2	0.120	0.048	0.245	0.414	C	NO	NO	NO
A3	0.087	0.288	0.318	0.693	A	NO	SI	SI
A4	0.024	0.076	0.168	0.268	C	NO	NO	NO
A5	0.139	0.192	0.267	0.597	B	SI	NO	NO
A6	0.131	0.188	0.264	0.583	B	SI	NO	NO
A7	0.125	0.156	0.301	0.582	B	SI	NO	SI
A8	0.123	0.140	0.203	0.466	C	NO	NO	NO
A9	0.095	0.124	0.206	0.424	C	NO	NO	NO
A10	0.127	0.312	0.363	0.802	A	SI	SI	SI
A11	0.056	0.232	0.285	0.573	B	NO	SI	SI
A12	0.083	0.232	0.224	0.538	B	NO	SI	NO
A13	0.132	0.108	0.246	0.486	C	SI	NO	NO
A14	0.106	0.148	0.277	0.530	B	NO	NO	NO
A15	0.027	0.268	0.310	0.605	A	NO	SI	SI

Además, permite generar una estrategia de comunicación mucho más clara y visual, como se muestra en la Figura 6.5. Nótese como esta exposición de resultados, que muestra inherentemente las alternativas en su ranquin de índice final, permite generar estrategias mucho más flexibles en la selección de las alternativas. En el marco de esta Tesis, la administración pública podría mostrar, por ejemplo, mucho más interés en las alternativas A7 o A11 que no con sus predecesoras en la clase B, debido a sus grandes impactos económicos y sociales o ambientales y sociales, respectivamente.

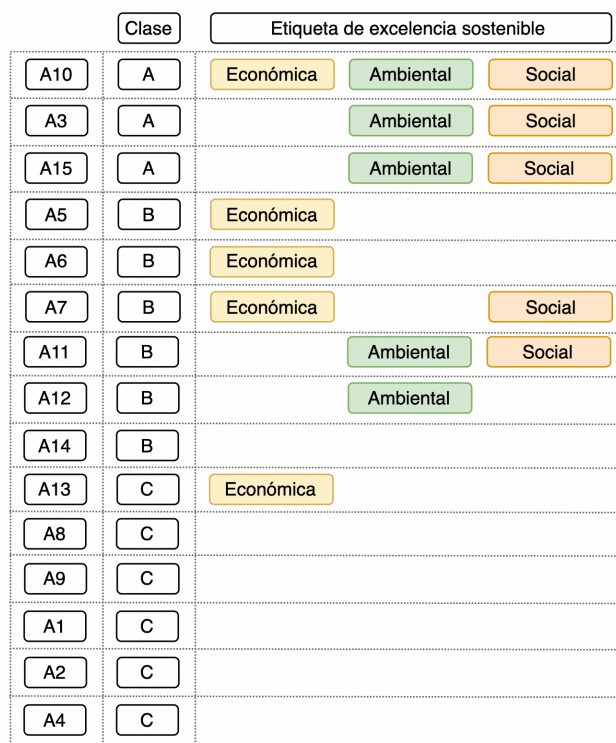


Figura 6.5 – Comunicación de resultados de MIVES Sorting.

6.3. SISTEMAS DE OPTIMIZACIÓN DE ALTERNATIVAS

De forma opuesta a los métodos de categorización, los sistemas de optimización tienen como objetivo dar una lista completamente ordenada de alternativas. Esta lista se genera con la finalidad de maximizar un resultado en concreto, como puede ser un índice.

A continuación, se presenta una introducción a los métodos de optimización, que son analizados en base a las necesidades del SEPIP. Este análisis sirve para determinar si alguna de estas técnicas es apta para su implementación en el sistema en desarrollo.

6.3.1. Introducción a los sistemas de optimización

Los sistemas de optimización han sido extensamente estudiados debido a su capacidad para maximizar o minimizar una función objetivo considerando condiciones de restricción. Se han propuesto diversas divisiones para clasificar estas técnicas, desde categorizaciones basadas en dificultad (directas o programables, dependiendo del número de iteraciones necesarias) hasta divisiones centradas en el uso de reglas. Entre estas últimas, se encuentran los métodos deterministas, que emplean reglas predefinidas y algoritmos precisos sin involucrar procesos aleatorios o genéticos, y los métodos basados en conceptos biológicos de evolución, que utilizan operadores de selección, cruce y mutación para explorar el espacio de soluciones de manera probabilística.

Sin embargo, los métodos de optimización pueden clasificarse según algunas de sus características, como el tipo de variables de decisión, el dominio, la consideración de incertidumbre o la naturaleza discreta o continua de las variables. En concreto, en esta Tesis Doctoral se han identificado 8 categorías, mostradas en la Figura 6.6.

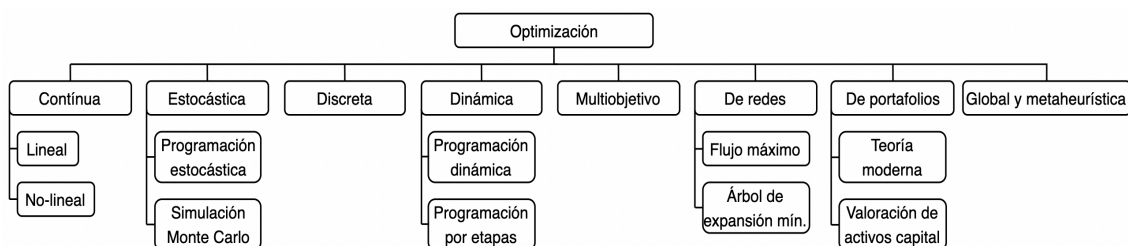


Figura 6.6 –Categorías identificadas de métodos de optimización.

La primera es la de los métodos de optimización continua. En estos métodos, las variables de la función pueden tomar valores en un rango continuo, por lo que el dominio de búsqueda de la optimización es infinito. Esta categoría se subdivide, a su vez, en optimización continua lineal y optimización continua no-lineal. Una revisión de los principales métodos de optimización continua puede encontrarse en (Neumaier, 2004).

En la optimización continua lineal, tanto la función objetivo como las restricciones son lineales. Este método se ha utilizado ampliamente, sobre todo en asignación de recursos y planificación económica (Ghate, 2020), así como en procesos industriales como el refinado con absorción contracorriente (Hassan et al., 1996). Por el contrario, en la optimización continua no-lineal la función, las restricciones, o ambos, no son lineales. Estos métodos son comúnmente aplicados en sistemas de alta complejidad, y se han propuesto una gran cantidad de algoritmos con el objetivo de reducir los esfuerzos

computacionales y aumentar la consistencia de los resultados (Rao et al., 2012), como el algoritmo “*Teaching-Learning-Based Optimization*” o TLBO mostrado en la Figura 6.7.

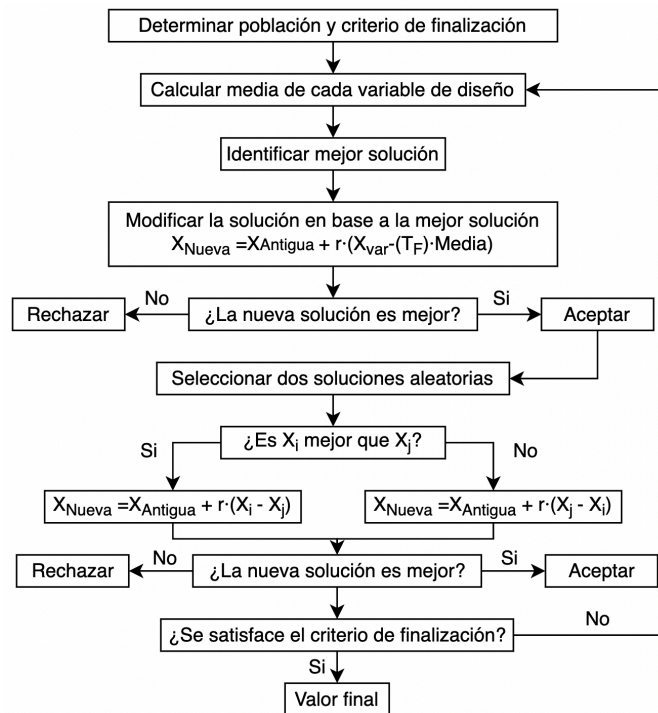


Figura 6.7 –Algoritmo TLBO. Adaptado de Rao et al. (2012).

La segunda es la de las técnicas de optimización estocástica. En estas técnicas, se introduce la incertidumbre en la decisión, buscando encontrar las soluciones óptimas mediante la consideración de escenarios que, a su vez, sean más robustas. Dentro de esta categoría, existen dos claras subcategorías: la programación estocástica y la optimización de Monte Carlo. En la programación estocástica, se utilizan los modelos de programación expuestos en la categoría anterior considerando variables estocásticas (variables aleatorias que pueden tomar distintos valores). Dada la gran cantidad de posibles datos ligados a incertidumbre, y a su vez la extensión de la categoría anterior existe un abanico formidable de algoritmos de esta subcategoría. Un ejemplo es el método estocástico de descenso en espejo por bloques (SBMD, por sus siglas en inglés), para resolver problemas de optimización estocásticos a gran escala (Dang & Lan, 2013). Respecto a la optimización Monte Carlo, este método utiliza un sistema muy similar al expuesto en el capítulo anterior. Mediante la simulación de escenarios, se estima el rendimiento esperado de cada una de las alternativas. Este método ha sido extensamente aplicado para optimizar alternativas, en estudios que han analizado su robustez (Hendrix & Olieman, 2008) y su sesgo (Campioni et al., 2005).

La tercera categoría comprende los métodos conocidos como optimización discreta. Estos métodos utilizan funciones y restricciones que únicamente pueden tomar valores discretos (valores específicos y aislados, sin incluir valores intermedios entre ellos). Estas técnicas tienen la particularidad de poder ser fácilmente aplicables en conjunto con métodos MCDM (Lopez & Aguilar, 2023), y muchos son los autores que han propuesto distintos procedimientos. Algunos de los ejemplos más conocidos son el problema del vendedor viajero (TSP, por siglas en inglés), el problema de asignación (AP,

por sus siglas en inglés) o el problema del camino más corto (SPP, por sus siglas en inglés). El TSP consiste en encontrar la ruta más corta para que el vendedor visite todas las ciudades consideradas exactamente una vez y regrese al punto de partida, tal y como se muestra en la Figura 6.8A (Feillet et al., 2005). En el caso que el viajante pueda volver al punto de partida, el TSP se modifica al problema de ruta del vehículo (VRP, por siglas en inglés) que considera múltiples rutas (Liu et al., 2014), tal y como muestra la Figura 6.8B. El AP, busca asignar un conjunto de tareas a un conjunto de agentes de manera óptima (Gaudioso et al., 2010). Cada tarea debe ser asignada a exactamente un agente, y el objetivo es minimizar o maximizar el costo total de asignación. Finalmente, en el SPP la optimización se basa en encontrar el camino más corto entre dos nodos específicos en un grafo ponderado (Ramaswamy et al., 2005). Cada uno de estos métodos ha sido diseñado respectivamente para dar solución a un problema específico. Necesidades específicas en logística, planificación de rutas y diseño de circuitos, asignación de tareas, o navegación, el enrutamiento de redes y la optimización de transporte dieron lugar a problemas con objetivos muy concretos.

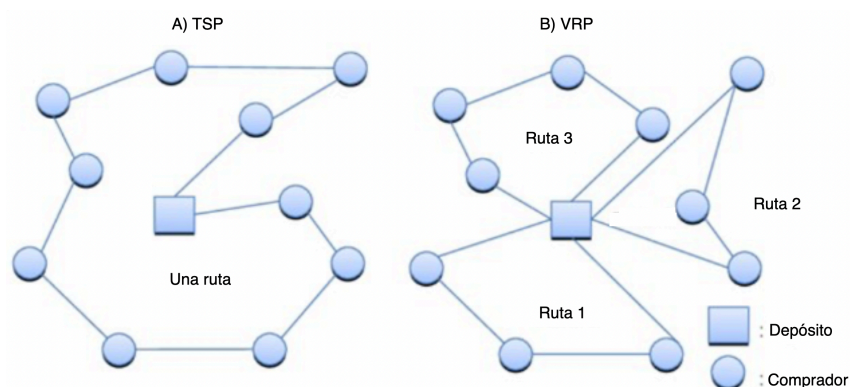


Figura 6.8 –Representación de TSP y VRP. Adaptado de Liu et al. (2014).

Por otro lado, está la categoría de optimización dinámica. Estos métodos consideran el tiempo como variable fundamental, estudiando el problema desde el enfoque de que las decisiones se toman en diferentes momentos y tienen efectos a largo plazo. Se divide, a su vez, entre la programación dinámica y la programación por etapas.

La programación dinámica divide un problema de grandes dimensiones en subproblemas más pequeños, que permiten aplicar la recursión (la función de un algoritmo de llamarse a sí mismo) para optimizar el problema. Estas técnicas se utilizan sobre todo en gestión de inventarios o alineación de secuencias biológicas (Nalbantoğlu, 2014).

La programación por etapas, en cambio, utiliza programación no lineal o lineal para calcular problemas con múltiples etapas definidas de forma secuencial. Se considera que estos problemas evolucionan, o sufren modificaciones, con el tiempo. Un claro ejemplo son aplicaciones de análisis temporal de la fiabilidad (Shi et al., 2020) o posibilidad de fallo (Jiang et al., 2021) de las infraestructuras.

La quinta categoría, la optimización multiobjetivo, contiene aquellos algoritmos que deben optimizar varias funciones objetivo simultáneamente. Generalmente, la mayoría de estos métodos aplican la teoría de optimalidad de Pareto (TOP), que detecta

soluciones no dominadas. Estas soluciones, son soluciones que no pueden ser mejoradas en una de las funciones objetivo sin empeorar el resultado obtenido en las demás, y a su vez, obtienen el mayor valor agregado. Estos métodos han sido también adaptados en múltiples situaciones dependiendo directamente de las funciones objetivo y el conflicto existente entre ellas, como, por ejemplo, estudios de radioterapia de intensidad modulada que deben maximizar volúmenes de dosis y minimizarlos según órganos en riesgo (Fiege et al., 2011), o análisis de las propiedades de partículas en enjambre (Baumgartner et al., 2004).

En la sexta categoría se enmarcan las técnicas de optimización de redes, que analizan el paso de un flujo a través de una red. Esta categoría se subdivide en los problemas de flujo máximo (MFP, por sus siglas en inglés) y los problemas de árbol de expansión mínimo (MSTP, por sus siglas en inglés). El primero tiene como objetivo encontrar el flujo máximo que puede pasar por una red que está sujeta a restricciones de capacidad. Este tipo de problemas se utiliza principalmente en estudios de logística, telecomunicaciones o potencia eléctrica (Han et al., 2014). El segundo, se centra en encontrar el árbol de expansión mínimo que conecta a todos los nodos de una red con el menor costo posible, tal y como se muestra en la Figura 6.9. Por ello, ha sido ampliamente utilizado en la planificación de redes de distribución (Naji-Azimi et al., 2010).

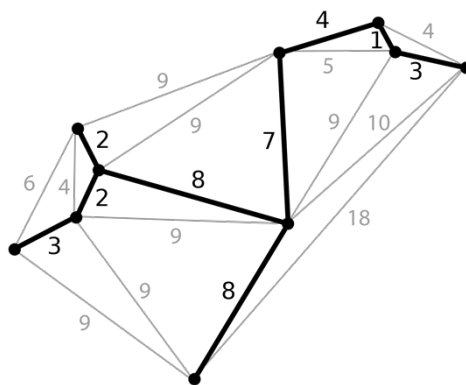


Figura 6.9 –Representación del MSTP.

La penúltima categoría surge principalmente de estudios económicos, y es la optimización de portafolios. Estas técnicas se basan en encontrar la combinación óptima de activos financieros para la cartera de un inversionista, utilizando restricciones de índole económica. Está compuesta por métodos que utilizan la teoría moderna de portafolios (MPT, por sus siglas en inglés) y los que se basan en el modelo de valoración de activos capital (CAPM, por sus siglas en inglés). Las técnicas que utilizan el MPT buscan esta combinación utilizando restricciones de riesgo financiero, el cual intentan minimizar (Jang & Seong, 2023). Por otro lado, los modelos basados en CAPM analizan el posible rendimiento futuro de un activo para decidir su inclusión en un portafolio diversificado (Bornholt, 2007).

Finalmente, el último grupo es el de optimización global y metaheurísticas. Estos métodos se enfocan en encontrar soluciones optimizadas en espacios complejos o no-lineales. Según las necesidades de cada uno de estos problemas se han desarrollado múltiples técnicas, como por ejemplo los algoritmos evolutivos, genéticos o la búsqueda

Tabú. Los algoritmos evolutivos se inspiran en la teoría de la evolución natural y contienen a los algoritmos evolutivos, así como múltiples estrategias y programaciones evolutivas. Estos utilizan conceptos biológicos como la selección, el cruce y la mutación, para explorar soluciones en un espacio de búsqueda y encontrar aproximaciones a soluciones óptimas. En el caso de los algoritmos genéticos, estos se centran en la evolución y manipulación de estructuras genéticas, como cromosomas y genes, para resolver problemas de optimización (Gero & Kazakov, 2001). Por otro lado, la búsqueda Tabú emplea un mecanismo de memoria que evita explorar áreas ya visitadas en el espacio de soluciones. Es eficaz para problemas complejos o con una gran cantidad de datos, ya que permite escapar de óptimos locales (Hageman et al., 2003) tal y como muestra la Figura 6.10. En estos óptimos locales, cómo el mínimo local de la figura, pueden darse problemas cíclicos dónde sólo se encuentra la solución local. Mediante el método tabú, que evita volver a utilizar las combinaciones ya analizadas, puede evitarse ese problema, encontrando el mínimo, o solución, real.

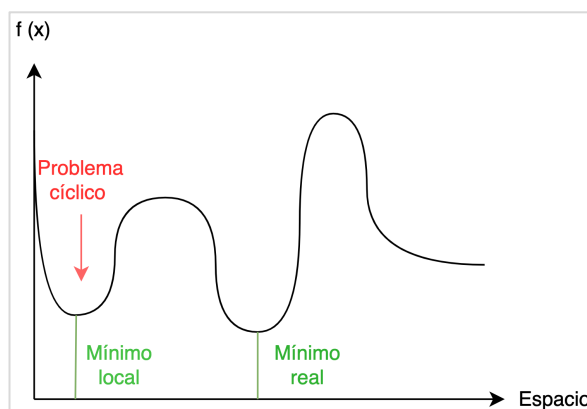


Figura 6.10 –Representación de la búsqueda Tabú.

6.3.2. Análisis y selección del método de optimización

La división de los distintos métodos de optimización existentes en base a sus características permite analizar qué categoría cumple con las necesidades del SEPIP.

En este contexto, el uso de MIVES como núcleo base del sistema de cálculo nos proporciona un conjunto de índices de sostenibilidad para cada inversión en forma de valor exacto. Estos índices, generan una función con un solo objetivo, que se debe optimizar en base a una restricción básica: el valor máximo de gasto, marcado por el presupuesto asignado por la administración pública. Por ello, se considera que la optimización discreta tiene las características adecuadas para resolver el problema. Sin embargo, en el capítulo anterior se ha implementado en el sistema la capacidad de consideración de incertidumbre, utilizando el método Monte Carlo. En este caso, se puede considerar la optimización estocástica por simulación de Monte Carlo, o bien optar por un enfoque determinista, en el que se consideran únicamente los valores más probables. Para el marco de esta Tesis, se considera que Monte Carlo proporciona suficiente información sobre los riesgos asociados a la selección de una alternativa frente a otra. Por ende, se propone la implementación del método de optimización discreta Knapsack en el sistema en desarrollo, que además ya ha sido aplicado en estudios de priorización con el uso de MIVES (Hosseini et al., 2018).

Optimización discreta: Método Knapsack

El método Knapsack es un clásico problema de optimización discreta, también considerado un problema básico de la optimización de combinatoria. Esta técnica parte de la idea de introducir elementos en una mochila, maximizando el valor total de los elementos dada una restricción de capacidad peso fija.

En el contexto de esta Tesis, los elementos equivalen a las alternativas, el valor asignado a cada elemento a su índice MIVES, y la restricción de capacidad al presupuesto total de la administración pública.

Para formular el problema, es necesario definir la ecuación de maximización, así como la restricción y operación. Por conveniencia, se considera el conjunto $N = \{1, 2, \dots, n\}$; $j \in N$. Dado un set de alternativas tal que $A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_n\}$ con sus correspondientes sets de índices MIVES $I = \{I_1, I_2, I_3, \dots, I_n\}$ y presupuestos $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$, dado un presupuesto total T de la administración, la ecuación de maximización equivale a la ecuación 6.4, la restricción de peso a T y la operación binaria, lo que indica que cada alternativa sólo puede considerarse una vez (1) o no considerarse (0).

$$Max_f = \sum_{j=1}^n I_j \cdot p_j \leq T \quad [6.4]$$

Ejemplo ilustrativo

Para mostrar la aplicación del método implementado en el sistema, se utilizan de nuevo los datos del estudio de evaluación y priorización de infraestructuras llevado a cabo por el ayuntamiento de Barcelona (Pujadas et al., 2017), ya que este ofrece los datos presupuestarios reales mostrados en la Tabla 6.5. Además, esta tabla muestra los índices MIVES obtenidos por cada alternativa.

Mediante la aplicación de la ecuación 6.4 programada en el Solver de Excel, y considerando un presupuesto $T = 135,500,000.00$ €, que equivale a aproximadamente la mitad de la suma de presupuestos, se ha optimizado la combinación mostrada en la Tabla 6.5, dónde se marca la consideración (1) o no consideración (0) de las alternativas.

Utilizando la combinación propuesta, se obtiene la máxima suma posible de índices MIVES (6.587), al aceptar el conjunto de inversiones que tienen un coste total de 128,405,230.00 €, inferior a la restricción T .

Tabla 6.5 – Índices MIVES obtenidos para cada alternativa y su presupuesto, con su consideración en la combinación óptima.

	Índices	Presupuesto	Combinación
A ₁	0.420	4,860,000.00	1
A ₂	0.414	800,000.00	1
A ₃	0.693	2,000,000.00	1
A ₄	0.268	25,000,000.00	0
A ₅	0.597	27,350,000.00	0
A ₆	0.583	387,000.00	1
A ₇	0.582	15,919,055.00	1
A ₈	0.466	10,000,000.00	1
A ₉	0.424	12,000,000.00	1
A ₁₀	0.802	40,000,000.00	1
A ₁₁	0.573	800,000.00	1
A ₁₂	0.538	600,000.00	1
A ₁₃	0.486	1,039,175.00	1
A ₁₄	0.530	90,000,000.00	0
A ₁₅	0.605	40,000,000.00	1

6.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Respecto a las técnicas de categorización, la información recolectada ha mostrado la necesidad de desarrollar un nuevo método de categorización, dando lugar a MIVES Sorting. Este nuevo método, complementario al uso y aplicación de MIVES, permite no sólo asignar una categoría a cada alternativa en base a su índice final, sino generar un sistema de umbrales que funcionan como etiquetas. Estas etiquetas pueden ser aplicadas para realzar características de especial interés en cada alternativa, ya sea de forma positiva o negativa, mejorando la comunicación de resultados a públicos no expertos en el tema. Además, la categorización asegura un cierto margen de maniobra de la administración pública, que puede tener especial interés en ciertas inversiones por razones ajenas a las consideradas en el proceso de toma de decisión, como que una inversión pueda tener continuidad en futuros proyectos.

De forma opuesta a la categorización, la optimización detalla la combinación exacta de alternativas en base a un presupuesto cerrado, por lo que la administración no cuenta con margen de maniobra en su selección, pero obtiene una maximización de los índices de sostenibilidad. El estudio de métodos existentes ha permitido seleccionar una técnica de optimización discreta, Knapsack, para ser implementada en el SEPIP que se está desarrollando.

Es de especial interés comentar cómo el uso del sistema Monte Carlo, seleccionado en el capítulo anterior, se ha ignorado en la categorización y la optimización. En ambos casos, la incertidumbre se ha obviado, considerando que la información de probabilidades de superación y riesgos de selección de alternativas no tienen un componente esencial en la gestión de resultados, siendo así informaciones importantes complementarias al resultado final.

7. INTRODUCCIÓN A LOS ÍNDICES NEGATIVOS

7.1. INTRODUCCIÓN

Considerando la última de las propuestas de desarrollo expuestas en el Capítulo 2 (§ 2.5), es necesario dotar al SEPIP de capacidad de considerar en los indicadores efectos no sólo desfavorables, sino perjudiciales o indeseados.

Con este objetivo, en la segunda sección del capítulo se lleva a cabo una revisión literaria sobre los indicadores negativos, usualmente conocidos como indicadores de coste, analizando cómo se consideran en el campo de la decisión multicriterio. En la tercera sección se desarrolla una técnica capaz de gestionar estos indicadores para obtener índices negativos, extendiendo así el clásico método MIVES. Para mostrar la implementación de la técnica desarrollada y estudiar sus impactos, en la cuarta sección se aplica a un caso de estudio ya trabajado en esta Tesis Doctoral. Finalmente, se muestran las conclusiones de este capítulo, para analizar si se han cumplido satisfactoriamente los objetivos planteados y las necesidades de desarrollo del SEPIP.

7.1.1. Razón de ser

En el campo de las decisiones multicriterio, es fundamental utilizar indicadores para cuantificar los diferentes impactos de cada alternativa evaluada. Independientemente del método MCDM utilizado, estos indicadores se agrupan en conjuntos de criterios que representan los aspectos clave de interés en la toma de decisiones.

Por lo general, los indicadores se dividen en categorías según si se refieren a efectos positivos o negativos en la decisión. Estas divisiones, son comúnmente conocidas como indicadores de beneficio, o indicadores de coste. En el caso de MIVES, el MCDM utilizado como núcleo de esta Tesis Doctoral, en ambos casos se considera que los indicadores tienen un efecto positivo o negativo en función de cómo modifican las funciones asociadas a ellos. Por ejemplo, los indicadores de beneficio tendrán funciones crecientes (aumenta el beneficio conforme aumenta el indicador), mientras que los indicadores de coste tendrán funciones decrecientes (disminuye el beneficio conforme aumenta el indicador). En ambos casos, a la contribución mínima se le asigna el valor nulo (0), lo que da lugar a una agregación constante de indicadores positivos.

Sin embargo, existen situaciones en la que los indicadores con funciones decrecientes pueden no ser capaces de capturar la importancia real del impacto negativo, como por ejemplo pérdidas económicas inasumibles o impactos ambientales y sociales altamente perjudiciales. Ante estos casos, algunos autores han propuesto el uso de funciones de utilidad negativas (Thaler, 2015) o la consideración del signo negativo en la agregación WSM (Yaylacı y Düzgün, 2017).

También la Unión Europea ha mostrado especial interés en la consideración de indicadores de alto impacto negativo. Es prueba de ello el nuevo Reglamento de divulgación en materia de finanzas sostenibles, que incluye 64 indicadores negativos, llamados indicadores adversos, que deben tenerse en cuenta en las inversiones a partir de marzo de 2021. Estos indicadores, definidos por las autoridades europeas de supervisión (ESAs, por sus siglas en inglés), hacen referencia a impactos negativos materiales o potencialmente materiales en los factores de sostenibilidad causados o agravados por las decisiones de inversión (ESMA, 2021). Estos avances en la consideración de los efectos adversos demuestran la importancia de incorporar indicadores que reflejen los impactos negativos en las decisiones multicriterio, con el objetivo de lograr una evaluación más completa y equilibrada de las alternativas, permitiendo tomar decisiones más informadas y sostenibles.

7.2. REVISIÓN LITERARIA

Una vez presentada la necesidad de incorporar el efecto de indicadores adversos, se procede a llevar a cabo una revisión literaria sobre cómo se han aplicado los indicadores negativos en el campo de MCDM. Como se ha procedido en el Capítulo 2 (§ 2.3.2), se utiliza la estructura de cinco partes para una revisión sistemática (Cooper, 1998): (i) formulación del problema, (ii) determinación de la estrategia de recopilación de datos, (iii) evaluación de los datos recuperados, (iv) análisis e interpretación de la literatura y, finalmente, (v) presentación de las conclusiones.

7.2.1. Metodología de recopilación de datos

La pregunta principal formulada en esta revisión ha sido (i): ¿Cómo se ha aplicado el efecto negativo o perjudicial en el cálculo de indicadores? Además, se ha articulado esta pregunta en base a los tres objetivos mostrados en la figura 7.1: el primero, el estudio general de indicadores, permitiendo estudiar cómo se evalúan, el segundo, conocer específicamente cómo se gestionan los indicadores de efectos negativos, y el tercero, descubrir el proceso de implementación de efectos negativos en métodos MCDM.

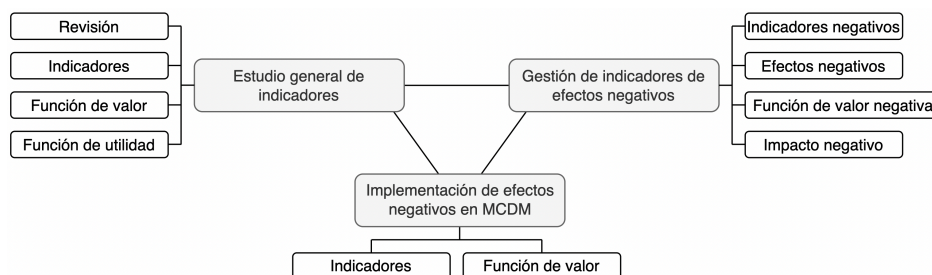


Figura 7.1 –Representación de los objetivos de la revisión y sus palabras clave.

En la estrategia de recopilación de datos (ii) se ha utilizado la base de datos de WoS, pues este buscador tiene acceso a más de 12.000 revistas de alto impacto (Reuters, 2017). Sin embargo, debido a bajos resultados obtenidos en el tercer objetivo, se ha utilizado Google Scholar (GS) para complementar y aumentar la literatura de análisis.

En la Figura 7.2 se muestran las combinaciones de palabras clave junto a las restricciones de campo utilizadas, así como los operadores Booleanos que se han introducido en cada investigación. Los resultados obtenidos en cada uno de los objetivos planteados se han filtrado para poder recopilar la información deseada.

El primer filtro, aplicado a los resultados del primer objetivo, ha sido la opción directa de WoS “Review”, que marca únicamente esos artículos académicos que están considerados revisiones literarias. El segundo, también opción directa de WoS “Categories”, selecciona los artículos referentes a las categorías de interés, que en este estudio han sido: ciencias ambientales, ciencia y tecnología sostenible, ingeniería ambiental, economía, ciencias sociales interdisciplinarias, ingeniería civil, ciencia política, investigación de gestión de operaciones, y matemáticas aplicadas. Dada la gran cantidad de información contenida en el primer objetivo, se ha utilizado una restricción temporal de WoS (2011-2021) para obtener información actualizada y alineada con los elementos más modernos de investigación.

Posteriormente a la aplicación de los filtros de WoS, se ha procedido a la eliminación de duplicados y a la preselección según lectura de título y resumen. Mediante una lectura profunda se han seleccionado aquellos artículos que cumplieran con los requisitos de la revisión literaria, obteniendo 21, 6 y 46 resultados para cada objetivo respectivamente, que se presentan en la siguiente subsección. Finalmente, los resultados que contienen información relevante sobre el efecto negativo en el cálculo de indicadores se han analizado en la última subsección.

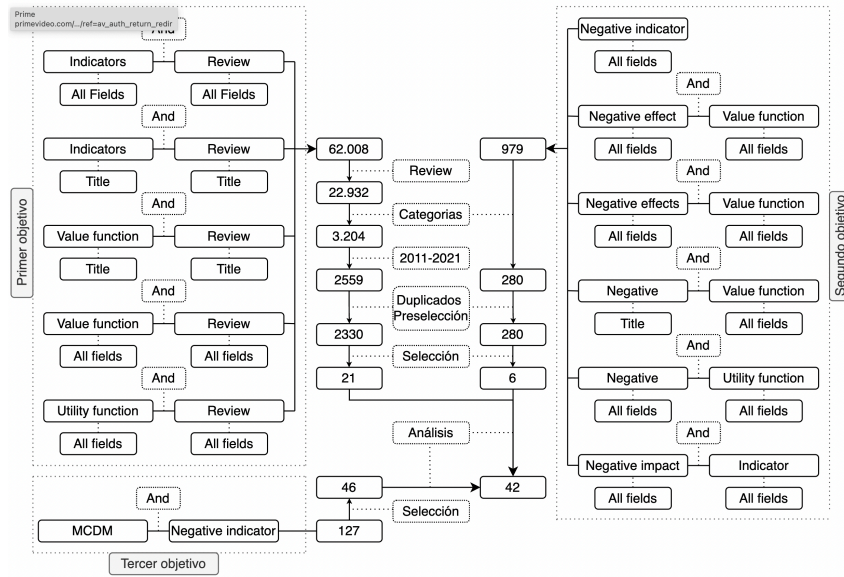


Figura 7.2 –Proceso de revisión literaria y sus resultados.

7.2.2. Presentación de resultados

Es importante destacar que se ha observado una escasa cantidad de resultados en la búsqueda relacionada con el estudio general de indicadores. Una de las razones principales es la confusión común entre los términos "índices" e "indicadores", pues varios autores utilizan la expresión "indicadores de sostenibilidad" cuando en realidad están haciendo referencia a índices de sostenibilidad (de Pascale et al., 2021; Gunnarsdottir et al., 2020; Liu, 2014; Saidani et al., 2019). Esta falta de claridad en la terminología dificulta la búsqueda y la interpretación de los resultados. Aun así, algunos artículos han aplicado una taxonomía adecuada en el campo de las decisiones multicriterio (Cinelli et al., 2014; Herva & Roca, 2013; Kumar et al., 2017), y otros han diferenciado entre la definición de índices e indicadores (Greco et al., 2019; Waas et al., 2014). Tal y como muestra la Figura 7.3, estos estudios muestran claramente el proceso de transformación de los datos de entrada a índices.

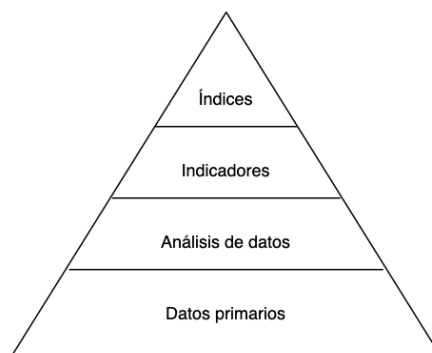


Figura 7.3 –Proceso de generación de un índice MCDM. Adaptado de Waas et al. (2014).

Además, otro posible motivo del bajo número de resultados seleccionados es la amplia variedad de publicaciones especializadas que se centran en indicadores de un solo ámbito específico. Entre ellos se incluyen estudios sobre indicadores culturales

(Hernández-Morcillo et al., 2013; la Rosa et al., 2016), indicadores ambientales y de procesos empresariales (Herva et al., 2011; Rahdari & Rostamy, 2015), así como indicadores para la gestión de proyectos (Stanitsas et al., 2021), economía circular (Smol et al., 2017), ciclo de vida (Onat et al., 2017; Wu et al., 2014), desarrollo urbanístico (Munier, 2011), indicadores exógenos a la industria de la construcción (Asamoah et al., 2019) y aspectos sociales y políticos (Chaffin et al., 2016; Noll, 2013). Estos estudios ofrecen una visión diversa y detallada de cómo se abordan los indicadores en diferentes contextos, lo cual contribuye a enriquecer la revisión literaria.

En ningún artículo de este primer objetivo se proporciona información explícita sobre el procedimiento de cálculo de indicadores perjudiciales, por lo que no han sido considerados en el análisis de resultados.

En cuanto a los artículos relacionados con el segundo objetivo (gestión de los indicadores de efectos negativos), la baja cantidad de resultados obtenidos se debe a razones diferentes a las del primer objetivo. Si bien hay publicaciones que mencionan los efectos negativos, éstas presentan soluciones poco desarrolladas desde el punto de vista de cálculo negativo, como la consideración de estos efectos como indicadores de coste con valores positivos (Liu, 2014; Malczewski & Ogryczak, 1996), el uso de funciones de utilidad no lineales (Carassus et al., 2015), y consideraciones de coste en situaciones de toma de decisiones bajo riesgo (Kimball, 1993; O'Neill, 2001) o variación de riqueza individual y empresarial (Aloqeili, 2005). Por ello, los artículos de este objetivo tampoco son considerados en el análisis de resultados.

Los resultados obtenidos en el tercer objetivo, referidos a la implementación de efectos negativos en métodos MCDM, son más esclarecedores. Esta revisión ha permitido comprender mejor la parte matemática de la agregación de indicadores, pues todos los estudios revisados comparten la idea de la existencia de indicadores de efecto adverso, y la mayoría (42 de 46) los incluye en sus cálculos. Sin embargo, hay casos en los que el indicador negativo no se incluye en el cálculo (Vadrevu et al., 2010; Zhao et al., 2016), o solo se menciona la necesidad de invertir los valores de los indicadores o aplican análisis de comprensión de datos (Liu et al., 2012). Los 43 artículos en los que se define matemáticamente la agregación de indicadores de efecto negativo se dividen según su procedimiento de cálculo: transformación mediante inversión de datos, aplicación directa en soluciones ideales, y uso de indicadores con valores e índices negativos.

Los artículos que emplean la transformación mediante inversión de datos siguen un procedimiento común en el que esta inversión se lleva a cabo durante la normalización de los indicadores, antes de aplicar un método MCDM. Aun así, existen diferencias entre la consideración del signo de los indicadores de coste. En el caso de ser considerados positivos, evitando el uso de signos negativos, se aplican formulaciones similares a la ecuación 7.1, en los que a medida que el dato del indicador (u) crece, disminuye su aportación al valor del propio indicador (X).

$$X = \frac{u_{\text{máx}} - u}{u_{\text{máx}} - u_{\text{min}}} \quad [7.1]$$

Esta técnica de normalización es utilizada por múltiples métodos MCDM. En TOPSIS se ha observado su uso en seis evaluaciones: de polución aérea en ciudades sostenibles (Wang et al., 2017), de acoplamiento de subsistemas en ciudades (Song et al., 2021), de renovación de múltiples vecindarios (Zhu et al., 2019), de transformación económica y regeneración de recursos en ciudades (Ma, 2019), de acciones políticas (Li et al., 2021) y de evolución de las ciudades sostenibles (Wang et al., 2020), aunque este último contiene un error tipográfico en la formulación. En MEEM (del inglés “*Matter Element Extension Model*”) aparece en dos análisis: de sostenibilidad en generación de energía procedente de biomasa (Song et al., 2020) y de proveedores de carbón para plantas térmicas (Tan et al., 2014). En VIKOR, se utiliza en dos estudios basados en la selección de proveedores (Dai et al., 2008; Lixin et al., 2008), aunque el estudio de Lixin no especifique con claridad la normalización utilizada, por lo que no se considera en el análisis de resultados.

Aun así, el método MCDM más utilizado es el WSM, al ser una forma simple de generar un índice de sostenibilidad agregando indicadores. En esta línea se encuentran estudios de análisis de ciclo de vida de pavimentos (Zheng et al., 2020), de vulnerabilidad ecológica (Hu et al., 2021; Li et al., 2021) y de agricultura ante inundaciones (Guo et al., 2021), así como evaluaciones de calidad de aire en interiores (Piasecki & Kostyrko, 2020) y de emisiones de CO₂ (Li et al., 2021). En otros ámbitos se enmarcan priorizaciones de proyectos municipales (Khademolqorani, 2018) y evaluaciones de responsabilidad social en empresas transportistas (Luo et al., 2021) y del nivel de bienestar en los países (Murat, 2020). También existen artículos con esta normalización que utilizan múltiples MCDM para analizar y comparar sus respuestas. Es el caso de análisis de calidad del agua superficial en ciudades sostenibles (Chen et al., 2019) y evaluaciones subjetivas/objetivas de ciudades sanas (Ran et al., 2021) y agricultura sostenible (Geng et al., 2021). Otros estudios han aplicado esta normalización de forma directamente proporcional, mediante la ecuación 7.2. En este caso, los indicadores de coste son comparados únicamente con la distancia existente al mínimo valor. Conforme mayor sea el dato adverso, menor será la aportación del indicador. Siguen esta técnica estudios de WSM en incertidumbre con la integración del coeficiente de optimismo (Sun et al., 2021) y análisis de desempeño de cuadros de mando (Zardeini Hosein et al., 2014) basados en el AUM (del inglés “*Ariadne Uncertain Model*”).

$$X = \frac{u_{min}}{u} \quad [7.2]$$

Por último, algunos artículos presentan un sistema doble, que se basa en aplicar una normalización como si todos los atributos fueran de beneficio, y posteriormente invertir el valor de los indicadores adversos mediante la ecuación 7.3. Estos artículos contienen análisis de la gestión sostenible en cadenas de suministros (Dehghanian et al., 2011) y de proveedores de materiales ecológicos basados en TOPSIS (Zhang, 2018), así como estudios vulnerabilidad social ante el cambio climático (Meng-Tsung et al., 2015) mediante WSM.

$$X = 1 - u \quad [7.3]$$

Por contraparte, los artículos que utilizan la transformación mediante inversión de datos considerando un signo negativo son más escasos, con únicamente tres resultados. Los dos primeros contienen evaluaciones de ciudades sostenibles (Zhou et al., 2019) y de turismo sostenible regional (Carrillo & Jorge, 2017), y utilizan la normalización mostrada en la ecuación 7.4 para convertir los datos negativos en indicadores positivos y llevar a cabo el método WSM. En estos casos, se busca maximizar el valor del indicador de coste; los valores más deseados del indicador adverso proporcionarán mayores resultados.

$$X = \frac{u - u_{min}}{u_{max} - u_{min}} \quad [7.4]$$

El tercero, en cambio, aplica la relación directa mostrada en la ecuación 7.5 para normalizar estos indicadores de forma inversa y estudiar así la integración de conceptos sostenibles de economía, sociedad y ecología en el proceso de urbanización (Liu et al., 2014). Mediante esta formulación, los valores más deseados del indicador adverso proporcionarán menores resultados.

$$X = \frac{u}{u_{min}} \quad [7.5]$$

Cuando el procedimiento de cálculo se basa en la aplicación directa en soluciones ideales, los estudios utilizan un enfoque más práctico. Estos estudios aprovechan los algoritmos de los MCDM que necesitan generar soluciones ideales, y normalizan con la misma formulación tanto indicadores de beneficio como de coste. Posteriormente, los autores generan manualmente las soluciones ideales positivas y negativas, escogiendo el valor correspondiente de cada indicador. Este procedimiento se ha aplicado en VIKOR mediante el análisis ciclo de vida sostenible de pavimentos (Zheng et al., 2019), en TOPSIS con análisis de estabilidad social en áreas urbanas (Ebrahim et al., 2017) y de mejora de seguridad en energía sostenible (Yusoff & Bekhet, 2020), y en COPRAS-G con la evaluación de opciones de futuro en la industria de construcción naval (Keyghobadi et al., 2020).

Finalmente, se encuentran los artículos que han introducen un indicador de coste con valor e índice negativos en el cálculo de la agregación final, pudiendo esta ser reducida por el efecto de estos indicadores. Es el caso del estudio de sostenibilidad en cadenas de producción (Giannetti et al., 2019) y el análisis de indicadores para planear un turismo sostenible (Lozano-Oyola et al., 2012). Estos artículos utilizan el sistema 5SEnSU (del inglés, “Five Sector Sustainability”), mostrado en la Figura 7.4, y GPSI (del inglés, “Goal Programming Synthetic Indicator”), respectivamente, para obtener índices de sostenibilidad compuestos en base a desviaciones del sistema. En ambos casos, es innecesaria una normalización ya que se comparan objetivos (“Goals”) con posibles desviaciones positivas y negativas.

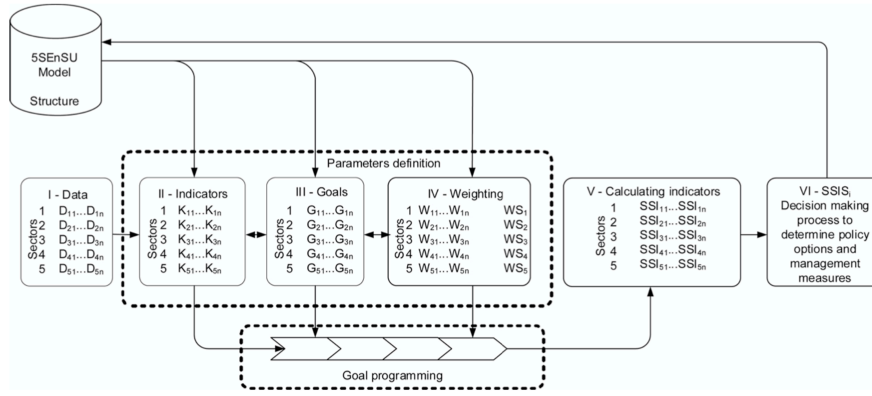


Figura 7.4 –Procedimiento del MCDM 5SEnSU. Fuente: Giannetti et al. (2019).

En estos artículos se utilizan respectivamente las ecuaciones 7.6 y 7.7. En ambas ecuaciones, se integra la diferencia entre los indicadores positivos (SSI_{ij}^+ , $GPSI_i^+$) y coste (SSI_{ij}^- , $GPSI_i^-$) para dar lugar al índice final (SSI_{ij} , $GPSI_i^N$). La formulación de Lozano-Oyola incluye además un sistema de valores de peso λ y γ , que permite al decisor dar mayor o menor importancia a los indicadores de coste.

$$SSI_{ij} = \sum_{ijk} (SSI_{ij}^+ - SSI_{ij}^-) \quad [7.6]$$

$$GPSI_i^N = \lambda \cdot GPSI_i^+ - \gamma \cdot GPSI_i^- \quad [7.7]$$

Un planteamiento similar presenta el estudio de optimización de redes de carga intermodales (Zhang et al., 2020). En este artículo se utiliza la ecuación 7.8, que asigna a cada uno de los indicadores (coste “ c_{ijk}^m ”, tiempo “ t_{ijk}^m ”, emisiones “ e_{ijk}^m ”, fiabilidad “ f_{ijk}^m ”, frecuencia “ s_{ijk}^m ”, seguridad “ r_{ijk}^m ”, flexibilidad “ p_{ijk}^m ” y trazabilidad “ v_{ijk}^m ”) su peso y su signo. Por ende, los indicadores de beneficio suman valor al índice final, mientras que los indicadores de coste lo disminuyen.

$$U_{ijk}^m = -w_c \cdot c_{ijk}^m - w_t \cdot t_{ijk}^m - w_e \cdot e_{ijk}^m + w_f \cdot f_{ijk}^m + w_s \cdot s_{ijk}^m + w_r \cdot r_{ijk}^m + w_p \cdot p_{ijk}^m + w_v \cdot v_{ijk}^m \quad [7.8]$$

También se encuentran modificaciones de los propios MCDM para aceptar el uso de datos negativos. Es el caso del análisis de sostenibilidad del turismo en cuba (Pérez et al., 2016) y la propuesta de su índice de turismo sostenible (Pérez et al., 2017). Ambos estudios utilizan la expresión de GIPSI (del inglés, “*Group Performance and Satisfaction Index*”), mostrada en la ecuación 7.9, que permite la entrada de datos negativa. En este caso, la diferencia entre la peor de las desviaciones “ p_{jk} ” (más negativa) y la mejor de las desviaciones “ n_{jk} ” (menos negativa) deviene un índice $GPSI_i^{NI}$ positivo para los indicadores negativos, que vienen multiplicadas por su peso “ w_k ”.

$$GPSI_i^{NI} = \sum_k \frac{w_k^- \cdot (n_{ik}^- - p_{ik}^-)}{u_k^-} \quad [7.9]$$

Diferentes son los casos en los que los indicadores se consideran negativos y se mantienen con este símbolo a lo largo de todo el proceso. Ejemplos claros son la evaluación de planos mineros sostenibles (Yaylacı & Düzgün, 2017) y el índice de solidez financiera para empresas colombianas (Lemus-Esquivel et al., 2015). Ambos estudios consideran indicadores de valor negativos insertados en una función de índice positiva. En la figura 7.5 se muestra un ejemplo de este procedimiento, con los valores que adoptan tres alternativas en sus índices finales y los principales indicadores considerados.

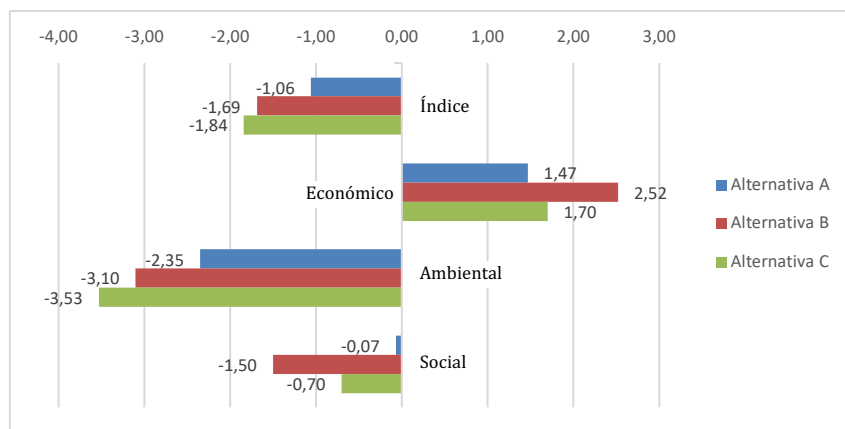


Figura 7.5 –Ejemplo de indicadores con valor negativo. Adaptado de Yaylacı & Düzgün (2017).

De igual forma, el estudio de nuevas urbanizaciones sostenibles en China (Xu et al., 2016) utiliza los indicadores negativos. Mediante el uso del método FPPSI (del inglés “Full Permutation Polygon Synthetic Indicator”) se obtiene un conjunto de polígonos en el que el hexágono exterior tiene el valor de $S_i=1$ y el interior de $S_i=-1$.

7.2.3. Análisis y necesidades de desarrollo

Esta subsección evalúa (iii), analiza (iv) y compara los resultados obtenidos con las necesidades del SEPIP (v). De los 73 artículos revisados, sólo 42 de ellos (todos pertenecientes al procedimiento de cálculo de indicadores con valores e índices negativos) explicitan exhaustivamente el procedimiento matemático utilizado. Por ende, este análisis utiliza este conjunto de artículos para estudiar la evolución de los sistemas de integración de indicadores con efectos adversos, su relación con la sostenibilidad y los procedimientos de cálculo más utilizados.

Para el análisis de la evolución del uso de indicadores de efectos adversos, se utiliza el gráfico de porcentajes mostrado en la Figura 7.6. Este gráfico divide el conjunto de artículos según su año de publicación, mostrando su porcentaje respecto al total (42). Además, cada una de estas particiones muestra el porcentaje de artículos que relacionan estos indicadores con la sostenibilidad y ecología y los que no, pudiendo así observar la tendencia y el enfoque de investigación en cuanto a la consideración de indicadores de efecto adverso en el campo de estudio.

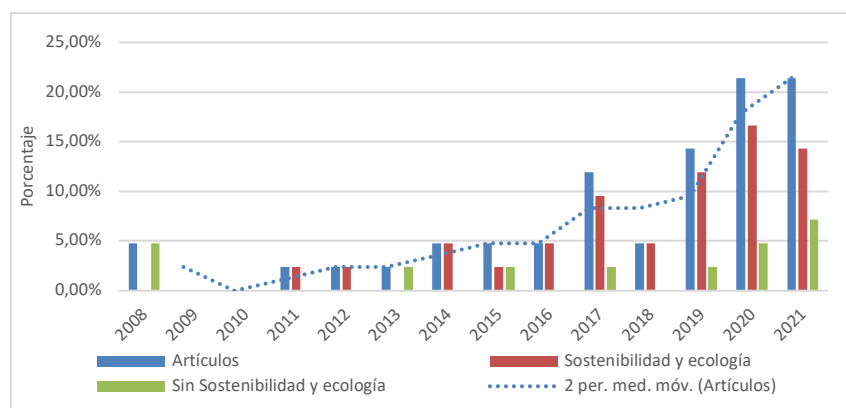


Figura 7.6 – Porcentajes de publicaciones por año y sus divisiones relativas a sostenibilidad y ecología.

El análisis del gráfico muestra una tendencia de crecimiento sostenido desde 2008 hasta 2021, a excepción de los años 2009 y 2010 de los que no se tienen datos. Esto se evidencia a través de la línea de la media móvil, que muestra una trayectoria ascendente a lo largo del tiempo. Estos resultados indican un aumento constante en la consideración de indicadores adversos en el campo de estudio, lo que sugiere un mayor reconocimiento de su importancia y relevancia en la toma de decisiones. Además, se puede observar que la mayoría de los trabajos, en cada división anual, introducen la sostenibilidad y la ecología. Esta consistencia en la consideración de estos temas a lo largo del tiempo demuestra un enfoque continuo y una conciencia creciente sobre la necesidad de abordar los impactos adversos en la toma de decisiones.

En lo referente al análisis de los procedimientos de cálculo más utilizados, existe una clara dominancia de los artículos que utilizan la transformación mediante inversión de datos (Grupo 1). Tal y como muestra la Figura 7.7, este grupo aparece en el 71.43% de resultados analizados (30 de 42). La facilidad que ofrecen estas técnicas para la trata de indicadores adversos o de coste podría justificar la mayor utilización de estos procedimientos.

Por el contrario, los artículos que utilizan la aplicación directa en soluciones ideales (Grupo 2) son los menos numerosos, con sólo el 9.52% (4 de 42) de apariciones. El poco uso de este procedimiento puede deberse a su dificultad de aplicación comparado con la transformación mediante inversión de datos, pues requieren forzosamente la aplicación de métodos MCDM que utilicen soluciones ideales (como VIKOR, TOPSIS y COPRAS-G) y la asignación manual de los valores de los indicadores en cada solución.

Entre estos valores se encuentran los artículos que utilizan indicadores con valores e índices negativos (Grupo 3), con un 19.05% (8 de 42) de aparición. Estos estudios exponen indicadores adversos lo suficientemente indeseables como para ser introducidos en las ecuaciones de agregación como valores negativos, por lo que son de especial interés para esta Tesis Doctoral.

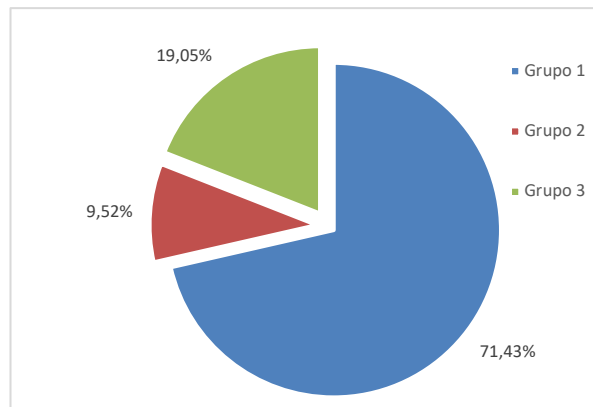


Figura 7.7 – Porcentajes de aparición de los grupos analizados.

Sin embargo, es de interés analizar en qué métodos MCDM se ha aplicado cada una de estas técnicas. Al estudiar esta relación, entre las técnicas de gestión de indicadores negativos y los métodos MCDM, es posible identificar patrones y tendencias en cuanto a qué técnicas se han utilizado en diferentes enfoques de toma de decisiones. Con este objetivo, se muestra la figura 7.8, que contiene la relación de dominancia entre los grupos de gestión de indicadores adversos y los métodos MCDM en los que se han aplicado. Dentro de cada grupo, se encuentra el porcentaje relativo a cada uno de los métodos que han aparecido en esta revisión literaria: TOPSIS, WSM, múltiples métodos aplicados en un mismo sistema (Multi-MCDM), VIKOR, COPRAS-G., 5SEnSU, y FPPSI.

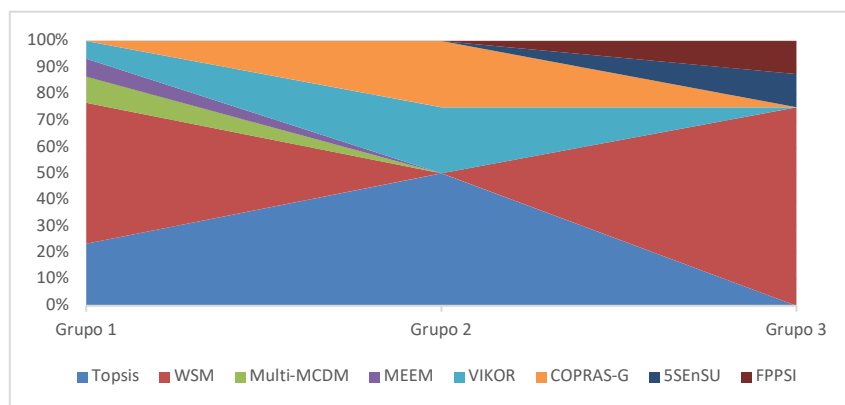


Figura 7.8 – Dominancia de cada método MCDM según los grupos propuestos.

En el Grupo 1, existe una interesante combinación de métodos multicriterio. Si bien hay una clara dominancia de WSM con un 53.33%, TOPSIS también tiene una importante representación con un 23.33%. Multi-MCDM (10%), MEEM (6.67%) y VIKOR (6.67%) son los otros MCDM contenidos en el grupo. Esta diversidad es debido a que las técnicas del Grupo 1 son principalmente utilizadas en los procesos de normalización, comunes en todos los métodos MCDM y de fácil aplicación. En lo referente al Grupo 2, es interesante cómo desaparece por completo el grupo dominante WSM, quedando únicamente TOPSIS (50%), VIKOR (25%) y COPRAS-G (25%). Como ya se ha explicado, las técnicas de este grupo se basan en la modificación de las soluciones ideales, por lo que únicamente métodos MCDM que las utilicen pueden estar contenidos en el Grupo 2. Respecto al Grupo 3, WSM vuelve a tener una fuerte dominancia con un 75%,

principalmente debido a la facilidad con la que los indicadores adversos o de coste pueden alterar el índice final. Sin embargo, es interesante comentar la aparición de los métodos 5SEnSU (12.50%) y FPPSI (12.50%). Ambos métodos han sido diseñados en base a evaluaciones de sostenibilidad, lo que vuelve a indicar que los indicadores adversos juegan un papel básico en estas valoraciones.

Finalmente, hay que analizar las necesidades de desarrollo en base al SEPIP. Mediante esta revisión y su análisis, se puede concluir que ninguno de los métodos estudiados puede ser utilizado o implementado en el sistema, debido a las siguientes razones:

- En primer lugar, los métodos con procedimientos de transformación mediante inversión de datos no son aplicables, pues el sistema tiene como núcleo MIVES, un método MAUT que no requiere la normalización de datos.
- En segundo lugar, los métodos con procedimientos de aplicación directa en soluciones ideales tampoco son aplicables, pues MIVES no utiliza ningún sistema de soluciones ideales como la media, el máximo o el mínimo.
- Finalmente, las técnicas con procedimientos de indicadores con valores e índices negativos tampoco pueden ser utilizadas, pues MIVES aplica una función de valor que traduce el valor de cada indicador, sea positivo o negativo, a un índice positivo comprendido entre [0, 1].

7.3. PROPUESTA DE INCLUSIÓN DE EFECTOS NEGATIVOS

En la sección anterior se ha concluido que las técnicas actuales de gestión de indicadores adversos no son adecuadas para el SEPIP. Por ello, en esta sección se presenta una extensión del método MIVES capaz de introducir valores negativos en la agregación del índice final. Además, su aplicación es mostrada y discutida mediante un ejemplo ilustrativo.

7.3.1. MIVES Extendido

El análisis de las técnicas con procedimientos de indicadores con valores e índices negativos ha permitido estudiar el comportamiento de la modificación de signo en la agregación de los indicadores ya procesados por su función de valor. En caso de modificar la ecuación de agregación simple del WSM, los indicadores de coste no deberían estar formados por datos crecientes y funciones decrecientes, sino por datos y funciones crecientes. Sin embargo, este procedimiento presenta una clara complicación: la modificación de la ecuación de agregación debería ser en base a variables desconocidas, cómo son el número de indicadores positivos y negativos utilizados, dado que cada árbol MIVES se genera en base a un problema y tiene una morfología única.

Por tanto, se considera que la solución óptima es la extensión de MIVES para que pueda utilizar funciones negativas, lo que mejoraría directamente la coherencia conceptual. Utilizar una función de valor negativa para un indicador adverso permite una interpretación más coherente y consistente con el concepto de su negatividad (Thaler,

2015). El valor negativo refleja directamente la naturaleza desfavorable del indicador y su impacto en la evaluación global, proporcionando una representación más intuitiva de la medida de coste y evita ambigüedades al agregarlo con otros indicadores.

Además, y debido a la naturaleza del presente sistema de evaluación y priorización de fondos públicos, no debe desestimarse la implicación de otras partes interesadas a parte de los expertos. El uso de funciones negativas mejoraría la interpretación y comunicación de los resultados a administraciones, empresas públicas y privadas y a la ciudadanía, ya que, al obtener un índice negativo para un indicador de coste, se resalta claramente su impacto negativo en la evaluación general (Yaylacı y Düzgün, 2017). Esto enfatiza de manera explícita la presencia de costes asociados a una determinada opción. Finalmente, esta propuesta también se alinea con la idea general de las formas de funciones de valor, que deben permitir que los decisores puedan expresar y modular libremente sus opiniones para poder elegir la forma de la función que más se ajuste a sus preferencias (Zionts, 1979).

Siguiendo algunas la idea de funciones de valor negativas (Thaler, 2015), la ecuación inicial de MIVES se adapta a la ecuación 7.10 utilizando un coeficiente n con valores de 1 o -1. Manteniendo la ecuación 2.2, este ajuste permite considerar índices entre $[1, -1]$ invirtiendo las funciones de la Figura 7.9A. Por lo tanto, la función de valor adquiere la capacidad de adoptar las formas mostradas en la Figura 7.9B, ampliando el rango de decisiones del tomador de decisiones para abordar cualquier indicador y situación.

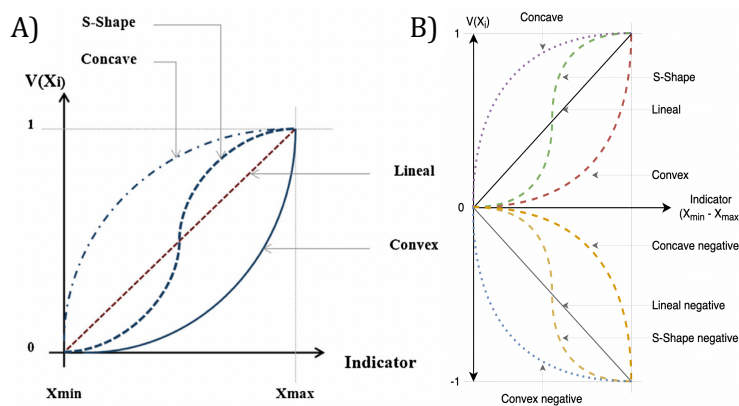


Figura 7.9 – A) Formas de las funciones de valor de MIVES. B) Formas de las funciones de valor de MIVES Extendido.

$$V_{ind}^{Ext} = n \cdot B \cdot [1 - e^{-K \cdot (\frac{x - S_{min}}{c})^p}] \quad [7.10]$$

Dónde

V_{ind}^{Ext} es el valor del indicador evaluado mediante MIVES Extendido,

n es el parámetro de positividad o negatividad,

B es un parámetro que permite que la función se mantenga dentro del rango de 0 y 1, asumiendo que 1 es el valor de máxima satisfacción. Este parámetro se determina mediante la ecuación 2.2,

S_{\min} es el punto mínimo de satisfacción, con un valor de 0,

S_{\max} es el punto máximo de satisfacción, con un valor de 1,

X es el valor del indicador que genera el valor igual a V_{ind} ,

P define la forma de la curva. $P < 1$ indica una curva cóncava; $P > 1$ indica una curva convexa o en forma de S; $P = 1$ indica una curva lineal,

C es un parámetro que define el punto de inflexión x para las curvas con $P > 1$,

K es un parámetro que define el valor de y en el punto C.

7.3.2. Ejemplo ilustrativo

La generación de funciones de valor exactas para un cierto proyecto requiere del conocimiento de los datos de los indicadores, pues es en base a las preferencias y creencias de los decisores que las funciones de utilidad toman una cierta forma (Zionts, 1979). Por tanto, modificar un ejemplo en la literatura existente para analizar la sensibilidad de la propuesta deviene una ardua tarea, pues cualquier modificación que se lleve a cabo en las funciones de utilidad alterará la propia percepción del índice y su preferencia. Es por ello por lo que para ejemplificar el uso de la propuesta de funciones de valor en indicadores de efecto adverso se utilizará el trabajo de MIVES que dio lugar al Índice de Sostenibilidad del Plan de Inversiones Municipales o IsPIM (Pujadas et al., 2017), basado en la evaluación de proyectos municipales heterogéneos y previamente ya introducido en otros capítulos. La dirección de esta Tesis Doctoral por dos de los autores del estudio asegura en gran medida mantener las preferencias y creencias de los expertos en la modificación de las funciones de valor.

Información previa de IsPIM

Como ya se ha comentado, la administración pública de Barcelona lanzó una convocatoria para propuestas de mantenimiento y mejora de infraestructuras municipales en 2015. En la convocatoria de propuestas, se sugirieron 15 proyectos, denominados como el conjunto de alternativas $A = \{A1, A2, A3, \dots, A15\}$ y que se pueden consultar en la Tabla 4.15. Para llevar a cabo la evaluación y priorización de proyectos, se preparó el árbol MIVES mostrado en la Figura 7.10, formado por los tres pilares de sostenibilidad: económico, ambiental y social.

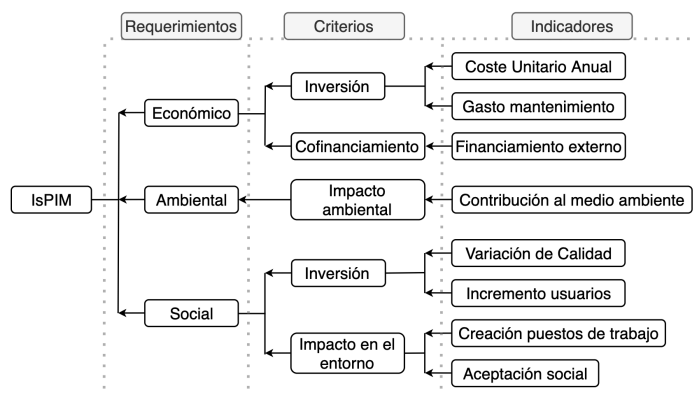


Figura 7.10 – Árbol MIVES para obtener el índice IsPIM.

Los indicadores que se propusieron al Ayuntamiento fueron los siguientes:

- **Coste unitario anual (I₁):** Una valoración directa entre la inversión propuesta y su coste y vida útil. La función de valor ligada a este indicador es una función decreciente en S.
- **Gasto mantenimiento (I₂):** Este indicador marca el coste en partidas económicas municipales ligadas al mantenimiento y explotación de la inversión respecto a la situación actual. Por tanto, se trata de un análisis de ahorro o aumento de coste anual. La función de valor ligada a este indicador es una función cóncava creciente.
- **Financiamiento externo (I₃):** El financiamiento externo hace referencia a la posibilidad de encontrar otras instituciones que apoyen parcialmente la inversión. La función de valor ligada a este indicador es una función creciente en S.
- **Contribución al medio ambiente (I₄):** Este indicador marca el impacto (positivo) de cada alternativa en el medio ambiente, en base a la valoración de su alineación con un conjunto de políticas activas. La función de valor ligada a este indicador es una función creciente en S.
- **Variación de calidad (I₅):** Este indicador transversal permite estudiar la modificación de la calidad social producida por una inversión. Se tiene en cuenta aspectos como seguridad, comodidad, educación y cohesión social entre otros. Cada alternativa se evalúa en base a la alineación con estos campos de mejora. La función de valor ligada a este indicador es una función creciente en S.
- **Incremento de usuarios (I₆):** Si bien el anterior indicador mostraba la modificación de características no directas al uso de una infraestructura este indicador referencia directamente a este aspecto. Partiendo de datos actuales se estudia el aumento de usuarios generado por cada inversión. La función de valor ligada a este indicador es una función cóncava creciente.

- **Creación de puestos de trabajo (I₇):** Las grandes inversiones suelen generar la creación de puestos de trabajo de forma directa e indirecta. Este indicador utiliza estos datos sobre la construcción y explotación de cada alternativa. La función de valor ligada a este indicador es una función convexa creciente.
- **Aceptación social (I₈):** La conformidad de la ciudadanía debe ser incluida en cada proceso de decisión para evitar disonancias en la ejecución de la elección y analizar el interés social de cada inversión. La función de valor ligada a este indicador es una función lineal creciente.

Debido a que los proyectos propuestos eran de distinta tipología, y difícilmente comparables entre sí, los autores del estudio utilizaron un índice de homogeneización (HI, por sus siglas en inglés "Homogenization index"). Este índice, calculado a partir de evaluaciones como la contribución al equilibrio territorial o la situación previa, se introduce en algunos indicadores (I₁ a I₆) para homogeneizar sus valores.

Los pesos obtenidos en el trabajo IsPIM se muestran en la Tabla 7.1. Estos pesos provienen de la asignación de peso a los criterios económico (20%), ambiental (40%) y social (40%), así como de los criterios de inversión (80%), cofinanciamiento (20%), impacto ambiental (100%), cambios en el servicio (50%) e impacto en el entorno (50%). Dentro de cada criterio, el indicador tiene a su vez un peso asignado, que conlleva al peso final que se muestra en la tabla.

Tabla 7.1 –Peso de los indicadores en IsPIM. Adaptado de Pujadas et al. (2019).

Indicador	Peso en criterio	Peso final
Coste unitario anual	70%	11.20%
Gasto en mantenimiento	30%	4.80%
Financiamiento externo	100%	4.00%
Contribución al medio ambiente	100%	40.00%
Variación de calidad	50%	10.00%
Incremento de usuarios	50%	10.00%
Generación de puestos de trabajo	30%	6.00%
Aceptación social	70%	14.00%

Finalmente, la evaluación de los indicadores de cada alternativa, ya procesados por su correspondiente función de valor, dieron lugar a los datos contenidos en la Tabla 4.16, que se vuelve a mostrar mediante la Tabla 7.2 para facilitar el seguimiento del ejemplo ilustrativo.

Tabla 7.2 –Resultados de los indicadores de IsPIM.

	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈
A ₁	0.50	0.46	0.00	0.27	0.47	0.42	0.08	1.00
A ₂	0.96	0.25	0.02	0.12	0.40	0.64	0.02	1.00
A ₃	0.66	0.27	0.00	0.72	0.73	0.89	0.27	1.00
A ₄	0.01	0.48	0.00	0.19	0.24	0.20	0.32	0.75
A ₅	0.98	0.60	0.00	0.48	0.67	0.55	0.08	1.00
A ₆	0.96	0.49	0.00	0.47	0.48	0.75	0.02	1.00

A ₇	0.77	0.81	0.00	0.39	0.58	0.87	0.27	1.00
A ₈	0.89	0.49	0.00	0.35	0.26	0.62	0.17	0.75
A ₉	0.56	0.67	0.00	0.31	0.37	0.62	0.61	0.50
A ₁₀	1.00	0.27	0.05	0.78	0.84	0.79	1.00	1.00
A ₁₁	0.19	0.69	0.04	0.58	0.66	0.77	0.61	0.75
A ₁₂	0.43	0.69	0.04	0.58	0.18	0.64	0.61	0.75
A ₁₃	0.98	0.46	0.00	0.27	0.32	0.72	0.04	1.00
A ₁₄	0.85	0.21	0.01	0.37	0.56	0.58	0.38	1.00
A ₁₅	0.14	0.23	0.00	0.67	0.74	0.83	0.22	1.00

Con esta información, se puede proceder a la propuesta de modificación. Mediante esta propuesta, se cambiarán los datos de entrada de la Tabla 7.3 y se recalcularán los valores finales obtenidos para cada una de las alternativas.

Propuesta de modificación

El primer paso de este ejemplo ilustrativo se basa en la selección de los indicadores que susceptibles a ser modificados. De entre los 8 existentes, se considera que tres pueden ser alterados:

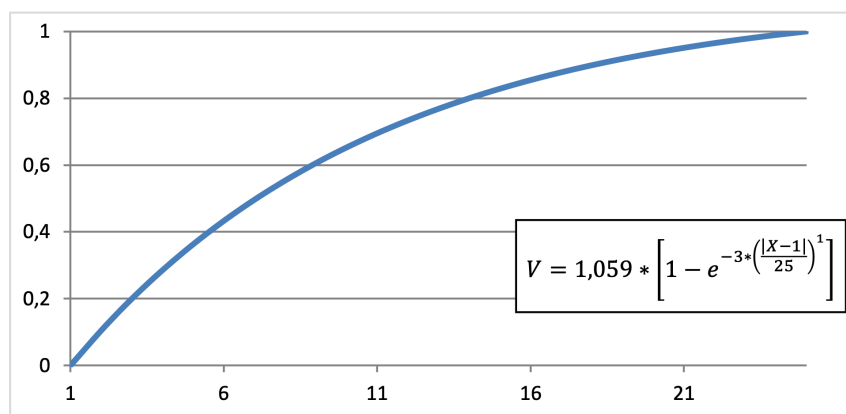
- **Gasto mantenimiento (I₂):** Este indicador cuenta con un sistema de atributos que analiza tanto efectos positivos como negativos. Además, los valores obtenidos en cada alternativa son lo suficientemente dispares para que el resultado final se vea afectado con la propuesta de modificación, por lo que este indicador se selecciona para su alteración.
- **Contribución al medio ambiente (I₄):** Aunque este indicador constituye uno de los principales motivos para el desarrollo de este capítulo, se ha concluido que no es viable su modificación. Debido a que este indicador se basa en un sistema de atributos que evalúa sólo mejoras respecto a la situación actual, se desconocen los impactos adversos de las alternativas evaluadas. Por tanto, cualquier modificación generaría distorsiones en el estudio, pues debería generarse un nuevo conjunto de atributos con valores ficticios.
- **Aceptación social (I₈):** Aunque este indicador sí que contempla un sistema de atributos que analiza tanto a efectos positivos como negativos, se considera que su modificación no ejemplificaría un cambio substancial en el estudio, pues los datos obtenidos de cada alternativa son tan similares que no se produciría ningún cambio.

Por tanto, en esta propuesta de modificación únicamente se alteran los valores del I₂. En el IsPIM, este indicador se evaluó mediante el sistema de atributos mostrado en la Tabla 7.3, obteniendo cada alternativa una puntuación según el atributo que le fue asignado. Posteriormente, esta puntuación (De) se multiplicó por el HI de la alternativa en cuestión (ver ecuación 7.11), obteniendo así el valor del indicador. Finalmente, se utilizó la función de valor mostrada en la Figura 7.11 para obtener los índices del indicador.

Tabla 7.3 –Tabla de atributos, definiciones y puntuaciones del I_2 .

Atributo	Definición	Puntuación
Gran ahorro	La inversión genera un gran ahorro en gastos de mantenimiento y explotación	5
Ahorro	La inversión genera cierto ahorro en gastos de mantenimiento y explotación	4
Nulo o marginal	La inversión no genera ni ahorro ni aumento de gasto remarcable respecto al mantenimiento.	3
Aumento	La inversión genera un cierto aumento en gastos de mantenimiento y explotación	2
Gran aumento	La inversión genera un gran aumento en gastos de mantenimiento y explotación	1

$$I_2 = De \cdot HI \quad [7.11]$$

Figura 7.11 – Representación y ecuación de la función de valor original del I_2 .

La propuesta de modificación consta de tres pasos. El primero, es la alteración de la puntuación de los atributos [1, 5] a [-2, 2]. El segundo, es la modificación de la ecuación 7.11, puesto que esta multiplicación podría conllevar a errores de coherencia. Por ejemplo, multiplicar un valor negativo por un HI alto (que significa una gran necesidad del proyecto), aumentaría el valor negativo, indicando un peor escenario. Por ende, el resultado de un proyecto poco necesario sería mejor que no el de un proyecto muy necesario. Ante esta disyuntiva, se puede operar de dos formas distintas. La primera, es la eliminación del índice HI de la ecuación. La segunda, es la generación de una ecuación para valores negativos en la que el índice HI esté dividiendo, manteniendo la ecuación del estudio para los valores positivos. En el caso de este ejemplo ilustrativo, para facilitar la comprensión y simplicidad de la modificación, se ha optado por la primera opción. Con la ecuación de obtención del valor de entrada a la función de utilidad, el tercer paso es la generación de la función de valor negativa. Mediante la ecuación 7.10, se genera la función por partes mostrada en la ecuación 7.12 y 7.13, obteniendo el rango [-2, 2] y la gráfica mostrada en la Figura 7.12. Nótese que, debido al uso del parámetro n , en la función negativa el valor de S_{\min} se mantiene como en su función análoga positiva.

$$V_{ind}^{Ext,-} = -1 \cdot 1.157 \cdot [1 - e^{-3 \cdot (\frac{x-0}{3})^1}] \tag{7.12}$$

$$V_{ind}^{Ext,+} = 1 \cdot 1.157 \cdot [1 - e^{-3 \cdot (\frac{x-0}{3})^1}] \tag{7.13}$$

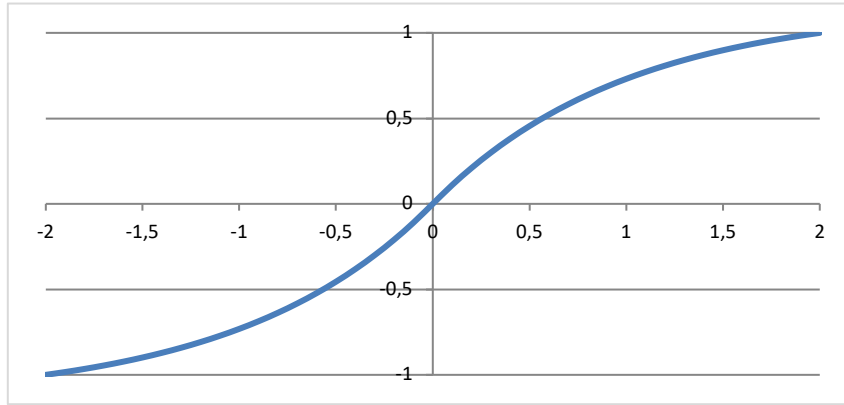


Figura 7.12 – Representación de la función de valor modificada de I₂.

Resultados y discusión de la modificación

Utilizando la modificación propuesta, se han obtenido los resultados mostrados en la Tabla 7.4. En esta tabla se pueden comprobar los resultados de cada alternativa respecto al valor del atributo asignado, el valor del dato de entrada a la función de valor y su índice de salida.

Tabla 7.4 – Tabla de puntuaciones, valores y índices originales y modificados del indicador I₂.

	Puntuación I ₂	Valor I ₂	Índice I ₂	Puntuación' I ₂	Valor' I ₂	Índice' I ₂
A ₁	2	6	0.46	-1	-1	-0.73
A ₂	1	3	0.25	-2	-2	-1.00
A ₃	1	3	0.27	-2	-2	-1.00
A ₄	2	6	0.48	-1	-1	-0.73
A ₅	2	8	0.60	-1	-1	-0.73
A ₆	2	6	0.49	-1	-1	-0.73
A ₇	4	13	0.81	1	1	0.73
A ₈	2	6	0.49	-1	-1	-0.73
A ₉	3	9	0.67	0	0	0.00
A ₁₀	1	3	0.27	-2	-2	-1.00
A ₁₁	3	10	0.69	0	0	0.00
A ₁₂	3	10	0.69	0	0	0.00
A ₁₃	2	6	0.46	-1	-1	-0.73
A ₁₄	1	3	0.21	-2	-2	-1.00
A ₁₅	1	3	0.23	-2	-2	-1.00

Al sustituir estos resultados en la Tabla 7.3 y aplicar el proceso de agregación de valores mediante los pesos mostrados en la Tabla 7.2, se obtiene en ranquin final R^{mod} = {A₁₀, A₃, A₇, A₁₅, A₁₁, A₅, A₆, A₁₂, A₁₄, A₁₃, A₈, A₉, A₁, A₂, A₄}. Comparándolo con el ranquin presentado en el estudio original R^o = {A₁₀, A₃, A₁₅, A₅, A₆, A₇, A₁₁, A₁₂, A₁₄, A₁₃, A₈, A₉, A₁, A₂,

A_4 }, se puede observar una ligera modificación en la posición de algunas alternativas. Este nuevo ranquin asegura un resultado más coherente respecto al I_2 . Esta coherencia se puede mostrar fácilmente en dos escenarios. El primero es el de las alternativas que no aportan nada, pues pasan de sumar 0.67 (sobre 1) al índice final a no contribuir. El segundo es mero hecho de considerar aportaciones negativas en el índice. Dado que la preferencia positiva es la generación de ahorro en los gastos de mantenimiento y explotación, aquellas alternativas que no solo no generen ahorro, sino que generan un incremento de coste, van en contra del principal objetivo. Por ello, reciben valores que substraen el índice final.

Sin embargo, este ejemplo ilustrativo ha arrojado luz sobre una complicación de las funciones negativas cuando se aplican índices de homogeneización en las ecuaciones de datos de entrada. Dado que ya no se tratan únicamente de funciones positivas crecientes o decrecientes, las multiplicaciones o divisiones generadas por estos índices pueden alterar la coherencia de la propia ecuación cuando los indicadores son negativos.

Aun así, existen dos posibles soluciones, que dependen principalmente de la naturaleza del indicador y los objetivos del estudio:

- **Invertir la operación matemática:** Esta solución se basa en considerar una ecuación para los valores positivos, y otra para los valores negativos que invierta la operación matemática del índice de homogeneización. Esto permite que el indicador refleje adecuadamente la importancia de cada alternativa, ya que las más necesarias con valores negativos tendrán una influencia mayor en el resultado final, mientras que las alternativas menos necesarias con valores positivos tendrán una influencia menor.

En este caso, también se produce un efecto de concesión. Una alternativa muy necesaria, obtendrá un impacto maximizado si sus valores son positivos, mientras que si sus valores son negativos se minimizará el impacto adverso. Esta concesión puede utilizarse en indicadores que necesiten el índice para poder ser comparados.

- **Eliminar el índice de homogeneización:** Esta medida considera eliminar por completo el índice de la ecuación, considerando únicamente el valor de los atributos o los datos directos de los indicadores. Esta solución es óptima para aquellos indicadores que generen impactos lo suficientemente importantes como para que la alternativa implicada sea indistinta. Algunos ejemplos serían indicadores de impacto ambiental o de aceptación social, en los que la necesidad de la alternativa es claramente indiferente.

En última instancia, la elección entre eliminar el factor IH o mantenerlo con las dos ecuaciones debe basarse en un análisis cuidadoso de los objetivos y las necesidades específicas del estudio, y de la naturaleza de los indicadores.

7.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se han introducido los índices negativos de los indicadores de coste, mediante una revisión de los métodos y procedimientos que los aplican. Esta revisión ha concluido que ninguna de las técnicas actuales puede ser implementada en el SEPIP, por lo que se ha desarrollado una extensión del método MIVES tradicional que lo sustituye como núcleo de cálculo.

Esta extensión, llamada MIVES Extendido, ha permitido considerar efectos negativos en los indicadores mediante la inversión de las funciones de valor, pudiendo así substraer valor al índice final. Esta nueva característica tiene dos implicaciones que se consideran de gran importancia para los métodos MCDM:

- En primer lugar, los decisores ahora tienen mayor libertad, ya que pueden ampliar el abanico de funciones de valor aplicables a cada indicador. Los indicadores ya no se limitan solo a categorías de beneficio o coste, sino que los efectos adversos pueden ser reflejados mediante las nuevas funciones. Por lo tanto, se pueden emplear funciones crecientes, decrecientes o negativas según corresponda, lo que permite captar de manera más precisa las necesidades y preferencias de los decisores.
- En segundo lugar, considerar una substracción en el índice final puede generar un importante efecto psicológico en los proyectistas al presentar propuestas en licitaciones públicas. Al existir indicadores capaces restar valores al índice final, se podrían evitar situaciones dónde algunos indicadores son sacrificados. Por ejemplo, aquellas de proyectos con grandes resultados económicos, obtenidos mediante el sacrificio de indicadores ambientales o sociales.

Finalmente, el ejemplo ilustrativo ha permitido conocer los detalles de la aplicación de las funciones negativas cuando se utilizan índices de homogeneización. Se ha hallado que, dependiendo del tipo de indicador y los objetivos de cada estudio, pueden utilizarse distintas herramientas de gestión del índice para que los resultados sigan la coherencia de las funciones negativas.

8. SISTEMA DE EVALUACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE INVERSIONES PÚBLICAS

8.1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los capítulos previos, se han diseñado y seleccionado diversas características esenciales para el SEPIP. En el Capítulo 2, se ha escogido el método base para calcular el índice de sostenibilidad de cada inversión evaluada, examinando las mejoras necesarias según las demandas de la administración. Los Capítulos 3 y 4 han presentado un exhaustivo análisis de las técnicas de toma de decisiones en grupo y el método HIVES, específicamente diseñado para abordar las necesidades identificadas. En los Capítulos 5 y 6, se han definido los enfoques para gestionar la incertidumbre en los indicadores y la optimización de resultados, y se han desarrollado técnicas de gestión de incertidumbre en pesos y categorización de alternativas. Por último, en el Capítulo 7 se ha refinado y extendido el método base para incorporar la consideración de efectos adversos con valores negativos en los indicadores.

En este capítulo se presenta el SEPIP, consolidando y agregando las contribuciones de los capítulos anteriores para articular el marco de aplicación y la estructura del proceso. Asimismo, se presenta su aplicación en un caso real, poniendo en práctica los conceptos teóricos y las metodologías desarrolladas, con el propósito de validar el sistema diseñado durante todo el transcurso de la Tesis Doctoral.

8.2. PRESENTACIÓN DEL SEPIP

En esta sección se presenta el SEPIP, junto a sus dos últimos elementos: el Índice de necesidad y los Factores determinantes. Además, se muestra su algoritmo de aplicación.

8.2.1. Esquema del SEPIP

Tal y como se muestra en la Figura 8.1, el SEPIP es un proceso que se genera a partir de la agregación de todos los métodos que se han seleccionado y desarrollado a lo largo de esta Tesis Doctoral. Este proceso se compone de tres definiciones clave, las cuales enmarcan y contextualizan el escenario de aplicación del SEPIP, adaptándolo a las necesidades de cada caso específico y determinando los métodos necesarios para lograr el resultado deseado.

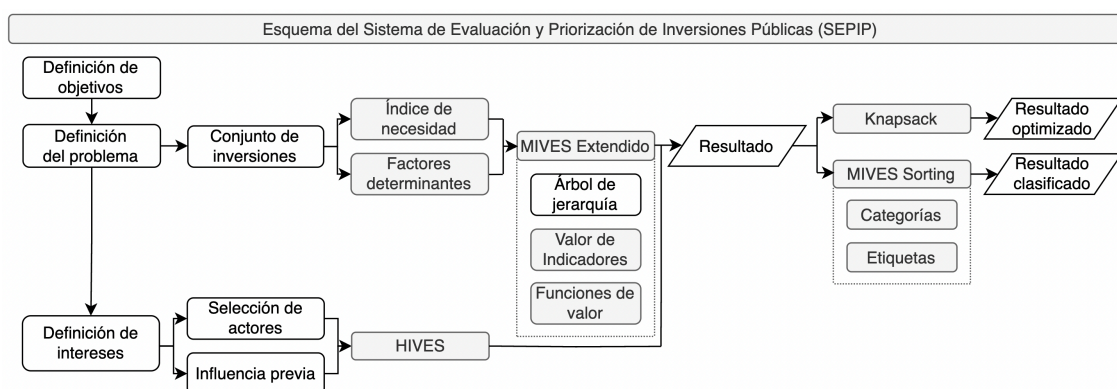


Figura 8.1 –Esquema del SEPIP, con los métodos implementados o desarrollados remarcados (gris).

La definición de objetivos concreta qué resultados desea la administración pública. Dado que el SEPIP puede generar: (i) una lista de priorización de inversiones, (ii) una combinación óptima de inversiones dado un presupuesto cerrado o (iii) una lista de inversiones clasificadas, en este punto se selecciona la composición de métodos que da respuesta a las necesidades expuestas.

En la definición del problema se especifican las características del caso específico de aplicación del SEPIP, que son utilizadas para generar el árbol de requerimientos de MIVES Extendido. Estas características, detalladas en profundidad en las siguientes subsecciones, se extraen del análisis del conjunto de inversiones a analizar y definen su necesidad de homogeneización (con el Índice de necesidad, § 8.2.2) y sus elementos críticos de estudio (con los Factores determinantes, § 8.2.3).

Finalmente, en la definición de intereses se seleccionan los actores que toman parte en la decisión y se les asigna una influencia previa. Con esta información, se aplica el método HIVES, obteniendo así el peso de cada elemento requerido. Estos pesos son introducidos en el Índice de necesidad y el árbol de requerimientos, pudiendo así agregar los índices de todos los indicadores en el resultado final (ii).

Nótese que, en caso de que la combinación de métodos seleccionada en la definición de objetivos incluya Knapsack o MIVES Sorting (con sus categorías y etiquetas), este resultado es procesado para obtener los resultados de optimización (ii) o de clasificación (iii), respectivamente.

8.2.2. Índice de necesidad

En algunas situaciones, es posible que el SEPIP se aplique a un conjunto de inversiones heterogéneas. En estos escenarios, además de tener en cuenta indicadores lo suficientemente generales como para ser evaluados en cada una de las inversiones del conjunto, es necesario aplicar el Índice de necesidad (IN).

El IN es un factor modificador de los indicadores del árbol jerárquico de MIVES Extendido, que se emplea para incrementar o reducir su valor según la necesidad relativa a cada inversión. Por lo tanto, previo a la aplicación de MIVES Extendido, es necesario definir y calcular el IN. Basándose en la concepción del índice de homogeneización de Pardo-Bosch (2016), el IN se organiza en torno a cuatro categorías principales que actúan como una jerarquía. A partir de estas categorías, los expertos, considerando las necesidades de la entidad demandante, desarrollan un conjunto de indicadores que posibilitan la obtención de un IN específico para cada inversión. Estas categorías, con algunos de sus posibles indicadores son:

- **Contribución al equilibrio territorial (CET):** Esta categoría refiere a la medida en la que una inversión puede mitigar desigualdades o promover un desarrollo más equitativo en diferentes áreas o zonas geográficas. Estas zonas dependen directamente de las competencias de la administración pública que solicita la aplicación del SEPIP, y refieren a la jerarquía territorial de barrios, distritos, ciudades, municipios, provincias o comunidades autónomas.

Si bien muchos pueden ser los indicadores que analicen estas diferencias, Pardo (2016) propone el uso directo del CET como indicador mediante el cálculo del déficit de inversión de zona (DIZ) tal y como se muestra en la ecuación 8.1. Mediante el uso de una función lineal, los valores obtenidos mediante DIZ se transforman a CET.

$$DIZ = \left(1 - \frac{\frac{I_{zona}^{8 \text{ años}}}{I_{total}^{8 \text{ años}}}}{\alpha_1 \cdot \frac{DP_{zona}}{DP_{total}} + \alpha_2 \cdot \frac{R_{zona}}{R_{total}}} \right) \quad [8.1]$$

Dónde los sufijos *zona* y *total* refieren a cada zona analizada y a la suma de todas ellas, y

I es el valor de inversión en los últimos 8 años,

DP es la densidad de población,

R es la renta de la población,

α_1 es el peso de la densidad de población,

α_2 es el peso de la renta.

- **Alcance de actuación:** Esta categoría se centra en la evaluación de dos aspectos fundamentales. En primer lugar, se considera la población directamente beneficiada por la inversión, lo que implica analizar la cobertura territorial de la inversión y la cantidad de personas servidas. En segundo lugar, se evalúa la importancia y el impacto que se espera que la inversión tenga en el bienestar de las personas y en el desarrollo sostenible de la región.
- **Evaluación de la situación previa:** Esta categoría tiene como objetivo principal evaluar las condiciones existentes en el entorno, previa implementación de la inversión, mediante el análisis de tres aspectos clave: las condiciones y funcionalidad del servicio actual, su saturación y el estado de inversión, que estudia si la inversión de análisis ya se ha empezado a implementar o ha recibido financiación.
- **Sinergias entre inversiones:** Este último criterio valora si la inversión analizada tiene sinergias, ya sean con inversiones del conjunto de inversiones en evaluación, con inversiones en estado de concepción que serán implementadas en un futuro próximo, o con inversiones recientemente implementadas.

8.2.3. Factores determinantes

Los Factores determinantes (FDs) de un conjunto de inversiones son los pilares conceptuales que definen y determinan qué aspectos son de mayor relevancia y valor en su evaluación. Estos FDs actúan como puntos de referencia y guían el proceso de adaptación del árbol jerárquico de MIVES Extendido tal y como muestra la Figura 8.2, asegurando que los criterios e indicadores de cálculo sean representativos y reflejen de manera completa y precisa todas las características significativas del conjunto de inversiones.

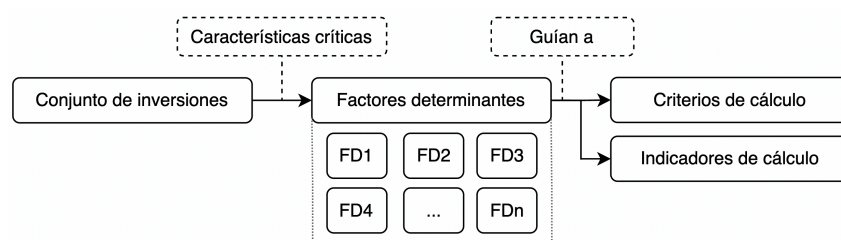


Figura 8.2 –Representación del proceso de selección de FDs y criterios e indicadores de cálculo.

8.2.4. Algoritmo del SEPIP

Una vez mostrado el esquema del SEPIP y detallados sus componentes IN y FDs, se presenta su algoritmo de aplicación:

- **Paso 1:** Definición de objetivos. La entidad solicitante debe definir el conjunto de inversiones de análisis y sus características, y clarificar los objetivos del estudio. En situaciones en las que la obtención de una lista de priorización no sea el único propósito, se debe indicar si se requiere de una

optimización en base a un presupuesto cerrado, o de una clasificación de inversiones.

- **Paso 2:** Definición del problema: FDs. En este paso, se determinan los FDs del conjunto de inversiones mediante el estudio de sus características principales, que serán utilizados como guía en el desarrollo del árbol jerárquico.
- **Paso 3:** Definición del problema: IN. En el escenario de un conjunto de alternativas heterogéneas, se desarrolla el IN específico del problema de toma de decisión, considerando las cuatro categorías principales.
- **Paso 4:** Definición del problema: MIVES Extendido. Utilizando los FDs, se define el árbol de jerarquía de MIVES Extendido, con sus requerimientos, criterios e indicadores. Posteriormente, y considerando el IN si fuese necesario, se especifica la evaluación y la función de valor de cada indicador.
- **Paso 5:** Definición de intereses. Se seleccionan los actores que participan en el proceso de toma de decisión y se les asignan influencias. Con estos datos, se aplica HIVES para hallar los pesos de los elementos requeridos.
- **Paso 6:** Obtención de resultados. Al completar los cinco pasos previos, se aplica MIVES Extendido para obtener los resultados del SEPIP. Además, si se ha especificado en el Paso 1, deben aplicarse los métodos Knapsack (para obtener los resultados optimizados según un presupuesto) o MIVES Sorting (para obtener una clasificación de inversiones).

8.3. APLICACIÓN DEL SEPIP

En esta sección se muestra en detalle la aplicación del SEPIP a un caso real de estudio, posibilitando la evaluación y análisis de su adaptabilidad. Primeramente, se contextualiza el escenario y se explica el proceso seguido, y para facilitar la comprensión al lector, posteriormente se presentan las subsecciones de aplicación ordenadas según del algoritmo del SEPIP.

8.3.1. Contextualización del escenario

A través del autor de esta Tesis Doctoral, se estableció comunicación con el Ayuntamiento de Manresa (en adelante, la entidad solicitante), la administración pública encargada de esta ciudad. Manresa, capital de la comarca del Bages, asume el rol de nexo entre la zona industrial de la provincia de Barcelona (de la que forma parte), y las zonas rurales exteriores, siendo además la ciudad más poblada de Cataluña central con más de 75,000 habitantes. Tras la confirmación del alcalde de dicha entidad, se aceptó la implementación del SEPIP a un conjunto de inversiones que llevan tiempo siendo planteadas tanto por la propia entidad y los ciudadanos. Con el objetivo de llevar a cabo la aplicación del SEPIP, la entidad solicitante designó a un representante, Ramón Culleré i Córdoba (en adelante, el representante), como enlace con el equipo técnico (formado por

el autor y los directores de esta Tesis Doctoral). A través de múltiples reuniones entre el representante y el equipo técnico, mostradas en la Figura 8.3, se implementó el algoritmo del SEPIP para obtener los índices de sostenibilidad del conjunto de inversiones propuesto por la entidad solicitante.

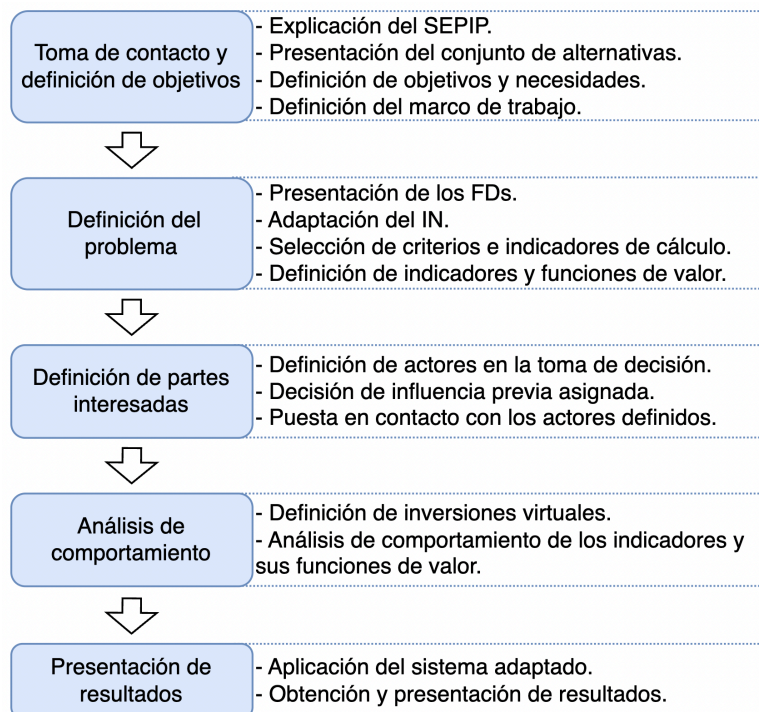


Figura 8.3 –Proceso de aplicación del SEPIP.

Inicialmente, se realizaron las reuniones de toma de contacto y definición de objetivos, donde se presentó el SEPIP y sus características. Durante estas sesiones, el representante concretó el conjunto de inversiones que serían sometidas al análisis y sus características principales, y se recopilaron datos relativos a los intereses y necesidades de la entidad para determinar sus objetivos y necesidades. En última instancia, se definió la frecuencia y modalidad de las futuras reuniones de trabajo. Posteriormente, tuvieron lugar las reuniones de definición del problema, durante las cuales se estudiaron y presentaron los FDs del conjunto de inversiones, así como el IN a implementar. Consecutivamente, se desarrolló el árbol de jerarquía de MIVES Extendido, asignando las evaluaciones y funciones de valor de cada indicador. Finalizadas esas reuniones, se derivó a la reunión de definición de partes interesadas, en las que se decidieron los actores participantes y la influencia que estos tendrían en el proceso de decisión. Conociendo el IN y el árbol jerárquico de MIVES Extendido, se contactó con los actores para obtener sus evaluaciones, que fueron agregadas con el método HIVES para obtener los pesos de cada elemento analizado. Finalizado este proceso, se generó el método MIVES Extendido y se llevaron a cabo reuniones de análisis de comportamiento. Durante estas sesiones, se plantearon inversiones ficticias elaboradas por el equipo expertos para analizar los resultados obtenidos. Este proceso permitió ajustar y calibrar los indicadores y sus correspondientes funciones de valor, con el fin de que reflejaran de manera precisa las preferencias de la entidad solicitante. Finalmente, el SEPIP se aplicó con el conjunto de inversiones propuesto, obteniendo así los resultados finales.

8.3.2. Definición de objetivos

El primer paso del algoritmo de aplicación del SEPIP es la definición de objetivos, en el que se presenta el conjunto de inversiones y se seleccionan los métodos y técnicas del SEPIP que den respuesta a las necesidades de la entidad. En este caso de estudio, las inversiones conforman el conjunto de análisis son:

- **Inversión 1 (I1):** La rehabilitación de un edificio cultural conocido como la “Anónima”, para albergar diversas actividades culturales y artísticas, tales como exposiciones, talleres, eventos y otras actividades culturales. Además, servirá como sede de la agencia de desarrollo cultural del Ayuntamiento de Manresa.
- **Inversión 2 (I2):** Construcción de un espacio de conocimiento, empresa ciudad y territorio en la zona conocida como “Fábrica Nueva”, que en un futuro albergue la sede de la Universidad Politécnica de Catalunya en Manresa. Esta inversión tiene también como objetivo renovar y estimular el crecimiento económico y social de la zona y sus proximidades.
- **Inversión 3 (I3):** La pacificación de una de las calles comerciales más emblemáticas de la ciudad, la Calle Guimerà. Esta inversión implica la restricción del acceso vehicular y la priorización de los espacios destinados a los peatones, buscando fomentar la interacción social, el esparcimiento y la actividad comercial en un entorno libre de tráfico.
- **Inversión 4 (I4):** Rehabilitación de la Torre Lluvià. Esta torre, situada en un enclave estratégico de la Anilla Verde de Manresa, es un punto de fomento de actividades culturales, recreativas y educativas basadas en la naturaleza y los espacios verdes.
- **Inversión 5 (I5):** Ampliación y modernización del pabellón de básquet “Nuevo Congost”. Se busca crear un espacio versátil y adaptable que permita albergar eventos deportivos de alta competición, así como actividades deportivas y recreativas para la comunidad.
- **Inversión 6 (I6):** Urbanización completa del polígono industrial conocido como “Pont Nou II”, transformando el área en un centro de actividad económica y empresarial. Esta iniciativa tiene como objetivo principal dotar al polígono de las infraestructuras y servicios necesarios para albergar un gran conjunto de empresas, promoviendo así el desarrollo económico de la zona y generando oportunidades de empleo en la región.

Nótese que estas inversiones generan un conjunto heterogéneo. Además, debe mencionarse que, si bien alguna de las inversiones ya ha recibido capital para el acondicionamiento de la zona o trabajos previos, todas ellas están actualmente en fase de conceptualización.

En lo referente a las necesidades de la entidad, esta requiere de: (i) la obtención de una lista de priorización de las inversiones propuestas, (ii) la obtención de los valores referidos a los impactos económicos, ambientales y sociales de cada inversión, para su comparación y estudio, (iii) el análisis sobre si las inversiones propuestas conllevan un impacto económico, ambiental o social sobresaliente, y (iv) conocimiento de riesgo por modificaciones de coste de las inversiones. Por ello, se descarta el uso de Knapsack (optimización bajo un presupuesto cerrado), mientras que MIVES Sorting (clasificación de inversiones) se utiliza para generar un sistema de etiquetaje de excelencia económica, social y ambiental, que refieren a un rendimiento excepcional de las inversiones en estos aspectos.

8.3.3. Definición del problema: FDs e IN

El segundo y tercer paso del algoritmo de aplicación del SEPIP corresponden a la definición de los FDs del conjunto de inversiones que servirán como guía en la generación del árbol de requerimientos de MIVES Extendido, y a la adaptación del IN del caso de estudio para homogeneizar las inversiones, respectivamente.

Dado que las seis inversiones de análisis exhiben una notable heterogeneidad, resulta fundamental identificar el denominador común que comparten para crear un conjunto de FDs que abarque todas sus características críticas. Este denominador se encuentra en su naturaleza como inversiones relacionadas con obras civiles. Basándose en esta característica, se ha llevado a cabo el estudio de los FDs en obras civiles, detallado en el Anejo 1 de esta Tesis Doctoral, lo que ha permitido la obtención de los FDs que se presentan en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1 – FDs del conjunto de inversiones analizado.

nº	Factor determinante	Descripción
1	Condición	Factores referidos al estado físico de la infraestructura actual y su durabilidad, considerando la vida útil de la misma.
2	Capacidad y Calidad	Factores referidos a la capacidad de la infraestructura para satisfacer la demanda actual, considerando aspectos tales como la saturación a la que se ve sometida, y criterios pertinentes a la calidad ofrecida en el servicio ofrecido.
3	Necesidades futuras	Factores centrados en la comparación entre el estado actual de la infraestructura y las necesidades proyectadas en un futuro, como por ejemplo variaciones de Condición, Capacidad y Calidad. Este factor también puede considerar efectos socioeconómicos a largo plazo, incluyendo cómo la infraestructura contribuye al desarrollo y a las necesidades futuras de la sociedad en términos de empleo, crecimiento económico y bienestar, o alineaciones con estrategias políticas de largo enfoque no enmarcadas en el Factor determinante 8.
4	Operación y Mantenimiento	Factores referidos al análisis de rendimiento en la operación y mantenimiento de la infraestructura actual, ya sea con perspectiva económica, de eficiencia o de normativa.
5	Financiación	Factores referidos principalmente a la parte monetaria de la infraestructura o inversión, como su coste, retornos económicos o financiación externa no computable a la entidad solicitante, entre otros.
6	Seguridad pública	Factores alusivos a la seguridad proporcionada por la infraestructura ante riesgos naturales o humanos.
7	Resiliencia	Factores referentes a la capacidad de la infraestructura para resistir y recuperarse de eventos adversos a los que puede verse sometida, tales como desastres naturales o acciones humanas.
8	Innovación y Sostenibilidad	Factores referidos al estado innovativo de la infraestructura tales como nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia, y factores referentes a la sostenibilidad económica, social y ambiental que no hayan sido considerados en los anteriores Criterios Fundamentales.

Esta misma heterogeneidad marca la necesidad de aplicación del IN. Este IN, mostrado en la Figura 8.4, es generado considerando las cuatro categorías principales (§ 8.2.2) adaptadas a las necesidades de la entidad solicitante. Se puede denotar que las sinergias entre inversiones son desestimadas, quedando el IN estructurado en torno a la Contribución al equilibrio territorial, el Alcance de actuación y la Evaluación de la situación previa. Para evaluar cada una de estas categorías se utiliza un sistema de atributos, permitiendo así que el IN pueda tener valores de 0 a 5. Nótese que, en caso de tener un IN de 0, la alternativa se descarta de la evaluación de MIVES Extendido, pues se considera totalmente innecesaria.

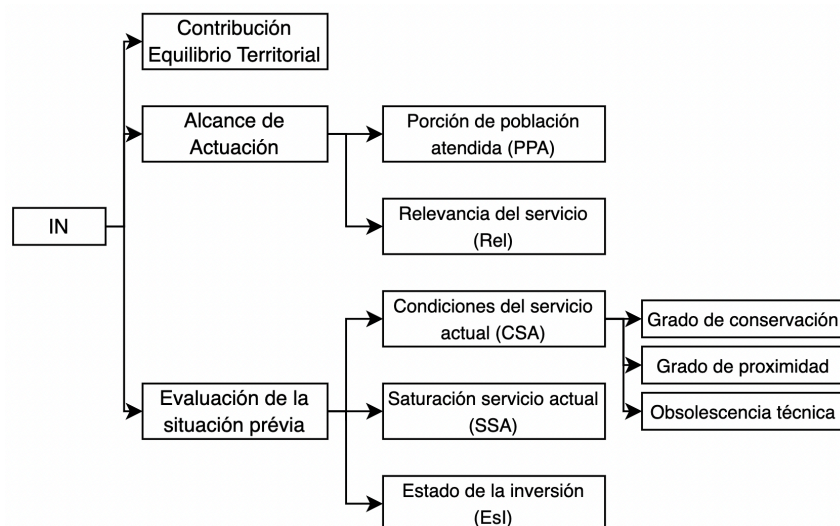


Figura 8.4 –Jerarquía del IN de inversiones de Manresa.

Contribución al Equilibrio Territorial (CET)

Siguiendo las recomendaciones de Pardo-Bosch (2016), esta categoría se evalúa cuantitativamente mediante la ecuación 8.1, adaptada a la ecuación 8.2 al sustituir las zonas por los barrios de Manresa.

$$DIZ = \left(1 - \frac{I_{\text{barrio}}^{8 \text{ años}}}{I_{\text{total}}^{8 \text{ años}}}\right) \left(\alpha_1 \cdot \frac{DP_{\text{barrio}}}{DP_{\text{total}}} + \alpha_2 \cdot \frac{R_{\text{barrio}}}{R_{\text{total}}}\right) \quad [8.2]$$

Dónde

I es el valor de inversión total en los últimos 8 años,

DP es la densidad de población,

R es la renta de la población,

α_1 es el peso de la densidad de población,

α_2 es el peso de la renta.

Alcance de Actuación (AdA)

La categoría de AdA se divide en los componentes de Porción de población atendida (PPA) y la relevancia del servicio (Rel) mediante la ecuación 9.2, dónde β_1 y β_2 es su peso, respectivamente. Los valores cuantitativos de PPA y Rel se asignan mediante los atributos mostrados en las Tablas 8.2 y 8.3.

$$AdA = \beta_1 \cdot PPA + \beta_2 \cdot Rel \quad [8.3]$$

Tabla 8.2 – Atributos de evaluación PPA.

Atributo	Descripción	Puntuación
Ciudad	Inversión que responde a un interés general i su impacto llega a gran parte de la sociedad de la ciudad.	5
Barrio	Inversión que sirve mayoritariamente a los ciudadanos de un solo barrio de la ciudad.	3
Puntual	Inversión que sirve a una pequeña parte de los ciudadanos de un solo barrio de la ciudad.	1

Tabla 8.3 – Atributos de evaluación Rel.

Atributo	Descripción	Puntuación
Imprescindible	Inversión indispensable, esencial, vital y obligatoria.	5
Prioritaria	Inversión importante con carácter de urgencia.	4
Importante	Inversión que, aun no siendo imprescindible o prioritaria, da solución a una problemática destacable, recomendada por expertos.	3
Complementaria	Inversión que puede ser prescindida sin perjuicio alguno.	2
Estética	Inversión de interés estético, pero no funcional.	1
Prescindible	Inversión considerada innecesaria.	0

Evaluación de la situación previa (ESP)

La categoría ESP se calcula mediante la ecuación 8.4, dónde γ_1 , γ_2 , y γ_3 es el peso de las Condiciones del servicio actual (CSA), la Saturación del servicio actual (SSA) y el Estado de Inversión (Esl), respectivamente.

$$ESP = \gamma_1 \cdot CSA + \gamma_2 \cdot SSA + \gamma_3 \cdot Esl \quad [8.4]$$

Si bien tanto la SSA como el Esl se evalúan directamente mediante los atributos mostrados en las Tablas 8.4 y 8.5, respectivamente, las CSA se subdividen en tres componentes: estado de conservación físico de la infraestructura o alternativa actual (EdC), la proximidad de alternativas actuales que ofrezcan el mismo servicio o tengan la misma función (GdP) y la obsolescencia técnica de la infraestructura o alternativa actual (ObT). Estos componentes se puntúan según los atributos mostrados en la Tabla 8.6, y la media de los tres valores proporciona el valor de cálculo de las CSA.

Tabla 8.4 – Atributos de SSA.

Atributo	Descripción	Puntuación
Sin alternativa	No hay una alternativa existente que pueda ofrecer el servicio.	5
Sobresaturada	El servicio tiene una saturación superior al 100%.	4
Saturada	El servicio tiene una saturación entre el 76% y el 100%.	3
Correcta	El servicio tiene una saturación entre el 51% y el 75%.	2
Infrautilizada	El servicio tiene una saturación inferior al 50%.	1
No evalúa	Este servicio no puede ser analizado desde esta perspectiva.	0

Tabla 8.5 – Atributos de Esl.

Atributo	Descripción	Puntuación
A finalizar	La inversión ya realizada es superior al 80% del coste total.	5
Avanzada	La inversión ya realizada se encuentra entre el 50% y el 80% del coste total.	4
Consolidada	La inversión ya realizada se encuentra entre el 20% y el 50% del coste total.	3
Intermedia	La inversión ya realizada se encuentra entre el 10% y el 20% del coste total.	2
Inicial	La inversión ya realizada se encuentra entre el 1% y el 10% del coste total.	1
Nuevo	No existe una inversión previa.	0

Tabla 8.6 – Atributos de los componentes de CSA.

	Atributo	Descripción	Puntuación
Ecl	Sin alternativa	No existe una alternativa existente que pueda ofrecer el servicio, o el proyecto analizado no puede continuar en funcionamiento.	5
	Muy bajo	El proyecto existente analizado necesita una nueva inversión debido a su mal estado. Aunque puede seguir funcionando bajo ciertas condiciones limitadas, en ciertos momentos se producen interrupciones de funcionamiento.	4
	Bajo	El proyecto existente analizado necesita una nueva inversión debido a su mal estado, aunque puede seguir funcionando bajo ciertas condiciones limitadas.	3
	Adecuado	El proyecto existente analizado puede seguir ofreciendo el servicio en condiciones adecuadas, aunque necesita una pequeña adecuación.	2
	Alto	A pesar de llevar tiempo en explotación, el proyecto existente analizado se encuentra en condiciones adecuadas para seguir funcionando como el primer día. En todo caso, solo necesita una adecuación estética.	1
	Nuevo / No evalúa	El proyecto existente es nuevo (ha transcurrido menos del 10% de su vida útil) y cumple con todas las necesidades previstas. / Este servicio no puede analizarse desde esta perspectiva.	0
GdP	Sin alternativa	No existe una alternativa existente que pueda ofrecer el servicio, o el proyecto analizado no puede continuar en funcionamiento.	5
	Muy bajo	Servicio existente muy descentralizado (se ofrece en barrios lejanos).	4
	Bajo	Servicio existente descentralizado (se ofrece en barrios circundantes).	3
	Adecuado	Servicio existente localizado (se ofrece en un único punto del barrio).	2
	Alto	Servicio existente muy localizado (se ofrece en uno o más puntos del barrio).	1
	No evalúa	Este servicio no puede analizarse desde esta perspectiva.	0
ObT	Sin alternativa	No existe una alternativa existente que pueda ofrecer el servicio, o el proyecto analizado no puede continuar en funcionamiento.	5
	Obsoleto	El servicio existente ha superado su vida útil.	4
	Anticuado	El servicio existente ha superado el 66% de su vida útil.	3
	Adecuado	El servicio existente se encuentra entre el 33% y el 66% de su vida útil.	2
	Moderno	El servicio existente no ha llegado al 33% de su vida útil.	1
	Nuevo / No evalúa	El proyecto existente es nuevo (ha transcurrido menos del 10% de su vida útil) y cumple con todas las necesidades previstas. / Este servicio no puede analizarse desde esta perspectiva.	0

8.3.4. Definición del problema: MIVES Extendido

El cuarto paso implica el cierre de la definición del problema. En esta etapa, se crea el árbol de jerarquía de MIVES Extendido utilizando como referencia los FDs, y se especifica detalladamente la evaluación de cada indicador y su función de valor. Como se muestra en la Figura 8.5, en el presente caso de estudio los requerimientos de sostenibilidad se expanden a 7 criterios, que comprenden un total de 10 indicadores.

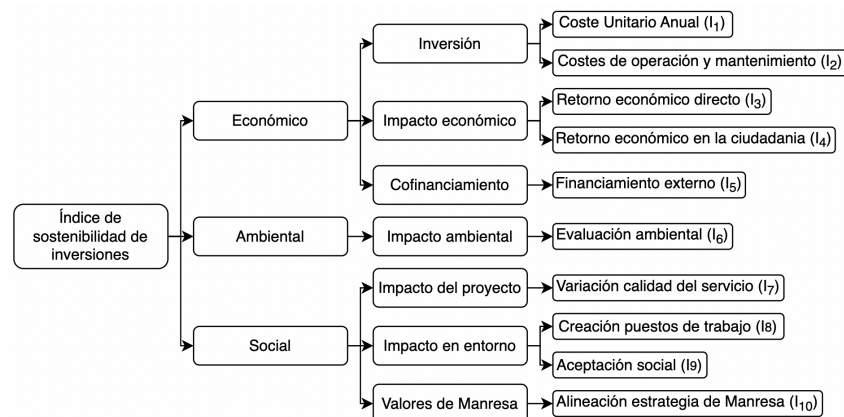


Figura 8.5 –Árbol Jerárquico de MIVES Extendido adaptado al caso de estudio.

Requerimiento económico

El requerimiento económico analiza el uso que se le da a los recursos económicos disponibles. Sus criterios no sólo estudian costes directos y la probabilidad de obtener recursos externos, sino que considera el impacto económico generado tanto en la entidad como en los ciudadanos.

Coste Unitario Anual (CUA)

Debido a la existencia del IN y a la diferencia entre las vidas útiles de las inversiones del conjunto, se utiliza como base la propuesta de Pardo-Bosch (2016) para relativizar el coste económico con el IN y la vida útil. Sin embargo, tras el análisis de comportamiento, esta propuesta se ajusta mediante la elevación al cuadrado del IN (ver ecuación 8.5) para aumentar su impacto, representando así correctamente las preferencias de la entidad.

$$CUA = \frac{I_{Total}}{IN^2 \cdot VU} \quad [8.5]$$

Dónde

I_{Total} es la cantidad total de euros a invertir en la inversión analizada,

VU es la vida útil que se espera que tenga la inversión analizada.

La función de valor utilizada para transformar el valor de CUA a su índice de satisfacción se obtiene a partir de la ecuación 8.6, y tiene una forma decreciente de tipo lineal hasta aproximadamente un valor de 35.000 CUA, en el que adopta una representación similar a una función logarítmica decreciente con el mínimo valor en (100.000; 0), para representar la poca preferencia, pero cierta aceptación, a valores de CUA altos (ver Figura 8.6).

$$V_{ind}^{CUA} = 1 \cdot 1.582 \cdot [1 - e^{-1 \cdot (\frac{x-100000}{100000})^3}] \tag{8.6}$$

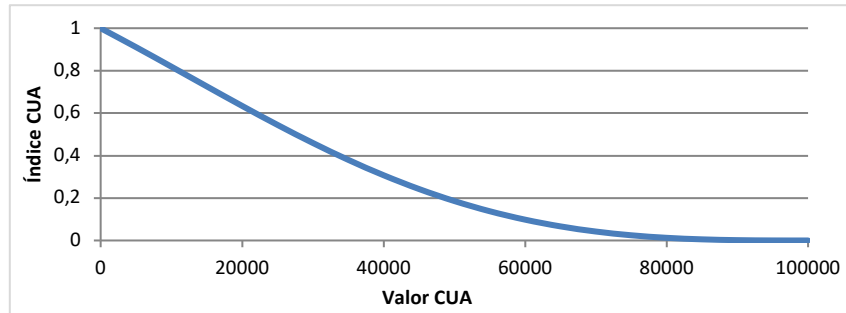


Figura 8.6 –Función de valor del indicador CUA.

Costes de Operación y Mantenimiento (COM)

Este indicador evalúa la diferencia entre los costes económicos de operación (ΔD_0) y mantenimiento (ΔD_M) de la situación actual y los costes una vez implementada la inversión analizada mediante la ecuación 8.7, donde δ_1 y δ_2 son su peso, respectivamente. Debido a la dificultad para cuantificar este dato, los valores de estas diferencias son asignados mediante los atributos contenidos en la Tabla 8.7.

$$COM = (\delta_1 \cdot \Delta D_M + \delta_2 \cdot \Delta D_0) \cdot IN \tag{8.7}$$

Tabla 8.7 – Atributos de ΔD_M y ΔD_0 .

Atributo	Descripción	Puntuación
Gran ahorro	Genera un ahorro muy significativo en gastos de mantenimiento/operación a lo largo de su vida útil.	5
Ahorro	Genera cierto ahorro en gastos de mantenimiento/operación durante su vida útil.	4
Nulo o marginal	No se identifican variaciones destacables en los gastos de mantenimiento/operación durante su vida útil.	3
Aumento	Genera cierto aumento en los gastos de mantenimiento/operación durante su vida útil.	2
Gran aumento	Genera un considerable aumento en los gastos de mantenimiento/operación durante su vida útil.	1

Para el COM se ha utilizado la función de valor cóncava creciente resultante de la ecuación 8.8 y mostrada en la Figura 8.7, en la que la satisfacción crece rápidamente al conseguir situaciones de ahorro.

$$V_{ind}^{COM} = 1 \cdot 1.052 \cdot [1 - e^{-3 \cdot (\frac{x}{25})^1}] \tag{8.8}$$

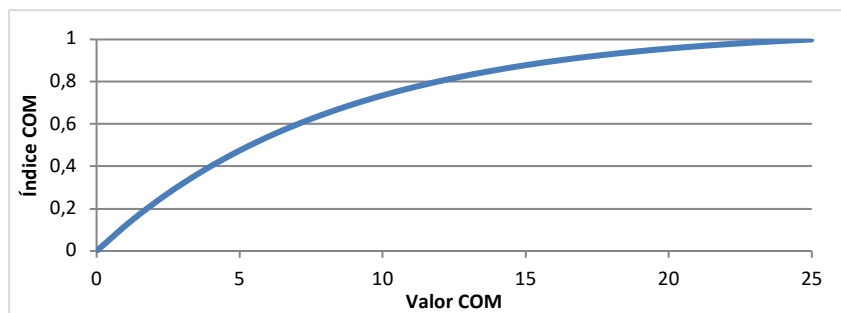


Figura 8.7 –Función de valor del indicador COM.

Retorno económico directo (RED)

Debido a que la entidad solicitante mostró un especial interés en los impactos económicos que generaban las inversiones a analizar, este indicador estudia el retorno económico que afecta directamente a su presupuesto. Mediante la ecuación 8.9, que utiliza los atributos de la Tabla 8.8, este indicador permite asignar a cada inversión una aproximación de su rendimiento esperado.

$$RED = RED_A \cdot IN \tag{8.9}$$

Tabla 8.8 – Atributos de RED.

Atributo	Descripción	Puntuación
Rendimiento muy alto	Genera un rendimiento superior a 30.000 euros anuales durante su vida útil.	5
Rendimiento alto	Genera un rendimiento entre 20.001 y 30.000 euros anuales durante su vida útil.	4
Rendimiento moderado	Genera un rendimiento entre 10.001 y 20.000 euros anuales durante su vida útil.	3
Rendimiento bajo	Genera un rendimiento inferior a 10.000 euros anuales durante su vida útil.	2
Rendimiento nulo o marginal	No se identifica un rendimiento destacable durante su vida útil.	1

De forma similar al COM, la función de valor escogida para el RED (ver Figura 8.8) es una función cóncava creciente generada mediante la ecuación 8.10.

$$V_{ind}^{RED} = 1 \cdot 1.094 \cdot [1 - e^{-3 \cdot (\frac{x}{30})^{1.1}}] \tag{8.10}$$

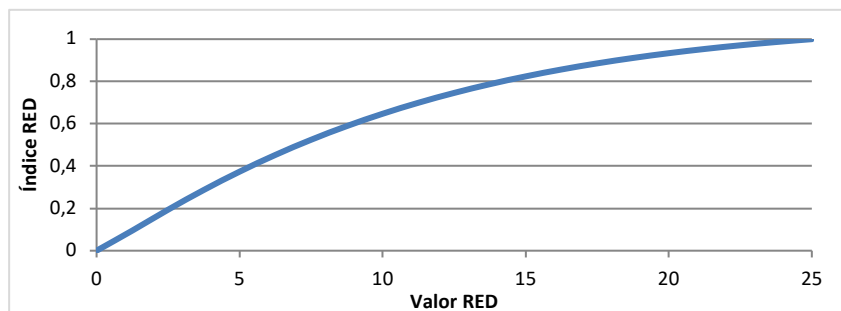


Figura 8.8 –Función de valor del indicador RED.

Retorno económico en la ciudadanía (REC)

Siguiendo la línea del anterior indicador, este se centra en el retorno económico que impacta directamente en la ciudadanía. Debido a la complejidad de este indicador, es necesario definir unos atributos detallados en base a las posibilidades que pueden darse (ver Tabla 8.9), que son implementados en la ecuación 8.11 para obtener el valor de REC

$$REC = REC_A \cdot IN \quad [8.11]$$

Tabla 8.9 – Atributos de REC.

Atributo	Descripción	Puntuación
Retorno muy alto	La inversión genera un retorno económico muy alto durante su vida útil, con un impacto significativo en los comercios e industrias locales. Los negocios experimentan un aumento sustancial en las ventas y beneficios, lo que los hace susceptibles a recibir nuevas inversiones y financiamiento, o llevar a cabo expansiones.	5
Retorno alto	La inversión genera un retorno económico alto durante su vida útil. Los negocios experimentan un aumento sustancial en las ventas y beneficios, posicionándose al límite de su capacidad de servicio o producción.	4
Retorno moderado	La inversión genera un retorno económico moderado durante su vida útil, con un impacto notable en los comercios e industrias locales. Los negocios experimentan un crecimiento sostenido en las ventas y beneficios, fomentando la aparición de sinergias y colaboraciones entre empresas locales.	3
Retorno bajo	Se identifica un leve retorno económico en los comercios e industrias locales, que experimentan un pequeño impulso en sus volúmenes de ventas o visibilidad, aumentando su rendimiento económico y favoreciendo el crecimiento del negocio durante la vida útil de la inversión.	2
Retorno nulo o marginal	No se identifica un retorno económico destacable en los comercios e industrias locales.	1

De nuevo, la función de valor escogida para el REC (ver Figura 8.9) es una función cóncava creciente generada mediante la ecuación 8.12, que permite mostrar un aumento mucho más significativo con valores bajos. Esta inclinación denota la importancia que la entidad da a este indicador, en comparación a otras funciones similares.

$$V_{ind}^{REC} = 1 \cdot 1.024 \cdot [1 - e^{-3 \cdot (\frac{x}{20})^1}] \quad [8.12]$$

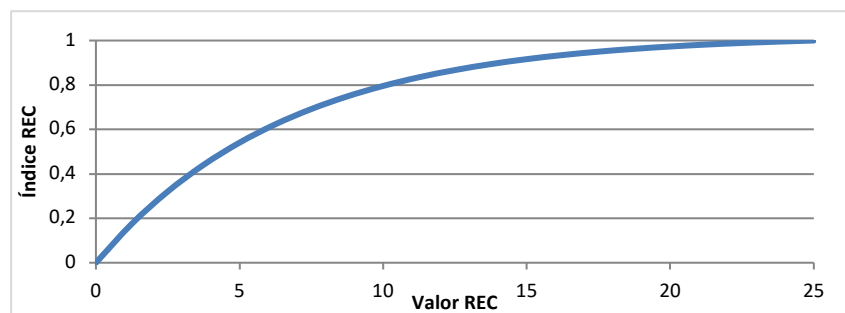


Figura 8.9 – Función de valor del indicador REC.

Financiamiento externo (FEI)

Debido a que la mayoría de grandes inversiones que lleva a cabo la entidad solicitante dependen de la posibilidad de ser financiados externamente, y ante el fuerte impacto que las recientes ayudas europeas están generando en su plan de inversiones, este indicador actúa como pieza fundamental en el análisis de capital externo. El FEI, propuesto por Pardo-Bosch (2016) tal y como muestra la ecuación 8.13, estudia tanto la probabilidad que una inversión sea cofinanciada (PrF), como la posible cantidad de esta cofinanciación (QuF). Los valores de PrF y QuF se asignan mediante el sistema de atributos contenidos en las Tablas 8.10 y 8.11, respectivamente.

$$FEI = PrF \cdot QuF \cdot IN \quad [8.13]$$

Tabla 8.10 – Atributos de PrF.

Atributo	Descripción	Puntuación
Muy alta	Existe un compromiso firme de financiamiento en caso de realizar la inversión.	5
Alta	Es una inversión que ha sido muy bien recibida en otros lugares, por lo que se cree que será fácil obtener financiamiento.	4
Media	Es una inversión cuya aceptación aún no se puede determinar con certeza, aunque está alineada con los valores promovidos por los inversores.	3
Baja	Es un tipo de inversión que rara vez recibe financiamiento externo.	2
Muy baja	Obtener financiamiento para una inversión de estas características es prácticamente imposible.	1

Tabla 8.11 – Atributos de QuF.

Atributo	Descripción	Puntuación
Muy alta	Prácticamente la totalidad de la inversión (Financiamiento > 80%).	5
Alta	Una parte muy significativa de la inversión (60% < Financiamiento ≤ 80%).	4
Media	Aproximadamente la mitad de la inversión (40% < Financiamiento ≤ 60%).	3
Baja	Una parte reducida de la inversión (10% < Financiamiento ≤ 40%).	2
Muy baja	Una parte muy pequeña de la inversión (Financiamiento ≤ 10%).	1

La ecuación 8.14 se utiliza para generar la función de valor FEI de la Figura 8.10, con una forma en S creciente. Esta forma permite representar el bajo impacto e interés que tienen valores bajos, con pocas probabilidades y poca cantidad cofinanciada, a la vez que incorpora una subida prácticamente lineal entre los valores FEI (15, 45). Al mismo tiempo, se muestran altos valores en la etapa final, prácticamente alcanzando el máximo sobre un valor de 90 aun siendo 125 el máximo posible.

$$V_{ind}^{FEI} = 1 \cdot 1.000 \cdot [1 - e^{-1 \cdot (\frac{x}{45})^2}] \quad [8.14]$$

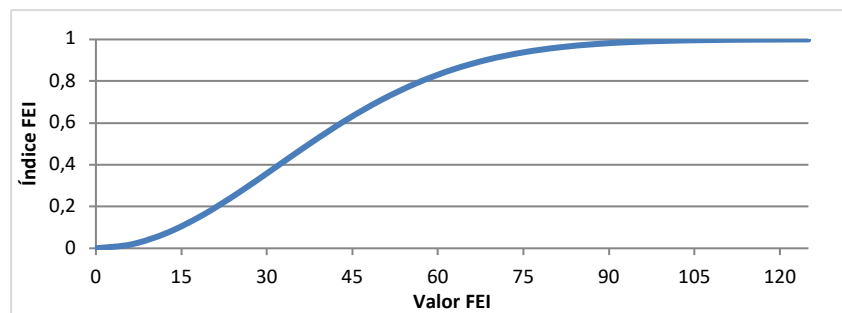


Figura 8.10 –Función de valor del indicador FEI.

Requerimiento ambiental

El requerimiento ambiental contiene aquellos criterios e indicadores que evalúan y analizan el impacto que tienen las distintas inversiones sobre la naturaleza. En el presente caso de estudio, únicamente un criterio y un indicador fueron desarrollados dentro de este requerimiento.

Evaluación ambiental (EA)

Siguiendo las definiciones de Pardo-Bosch (2016), el impacto ambiental se puede determinar como los efectos que una inversión puede causar sobre las personas, la fauna, la flora, el suelo, el paisaje, el clima, el agua y el aire, así como sobre el patrimonio cultural. Por ello, este indicador evalúa este impacto basándose en el análisis de alineación por Política Activa (PoA) de este mismo autor. Estas PoAs son distintos efectos que cada una de las inversiones puede tener sobre la sostenibilidad ambiental. Se consideraron 8 PoAs:

- **Gestión de residuos (PoA₁):** Se refiere a cómo cada inversión modifica la gestión de residuos que se lleva a cabo en la situación actual, considerando prácticas de reciclaje, reutilización y disposición adecuada.
- **Eficiencia energética (PoA₂):** Evalúa la capacidad de las inversiones para optimizar el consumo de energía, reduciendo así su demanda y contribuyendo a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.
- **Uso de energía limpia (PoA₃):** Analiza si las inversiones aprovechan o promueven fuentes de energía renovable y de bajo impacto ambiental, como la solar, eólica o hidroeléctrica.
- **Eficiencia en uso de agua (PoA₄):** Examina cómo las inversiones gestionan y conservan el recurso hídrico, minimizando el consumo excesivo y promoviendo prácticas sostenibles de uso y reutilización del agua.
- **Calidad del aire (PoA₅):** Considera cómo las inversiones afectan la calidad del aire, según si generan emisiones de contaminantes atmosféricos y cómo contribuyen a mantener un ambiente saludable para las personas y la fauna.

- **Calidad acústica (PoA₆):** Evalúa el impacto del ruido generado por las inversiones en su entorno, considerando los niveles de contaminación sonora y su efecto en la calidad de vida de las personas y su impacto en la naturaleza.
- **Biodiversidad y espacios verdes (PoA₇):** Analiza cómo las inversiones afectan la diversidad biológica y la existencia de áreas verdes, considerando si promueven la conservación de la flora y fauna local y si proporcionan espacios para el esparcimiento.
- **Adecuación al paisaje (PoA₈):** Se refiere a cómo las inversiones se integran visualmente en el entorno circundante, considerando su diseño arquitectónico, uso de materiales y su contribución a la estética del paisaje.

Si bien en los trabajos llevados a cabo hasta la fecha estos efectos se analizaban mediante el uso de un sistema de atributos positivo (considerando la alineación con las PoA como mejoras), en el caso de Manresa este procedimiento se modifica completamente. Aunque se mantiene el sistema de atributos debido a la gran complejidad de llevar a cabo evaluaciones ambientales en fases de conceptualización, la entidad solicitante pidió explícitamente que existiera una diferencia entre los efectos positivos y negativos de las inversiones. Además, requirió que existiera la posibilidad de la nulidad, dado que algunas inversiones podían no tener efecto alguno sobre algunas PoAs.

Por ello, y tal y como se muestra en la Tabla 8.12, para cada PoA se considera un sistema de atributos positivo, entendido como efectos de mejora, y un sistema paralelo de atributos negativo, entendido como efectos de deterioro. Además, se da la opción de la nulidad, quedando así cubiertas todas las necesidades de la entidad. Estos atributos se recogen en las ecuaciones 8.15 y 8.16, donde PoA_i representa el valor del atributo del efecto i , considerado en la ecuación 8.15 si es positivo y en la ecuación 8.16 si es negativo. Por lo tanto, el indicador EA obtendrá dos valores para cada inversión, referidos a sus mejoras o deterioros. Además, nótese que en estas ecuaciones no aparece el IN, dado que se considera que los efectos de sostenibilidad ambiental no deben ser afectados por el grado de necesidad de una inversión.

$$EA^+ = \sum_{n=1}^8 PoA_i^+ \quad [8.15]$$

$$EA^- = \sum_{n=1}^8 PoA_i^- \quad [8.16]$$

Para modelar en detalle las preferencias de la entidad solicitante se desarrolla una función de valor positiva (generada a partir de la ecuación 8.17) y una función de valor negativa (generada a partir de la ecuación 8.18), que son aplicadas a EA^+ y EA^- , respectivamente (ver Figura 8.11). Por lo tanto, cada inversión cuenta con dos índices (EA^+ y EA^-), que son agregados para obtener el índice total de este indicador.

Tabla 8.12 – Atributos de PoA y su alineación.

Atributo	Alineación					
	No aplica	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Mejora/Deterioro en la gestión de residuos (PoA ₁)	0	1/-1	2/-2	3/-3	4/-4	5/-5
Mejora/Deterioro en la eficiencia energética (PoA ₂)	0	1/-1	2/-2	3/-3	4/-4	5/-5
Mejora/Deterioro en el uso de energía limpia (PoA ₃)	0	1/-1	2/-2	3/-3	4/-4	5/-5
Mejora/Deterioro en la eficiencia del uso de agua (PoA ₄)	0	1/-1	2/-2	3/-3	4/-4	5/-5
Mejora/Deterioro en la calidad del aire (PoA ₅)	0	1/-1	2/-2	3/-3	4/-4	5/-5
Mejora/Deterioro en la calidad acústica (PoA ₆)	0	1/-1	2/-2	3/-3	4/-4	5/-5
Mejora/Deterioro en la biodiversidad y espacios verdes (PoA ₇)	0	1/-1	2/-2	3/-3	4/-4	5/-5
Mejora/Deterioro en la adecuación al paisaje (PoA ₈)	0	1/-1	2/-2	3/-3	4/-4	5/-5

$$V_{ind}^{EA^+} = 1 \cdot 1.019 \cdot [1 - e^{-2 \cdot (\frac{x}{15})^1}] \tag{8.17}$$

$$V_{ind}^{EA^-} = -1 \cdot 1.019 \cdot [1 - e^{-2 \cdot (\frac{x}{15})^1}] \tag{8.18}$$

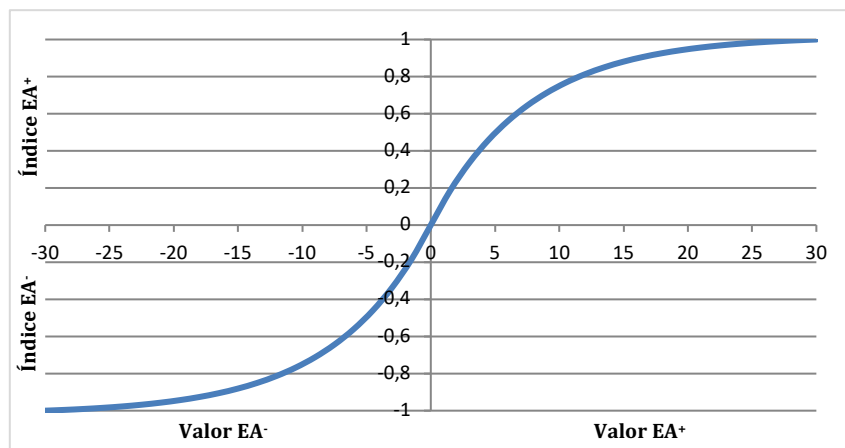


Figura 8.11 –Funciones de valor de EA+ y EA-.

Requerimiento social

El requerimiento social comprende los criterios e indicadores que analizan el impacto que tienen las distintas inversiones sobre el bienestar de los ciudadanos de forma directa o indirecta, así como su alineación con las políticas que se aplican en Manresa.

Variación de la calidad del servicio (VCS)

Este indicador contempla las posibles mejoras que las distintas inversiones pueden aportar a la sociedad, comparándolas con la situación actual. Debido a que estas mejoras pueden ser analizadas desde muchos enfoques distintos, se ha definido un conjunto de 7 campos de mejora (CAM) para toda inversión:

- **Mejora en la seguridad (CAM₁):** Esta mejora se refiere a la capacidad de una inversión para aumentar la seguridad de las personas y sus propiedades. Puede incluir medidas para prevenir accidentes, delitos o cualquier otra amenaza a la seguridad.
- **Mejora en la accesibilidad, comodidad y movilidad (CAM₂):** Se centra en facilitar el acceso a servicios y recursos, así como en hacer que los desplazamientos sean más cómodos y eficientes para la población. Puede implicar mejoras en el transporte público, infraestructuras accesibles o la reducción de barreras para la movilidad.
- **Mejora en la cultura (CAM₃):** Esta mejora aborda el enriquecimiento cultural de la sociedad, tales como inversiones en arte, patrimonio, eventos culturales y programas que promuevan la apreciación y participación en actividades culturales.
- **Mejora en la educación y formación (CAM₄):** Refiere a medidas que amplían el acceso a la educación y mejoran su calidad, como inversiones en escuelas, programas educativos, formación profesional y oportunidades de aprendizaje continuo.
- **Mejora en la salud, higiene y promoción del deporte (CAM₅):** Esta mejora se centra en promover la salud y el bienestar de la población. Puede abarcar desde la construcción de instalaciones deportivas hasta programas de salud pública y campañas de promoción de la higiene.
- **Mejora en la perspectiva de género (CAM₆):** Esta mejora se refiere a inversiones o acciones contenidas en la inversión que buscan reducir las desigualdades de género y promover la igualdad de oportunidades para todas las personas, independientemente de su género.
- **Mejora en la cohesión social (CAM₇):** Trata de fomentar la integración y la cooperación dentro de la sociedad, considerando inversiones o acciones contenidas en ellas que reduzcan la brecha entre diferentes grupos sociales.

Estos CAM se evalúan mediante un sistema de alineación de atributos, tal y como se muestra en la Tabla 8.13, que a petición de la entidad solicitante contempla la posibilidad de nulidad. Por tanto, una vez asignadas las puntuaciones CAM de cada inversión, estas se agregan mediante la ecuación 8.19 para obtener el valor VCS.

$$VCS = \sum_{i=1}^7 CAM_i \cdot IN \quad [8.19]$$

Tabla 8.13 – Atributos de CAM y su alineación.

Atributo	Alineación					
	No aplica	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Mejora en seguridad (CAM ₁)	0	1	2	3	4	5
Mejora en la accesibilidad, comodidad y movilidad (CAM ₂)	0	1	2	3	4	5
Mejora en la cultura (CAM ₃)	0	1	2	3	4	5
Mejora en la educación y formación (CAM ₄)	0	1	2	3	4	5
Mejora en la salud, higiene y promoción del deporte (CAM ₅)	0	1	2	3	4	5
Mejora en la perspectiva de género (CAM ₆)	0	1	2	3	4	5
Mejora en la cohesión social (CAM ₇)	0	1	2	3	4	5

Para el indicador VCS se diseña una función de valor creciente en forma de S (ver Figura 8.12) generada mediante la ecuación 8.20. Esta forma permite plasmar la baja satisfacción de la entidad solicitante por inversiones que conllevan muy pocas mejoras en la sociedad, representada por una parte inicial prácticamente plana. Posteriormente, la función adopta una forma cuasi lineal, que beneficia a puntuaciones ligeramente más altas.

$$V_{ind}^{VCS} = 1 \cdot 1.149 \cdot [1 - e^{-1 \cdot (\frac{x}{70})^2}] \quad [8.20]$$

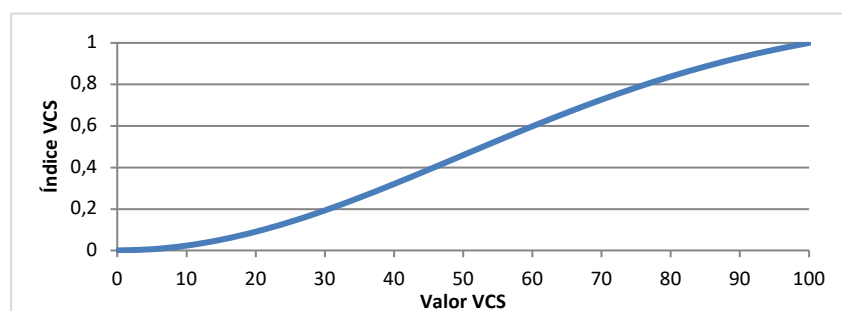


Figura 8.12 –Función de valor del indicador VCS.

Creación de puestos de trabajo (CPT)

Mediante el uso de este indicador se evalúan los puestos de trabajo que se generarían a partir de la implementación de cada una de las inversiones. Estos puestos de trabajo se dividen según su naturaleza:

- **Directos de ejecución (PDEj):** Puestos de trabajo generados durante la ejecución de la inversión analizada, que finalizan una vez terminada su implementación.
- **Directos de explotación (PDEx):** Puestos de trabajo directamente generados por la implementación de la inversión analizada.
- **Indirectos de explotación (PIEx):** Puestos de trabajo indirectamente generados por la implementación de la inversión analizada, como pueden ser sinergias entre empresas o por revitalización de la zona afectada.

Cada uno de estos grupos es evaluado mediante los atributos mostrados en la Tabla 8.14, obteniendo la puntuación correspondiente. Estas puntuaciones son agregadas mediante la ecuación 8.21 para obtener el valor del indicador CPT, en la que ε_1 , ε_2 , y ε_3 son sus respectivos pesos.

$$CPT = (\varepsilon_1 \cdot PDEj + \varepsilon_2 \cdot PDEx + \varepsilon_3 \cdot PIEx) \cdot IH \quad [8.21]$$

Tabla 8.14 – Atributos de PDEj, PDEx y PIEx.

Atributo	PDEj	PDEx	PIEx	Puntuación
Muy significativo	$PDEj > 100$	$PDEx > 20$	$PIEx > 200$	5
Significativo	$50 < PDEj \leq 100$	$10 < PDEx \leq 20$	$100 < PIEx \leq 200$	4
Intermedio	$30 < PDEj \leq 50$	$6 < PDEx \leq 10$	$60 < PIEx \leq 100$	3
Reducido	$10 < PDEj \leq 30$	$2 < PDEx \leq 6$	$20 < PIEx \leq 60$	2
Muy reducido	$0 < PDEj \leq 10$	$0 < PDEx \leq 2$	$0 < PIEx \leq 20$	1

Para este indicador se define la función de valor de mostrada en la Figura 8.13, obtenida mediante la ecuación 8.22. Esta función se caracteriza por su forma de curva en "S" ascendente, reflejando una baja satisfacción en puntuaciones bajas, que crece cuasi linealmente entre los valores CPT (5, 15), y prácticamente llega a la totalidad a partir de un valor CPT de 22.

$$V_{ind}^{CPT} = 1 \cdot 1.007 \cdot [1 - e^{-5 \cdot (\frac{x}{25})^2}] \quad [8.22]$$

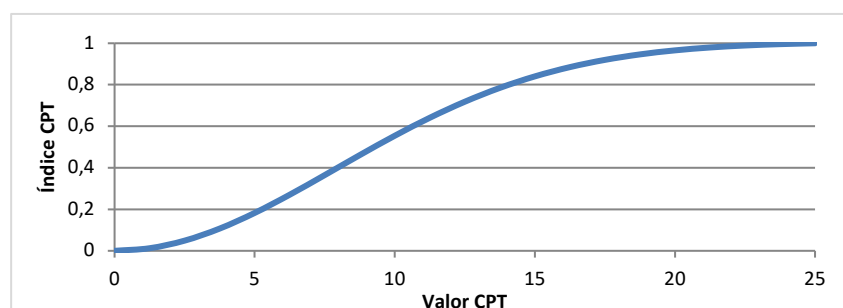


Figura 8.13 – Función de valor del indicador CPT.

Aceptación social (AS)

La implementación de una inversión que modifique el estado actual de la ciudad, ya sea de pequeñas o grandes proporciones, suele generar una opinión en los colectivos sociales que se ven afectados, como por ejemplo vecinos o asociaciones comerciales. Esta opinión puede ser tanto de apoyo, en la que los colectivos promoverán la implementación de la inversión, como de rechazo, en la que emitirán quejas o incluso se opondrán activamente a su implementación. Considerando este último punto, la entidad solicitante requirió que este indicador considerara tanto los efectos positivos como negativos de aceptación, así como la nulidad para aquellas inversiones en las que la posición de la ciudadanía fuera la indiferencia.

Por ello, y debido a la dificultad de cuantificar la aceptación social, se desarrolla un sistema de atributos con descripciones altamente caracterizadas, tal y como se muestra en la Tabla 8.15. Estos atributos son directamente aplicados a la ecuación 8.23, para obtener el valor de la AS. Nótese que en esta ecuación tampoco se considera el IN, pues generalmente la necesidad de una inversión ya repercute inherentemente en la percepción que la ciudadanía tiene de ella. En los casos que no es así, como por ejemplo en rechazos extremos de la ubicación de una prisión, esta necesidad es ignorada por el ciudadano.

$$AS = AS_A \quad [8.23]$$

Tabla 8.15 – Atributos de AS.

Atributo	Descripción	Puntuación
Aceptación o rechazo unánime	La inversión genera una aceptación unánime de la ciudadanía, que muestra apoyo y aceptación sin oposición ni resistencia visible. La inversión genera el rechazo unánime de la ciudadanía, sin el respaldo o aceptación por parte de ningún sector de la comunidad o interesados. Aparecen grupos de presión social fuertemente activos que llevan a cabo manifestaciones en contra de la inversión en las que participa la mayoría de la comunidad afectada.	5/-5
Aceptación o rechazo elevado	La inversión genera una alta aceptación, con una acogida entusiasta, positiva y energética por parte de los ciudadanos, que muestran apoyo e interés en aplicar el proyecto. La inversión genera un alto rechazo, con una fuerte percepción negativa de la totalidad del proyecto. Pueden aparecer agrupaciones de vecinos o ciudadanos como grupos de presión social en contra del proyecto.	4/-4
Aceptación o rechazo moderado	La inversión genera una aceptación moderada de la inversión, con una percepción positiva del proyecto y muestras explícitas de apoyo general. La inversión genera un rechazo moderado de la inversión, con una percepción negativa del proyecto. La comunidad puede mostrar resistencia mediante quejas y la voluntad de redefinir ciertos aspectos o características del proyecto mediante la participación ciudadana.	3/-3
Aceptación o rechazo parcial	La inversión genera una aceptación parcial, con una percepción general positiva y ciertos sectores de la comunidad interesados en algunas características o ventajas de la inversión. La inversión genera un rechazo parcial, con una percepción general negativa y ciertos sectores de la comunidad interesados preocupados por las características de la inversión. Pueden aparecer quejas definidas sobre el proyecto.	2/-2
Aceptación o rechazo mínimo	La inversión genera una aceptación mínima, con una percepción positiva pero una clara falta de apoyo activo por parte de la comunidad. La inversión genera un rechazo mínimo, con percepción negativa, pero sin queja definida sobre la propuesta.	1/-1
Neutral o inexistente	Esta división indica una respuesta neutral de la comunidad hacia la inversión, sin posturas claramente positivas ni negativas. La comunidad puede mostrar indiferencia o falta de interés significativo respecto a la inversión.	0

Para dar respuesta a las necesidades de la entidad solicitante, se diseñan dos funciones de valor para el indicador AS, cubriendo así las evaluaciones negativas y positivas. Estas funciones de valor (Figura 8.14), generadas a partir de las ecuaciones 8.24 y 8.25, toman una forma lineal entre el máximo valor negativo y el máximo valor positivo.

$$V_{ind}^{AS^+} = 1 \cdot 2000.5 \cdot [1 - e^{-1 \cdot (\frac{x}{10000})^1}] \quad [8.24]$$

$$V_{ind}^{AS^-} = -1 \cdot 2000.5 \cdot [1 - e^{-1 \cdot (\frac{x}{10000})^1}] \quad [8.25]$$

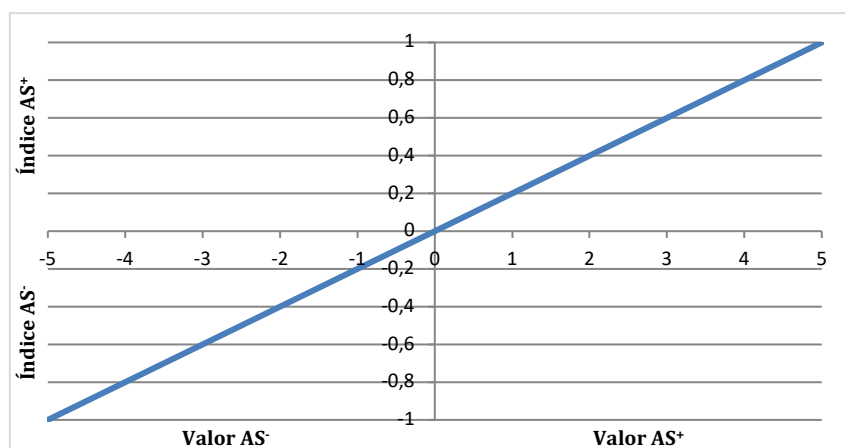


Figura 8.14 –Funciones de valor de AS+ y AS.

Alineación con la estrategia de Manresa (AEM)

Este último indicador evalúa si las inversiones a analizar están en sintonía con las políticas de desarrollo a largo plazo de Manresa, promoviendo la visión futura de la ciudad. Para ello, se han contemplado las distintas alineaciones que las inversiones pueden tener con los principales objetivos del último Plan de Acción de Manresa (2020-2023), llamados generales:

- **Ciudad verde y sostenible (AEM₁):** El objetivo es convertir a Manresa en una ciudad más sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Esto implica cambios en el entorno urbano o medidas para abordar la crisis climática.
- **Ciudad dinámica y de oportunidades (AEM₂):** Este objetivo contiene múltiples enfoques que se basan en impulsar la economía local e industrial, fomentar la creación de empleo y mejorar la formación de los trabajadores, promover el turismo y la imagen de la ciudad desarrollando Manresa como centro universitario, de investigación e innovación, y proporcionar apoyo y soluciones adaptadas a las necesidades específicas de los ciudadanos en función de las diferentes etapas de la vida.
- **Ciudad de encuentro y acogedora (AEM₃):** Fomentar una Manresa inclusiva y sin discriminación por origen, cultura, creencias, diversidad de género y orientación sexual, promover la educación y las políticas sociales para atender las necesidades de las personas y garantizar el acceso a viviendas asequibles. Además, se busca impulsar una ciudad saludable, deportiva y multicultural, donde la cultura sea un agente transformador.
- **Ciudad cívica, próxima y comprometida (AEM₄):** Lograr que Manresa sea una ciudad cívica y con barrios dinámicos a través de la mejora de la calidad del espacio urbano y la promoción de la participación ciudadana. Una ciudad comprometida con la cultura de la paz, los derechos humanos y la justicia global, y con una administración cercana y accesible para todos.

- **Ciudad capital (AEM₅):** Este objetivo busca potenciar la capitalidad de la Cataluña Central para reclamar mejoras en las infraestructuras viales y ferroviarias, y fomentar la coordinación de la promoción económica, mejorando los equipamientos de carácter territorial y promoviendo otros nuevos.

Además de los estos objetivos generales, se proponen los siguientes objetivos específicos en base a los requerimientos de la entidad solicitante:

- **Manresa y su anilla verde (AEM₆):** El objetivo es potenciar el anillo verde de Manresa, de especial interés municipal, para convertirlo en un espacio natural y de ocio de referencia para los ciudadanos. Esto implica mejorar la conectividad entre las diferentes zonas verdes y promover actividades deportivas y culturales en este entorno, preservar la biodiversidad y fomentar la sostenibilidad en la zona.
- **Manresa ciudad de 15 minutos (AEM₇):** Se pretende convertir a Manresa en una ciudad donde todos los servicios y equipamientos estén a su alcance en un radio de 15 minutos a pie o en bicicleta. Esta estrategia promueve una vida más saludable, así como una mejor integración y cohesión social.
- **Manresa y la movilidad sostenible (AEM₈):** Más allá del punto anterior, Manresa apuesta por la movilidad sostenible para reducir las emisiones de CO₂ y mejorar la calidad del aire. Con la creación de zonas peatonales y carriles para bicicletas, la promoción del transporte público y el impulso a la movilidad eléctrica, la ciudad está comprometida en la construcción de un modelo de movilidad más eficiente y respetuoso con el medio ambiente.
- **Manresa y el Centro Histórico (AEM₉):** Manresa tiene un rico patrimonio histórico, cultural y arquitectónico, con su centro histórico como epicentro. El objetivo es preservar y poner en valor estas zonas, revirtiendo el deterioro mostrado en los últimos años, fomentando su actividad comercial y cultural, mejorando su accesibilidad y reduciendo la circulación de vehículos en esta área.

Estos objetivos se evalúan mediante el sistema de alineación de atributos mostrado en la Tabla 8.16, cuyos valores se agregan mediante la ecuación 8.26. Con el valor del indicador AEM, se utiliza la ecuación 8.27 para generar la función de valor cóncava creciente mostrada en la Figura 8.15. Como puede denotarse, existe una primera etapa en la que pequeños valores de alineación con las políticas de futuro de Manresa generan un crecimiento muy pronunciado del valor del índice AEM, mientras que posteriormente la función ralentiza la obtención de este índice.

$$AEM = \sum_{i=1}^9 AEM_i \cdot IN \quad [8.26]$$

Tabla 8.16 – Atributos de AEM y su alineación.

Atributo	Alineación					
	No aplica	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Ciudad verde y sostenible (AEM ₁)	0	1	2	3	4	5
Ciudad dinámica y de oportunidades (AEM ₂)	0	1	2	3	4	5
Ciudad de encuentro y acogedora (AEM ₃)	0	1	2	3	4	5
Ciudad cívica, próxima y comprometida (AEM ₄)	0	1	2	3	4	5
Ciudad capital (AEM ₅)	0	1	2	3	4	5
Manresa y su anilla verde (AEM ₆)	0	1	2	3	4	5
Manresa ciudad de 15 minutos (AEM ₇)	0	1	2	3	4	5
Manresa y la movilidad sostenible (AEM ₈)	0	1	2	3	4	5
Manresa y el Centro Histórico (AEM ₉)	0	1	2	3	4	5

$$V_{ind}^{AEM} = 1 \cdot 1.434 \cdot [1 - e^{-1 \cdot (\frac{x}{120})^{0.8}}] \quad [8.27]$$

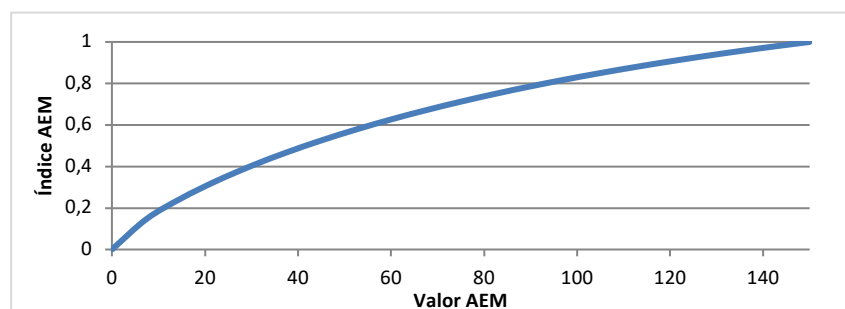


Figura 8.15 – Función de valor del indicador AEM.

8.3.5. Definición de intereses

Conociendo los componentes del IN y del árbol de jerarquía de MIVES Extendido, el quinto paso del algoritmo se centra en la selección de actores en la toma de decisión y la asignación de su influencia previa, aplicando posteriormente el método HIVES. En el presente caso de estudio, se consideran actores todos aquellos partidos políticos que tienen representación en la entidad solicitante (ERC, PSC, IM, Junts, FEM, FNC y VOX), utilizando su cantidad de concejales (7, 4, 2, 6, 3, 2 y 1, respectivamente) como base de asignación de influencia previa. Sin embargo, no se pudo contactar con ningún representante de VOX, por lo que este partido queda excluido del estudio.

Consecuentemente, la influencia previa es estimada según los votos asignados mediante la ecuación 8.28 (procedente de la § 4.2.3), siendo la Influenciaⁱ la cantidad de concejales de cada partido, y la Influencia_{min} la cantidad de concejales del partido menos representado (2). Siguiendo la ordenación de partidos presentada se obtiene un vector V = {3, 2, 1, 3, 1, 1}, correspondiente a los votos emitidos.

$$v^i = \frac{Influencia^i}{Influencia_{min}} \quad [8.28]$$

Este vector V se utiliza en conjunto con las valoraciones de los actores con respecto a los elementos del IN y del árbol jerárquico de MIVES Extendido, lo que da lugar a dos aplicaciones de HIVES. En la primera aplicación, los elementos de evaluación seleccionados para asignar importancia al IN son: el CET, la PPA y la REL (pertenecientes al AdA) y el CSA, la SSA y el EsI (pertenecientes a la ESP). Es importante denotar que, con esta selección, las variables β y γ (del AdA y la ESP, respectivamente) quedan excluidas. En la segunda aplicación, los elementos de evaluación seleccionados corresponden a los criterios del árbol jerárquico de MIVES Extendido.

Las valoraciones de estos elementos se obtuvieron mediante reuniones individuales con cada actor, durante las cuales se les presentó la definición de cada elemento. Para estas valoraciones, que se detallan en las Tablas 8.17 y 8.18 para los elementos del IN y del árbol jerárquico de MIVES respectivamente, los actores optaron por utilizar un sistema de porcentajes expresados en números exactos.

Tabla 8.17 – Evaluación de los elementos del IN de los actores, en porcentajes.

DMs	CET	PPA	Rel	CSA	SSA	EsI
ERC	20	20	25	10	15	10
PSC	15	20	20	10	20	15
IM	20	25	3	15	7	30
Junts	5	25	20	20	20	10
FEM	20	15	25	10	15	15
FNC	10	15	30	20	15	10

Tabla 8.18 – Evaluación de los elementos MIVES Extendido de los actores, en porcentajes.

DMs	Inversión	Impacto económico	Cofinanciamiento	Impacto Ambiental	Impacto del proyecto	Impacto en el entorno	Valores de Manresa
ERC	15	15	15	15	10	15	15
PSC	15	15	15	15	10	10	20
IM	30	20	3	6	4	12	25
Junts	15	25	5	15	15	15	10
FEM	10	10	10	20	20	15	15
FNC	10	15	5	15	15	20	20

Conociendo estos datos y el vector V , se procede a aplicar HIVES. Dado que este método ya ha sido detalladamente explicado en el Capítulo 4, se utiliza directamente su algoritmo (§ 4.2.5) para hallar los pesos mostrados en las ecuaciones 8.29 y 8.30 referentes a los componentes del IN y del árbol jerárquico de MIVES Extendido, respectivamente.

$$\gamma'_{IN} = \{ 15.77, 21.34, 21.35, 13.63, 16.81, 11.10 \} \quad [8.29]$$

$$\gamma'_{ME} = \{ 14.97, 16.22, 10.41, 14.96, 12.19, 14.94, 16.31 \} \quad [8.30]$$

8.3.6. Obtención de resultados

Finalmente, el último paso de la aplicación del SEPIP es la obtención de resultados, una vez recolectados todos los datos del conjunto de inversiones. Estos datos se recabaron mediante un formulario en Excel, el cual fue completado por el representante de la entidad solicitante. Para acceder a información detallada sobre cada una de las inversiones, se puede consultar el Anejo 2. Además, considerando la aplicación MIVES Sorting, el mismo representante generó una ficha complementaria referida a una inversión “ideal”, con unos datos que marcan los umbrales mínimos a los que las inversiones analizadas deben llegar para obtener la etiqueta de excelencia en los respectivos requerimientos. A esta inversión ficticia, que se detalla en el Anejo 2, se le asigna un IN = 2.5 (el 50%).

A continuación, se presenta el proceso de obtención de resultados y su análisis, organizado siguiendo la secuencia de cumplimiento de las necesidades de la entidad (§ 8.3.2). En primer lugar, se proporciona información previa esencial para iniciar el proceso. Luego, se calculan los valores del IN y de MIVES Extendido de cada inversión (i y ii). Posteriormente, se evalúa la obtención de las etiquetas de excelencia (iii) basadas en los resultados de las inversiones. Finalmente, se realiza un análisis del riesgo de implementación debido a la incertidumbre (iv).

Información previa

En primer lugar, es necesario recolectar información técnica sobre la CET y el peso del árbol jerárquico de MIVES Extendido. Para el cálculo de la CET, se requiere evaluar la renta media, la población y la inversión durante los últimos 8 años de cada uno de los 18 barrios de Manresa. Si bien en la renta media y la población se aplican valores exactos obtenidos a través del representante, los datos relativos a la inversión por barrio deben extrapolarse a través de los documentos de “Estado de ejecución de gastos del Ayuntamiento de Manresa”. Debido a la gran cantidad de datos contenidos en estos documentos, se lleva a cabo una aproximación basada en: (i) eliminar toda inversión que sea inferior a 5,000 euros, (ii) eliminar toda inversión cuya descripción no aclara en qué barrio exacto (o barrios, si fuera aplicada a más de uno) ha sido aplicada, (iii) eliminar toda inversión autorizada pero no dispuesta, descartando así posibles duplicados. Consecuentemente, se obtienen los valores de cálculo de la CET mostrados en la Tabla 8.19.

Tabla 8.19 – Valores de cálculo de la CET.

Barrios	Inversión 8 años	Población	Renta
Barri Antic	1.487.833	4.566	10.410
Balconada	10.091	1.890	11.787
Cal Gravat	0	1.554	16.180
Carretera de Santpedor	2.101.256	13.169	14.581
Escodines	2.455.467	5.587	11.296
Font dels capellans	0	2.446	11.547
Guix - Pujada Roja	1.384.986	1.039	13.451
Farreres - Suanya - Comtals - Santa Caterina - l'Oller - Guia	1.227.163	1.044	14.111
Mion - Puigberenguer - Miralpeix	935.860	4.989	13.725

Pare Ignasi Puig	75.000	1.065	9.123
Passeig i rodalies	607.796	6.141	15.347
Plaça Catalunya - Barriada Saldes	445.915	7.484	13.592
Poble Nou	989.100	5.953	15.674
Sagrada Família	2.535.424	7.669	12.418
Sant Pau	0	514	10.676
Valldaura	1.541.216	6.740	11.981
Vic - Remei	12.522.396	6.264	12.068
Viladordis	1.143.706	772	15.174

Como puede observarse, hay algunos barrios en los que en los 8 últimos años no se ha llevado a cabo ninguna inversión. Debe denotarse que es posible que estos datos no sean totalmente exactos, al no tener información suficiente relativa sobre el barrio de implementación de las inversiones descartadas.

En lo referente al peso del árbol jerárquico de MIVES Extendido, hay valores técnicos que son designados por el representante. Estos valores, mostrados en la Tabla 8.20, se agregan a los pesos definidos por los actores de decisión (ver ecuación 8.30), obteniendo así la asignación de importancia del árbol jerárquico mostrada en la Figura 8.16.

Tabla 8.20 – Valores técnicos asignados por el representante.

Procedencia	Variable	Valor
Criterio Inversión	CUA	60%
	COM	40%
Criterio Impacto económico	RED	40%
	REC	60%
Criterio impacto en entorno	CLT	50%
	ACS	50%
Elementos del IN: DIZ	α_1	50%
	α_2	50%
Elementos de MIVES: COM	δ_1	50%
	δ_2	50%
Elementos de MIVES: CPT	ϵ_1	10%
	ϵ_2	50%
	ϵ_3	40%

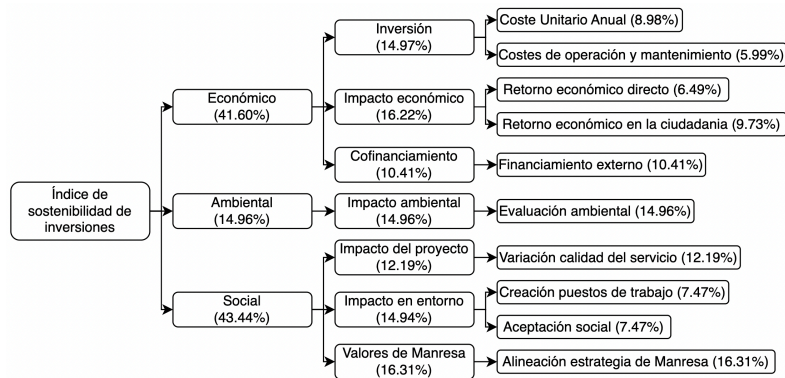


Figura 8.16 –Pesos del árbol Jerárquico de MIVES Extendido con los pesos de sus elementos.

Cálculo del IN

Con la información previa presentada, se procede al cálculo del IN de cada una de las inversiones propuestas. Para ello, se calculan los valores del DIZ y la CET de cada barrio, mostrados en la Tabla 8.21, mediante el proceso definido en la § 8.3.3 y los datos de la Tabla 8.19.

Tabla 8.21 – Valores del DIZ y de la CET por barrio.

Barrios	DIZ	CET
Barri Antic	0.922	4.612
Balconada	0.999	4.997
Cal Gravat	1.000	5.000
Carretera de Santpedor	0.865	4.324
Escodines	0.863	4.315
Font dels capellans	1.000	5.000
Guix - Pujada Roja	0.904	4.518
Farreres - Suanya - Comtals - Santa Caterina - l'Oller - Guia	0.911	4.553
Mion - Puigberenguer - Miralpeix	0.937	4.685
Pare Ignasi Puig	0.996	4.982
Passeig i rodalies	0.955	4.776
Plaça Catalunya - Barriada Saldes	0.971	4.856
Poble Nou	0.926	4.628
Sagrada Família	0.849	4.245
Sant Pau	1.000	5.000
Valldaura	0.910	4.552
Vic - Remei	0.263	1.313
Viladordis	0.910	4.550

Es notable la existencia de tres barrios (Cal Gravat, Font dels Capellans, Sant Pau) con el máximo valor de la CET, mientras que uno de ellos (Vic – Remei) se acerca al mínimo. Estos hechos se explican debido a la asignación de inversiones por barrio durante los últimos 8 años, pues su valor en el DIZ de traslada a la CET mediante una ecuación lineal.

Mediante estos datos y la información de cada una de las inversiones, se calculan los valores de los elementos del IN de la Tabla 8.22. Estos valores se agregan utilizando los pesos asignados por los actores de decisión (ver ecuación 8.29) para encontrar el IN de cada inversión, mostrado en la misma tabla.

Tabla 8.22 – Valores de IN por inversión.

	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆
CET	1.313	1.313	4.776	4.315	4.315	4.315
PPA	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Rel	3.000	4.000	4.000	2.000	2.000	4.000
CSA	3.333	2.000	2.000	3.667	2.000	5.000
SSA	2.000	2.000	2.000	0.000	2.000	0.000
EsI	2.000	2.000	0.000	1.000	1.000	1.000
IN	2.927	2.959	3.283	2.785	2.895	3.394

Cálculo de MIVES Extendido

Conociendo el IN de cada inversión y sus datos (ver Anejo 2), se aplican los indicadores desarrollados en la § 8.3.4 para obtener los resultados mostrados en la Tabla 8.23. Esta tabla contiene el valor final, no ponderado, de cada inversión en cada uno de los indicadores.

Tabla 8.23 – Valores de MIVES Extendido obtenidos por cada inversión en cada indicador.

	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆
CUA	0.831	0.000	0.758	0.954	0.505	0.262
COM	0.312	0.435	0.730	0.513	0.527	0.672
RED	0.717	0.229	0.253	0.570	0.224	0.874
REC	0.910	0.910	0.910	0.910	0.910	0.910
FEI	0.816	0.622	0.289	0.909	0.233	0.972
EA	0.813	0.957	0.987	0.957	0.813	0.101
VCS	0.618	0.773	0.630	0.500	0.647	0.520
CPT	0.825	0.832	0.495	0.431	0.763	0.906
AS	1.000	1.000	0.800	0.800	0.800	1.000
AEM	0.863	0.844	0.850	0.713	0.556	0.633

Estos valores se agregan utilizando los pesos mostrados en la Figura 8.16, obteniendo así la lista de priorización I₁ (“Anónima”, con 0.787 de IS) > I₄ (“Torre Lluvià”, con 0.749 de IS) > I₃ (“Calle Guimerà”, con 0.707 de IS) > I₂ (“Fábrica Nueva”, con 0.706 de IS) > I₆ (“Pont Nou II”, con 0.634 de IS) > I₅ (“Nuevo Congost”, con 0.612 de IS) que satisface la primera necesidad de la entidad solicitante. Sin embargo, para cubrir la segunda necesidad, es necesario dividir el índice final agregado en sus valores de requerimiento económico, ambiental y social, para poder analizar y comparar detalladamente el impacto de cada una de las inversiones. En la Figura 8.17, se muestra esta división de valor por requerimiento, añadiendo además el IN de cada inversión.

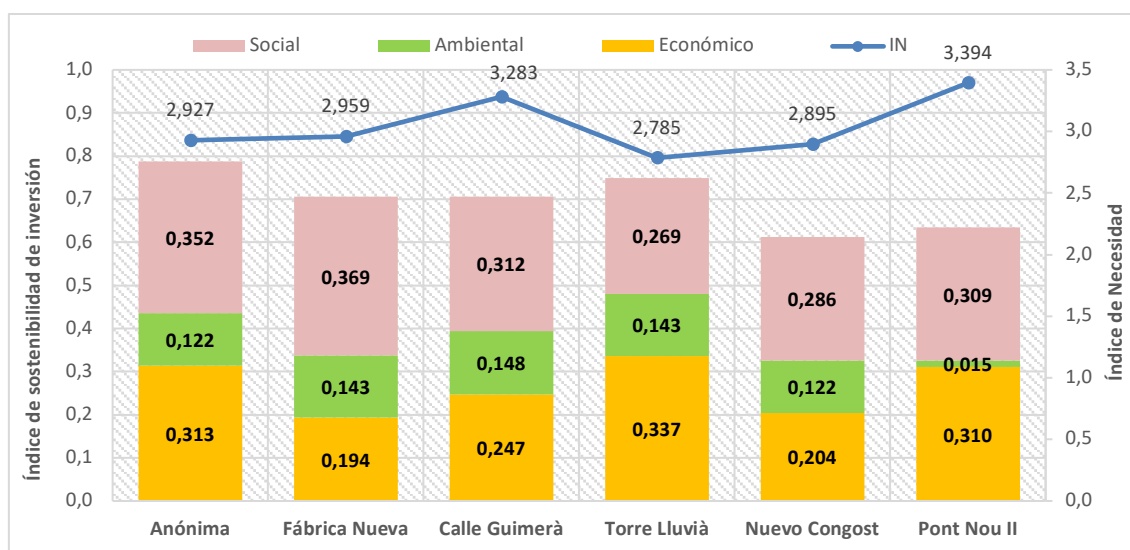


Figura 8.17 – Resultados detallados de la aplicación del SEPIP.

Se observa que todas las inversiones analizadas tienen índices de necesidad significativos para la ciudad de Manresa, con valores superiores al valor medio (2.5) que

oscilan entre 2.785 y 3.394. Esto indica que todas son inversiones importantes para abordar diversas problemáticas o necesidades en la comunidad, lo que se alinea con la tipología de alternativas que la entidad solicitante presentó: inversiones que ya han sido ampliamente debatidas y demandadas por múltiples grupos sociales. De entre todos los IN, se destacan los de "Pont Nou II" (3.394) y la "Calle Guimerà" (3.283), que superan por más de un 10% a todas las otras inversiones. Sin embargo, estos valores discrepan de los obtenidos mediante MIVES Extendido.

El caso más claro es el de la inversión "Pont Nou II", con el mayor índice de necesidad, pero únicamente en quinta posición de priorización. Aunque ha obtenido el tercer mayor rendimiento en el requerimiento económico, y un muy buen rendimiento en el requerimiento social, ha sido decisivo su bajo desempeño en el requerimiento ambiental. El principal motivo de este hecho ha sido el uso de la función de valor negativa, que ha sustraído valor al índice final. Este análisis se ha llevado a cabo en la fase de conceptualización de inversiones, lo que sugiere que se deberían considerar estrategias para mejorar significativamente su impacto ambiental. Si el proyecto se presentara teniendo en cuenta estos hallazgos, es altamente probable que pueda alcanzar valores que lo sitúen en la tercera posición de la lista de priorización, aumentando también su sostenibilidad a largo plazo.

Menos pronunciado es el caso de la "Calle Guimerà", que destaca por su sólido rendimiento en cuanto a requerimientos ambientales, donde lidera la clasificación. Sin embargo, su posición en la lista de priorización se ve afectada por su impacto económico relativamente bajo. En contraste, su impacto social es considerable, lo que le otorga la tercera posición en esta dimensión. Es importante señalar que esta discrepancia entre el alto requerimiento ambiental y el bajo impacto económico sugiere que, aunque la inversión puede tener beneficios significativos para el medio ambiente, su viabilidad económica podría ser un desafío. Esto plantea la necesidad de considerar estrategias adicionales para mejorar su rentabilidad económica sin comprometer su positivo impacto ambiental.

Por otro lado, resulta interesante que las inversiones "Anónima" y "Torre Lluvià" hayan obtenido las dos primeras posiciones en la lista de priorización, aún con INs poco destacados (cuarto y último, respectivamente). Este hecho indica que estas inversiones han logrado un equilibrio muy favorable entre los diferentes requerimientos, con valores medios-altos que las ha impulsado en la lista de priorización. Esto las posiciona como inversiones altamente atractivas y sugiere que están alineadas con las metas y necesidades de la entidad solicitante, la comunidad y el entorno ambiental.

Muy similar es el caso de "Fábrica Nueva", que se posiciona como cuarta inversión a priorizar. Aun con valores ambientales muy similares, se destaca una notable disminución en el requerimiento económico. Lo que le ha permitido mantenerse en esa posición en la lista de priorización son sus valores sociales, que muestran el mayor valor entre todas las inversiones evaluadas. Esta fortaleza ha contrarrestado la disminución en el requerimiento económico, lo que la convierte en una inversión atractiva desde una perspectiva global.

Finalmente se encuentra el “Nuevo Congost”, una inversión que se posiciona como última priorización. Si bien tiene unos valores ambientales muy similares a otras inversiones, en los requerimientos económico y social ha obtenido valores relativamente mediocres en comparación con las otras inversiones, ocupando la penúltima posición en ambos casos. En este caso, este proyecto parece no destacar en estos aspectos en particular, lo que lo coloca en una posición de menor prioridad en la lista de inversiones.

Etiquetas de excelencia

Para evaluar si las inversiones tienen impactos sobresalientes y abordar así la tercera necesidad de la administración, es esencial determinar el valor mínimo que una inversión debe alcanzar en un requerimiento para que se clasifique como un impacto excelente. Por ello, se aplica el modelo desarrollado utilizando los datos contenidos en la ficha de la inversión ideal (ver Anejo 2), obteniendo así el umbral económico (0.299), el ambiental (0.143) y el social (0.317). Estos umbrales son comparados con los valores obtenidos por cada inversión (ver Figura 8.17), asignando así las etiquetas de excelencia mostradas en la Tabla 8.24.

Tabla 8.24 – Etiquetas de excelencia para cada inversión.

	Excelencia económica	Excelencia ambiental	Excelencia social
I ₁	✓	✗	✓
I ₂	✗	✓	✓
I ₃	✗	✓	✗
I ₄	✓	✓	✗
I ₅	✗	✗	✗
I ₆	✓	✗	✗

La gran cantidad de etiquetas de excelencia es destacable, debido a que las 6 inversiones propuestas son actuaciones que ya han sido debatidas por su alto impacto en la ciudad. En análisis con un conjunto de inversiones más amplio, y menos esenciales, es posible que la cantidad de etiquetas sea considerablemente menos.

Riesgo de implementación debido a la incertidumbre

Finalmente, el representante facilitó los valores mínimos, más probables y máximos de cada inversión, para cubrir así la última necesidad de la entidad solicitante: conocer el riesgo de implementación de inversiones en base a modificaciones en su coste. Estos valores, mostrados en la Tabla 8.25, indican la posibilidad de fluctuación del coste de cada alternativa dentro de rangos específicos, hecho recurrente en anteriores proyectos municipales.

Tabla 8.25 – Posibles valores de coste económico por alternativa.

	Mínimo	Más probable	Máximo
I ₁	3,600,000 €	4,000,000 €	7,200,000 €
I ₂	42,300,000 €	47,000,000 €	79,900,000 €
I ₃	4,500,000 €	5,000,000 €	7,000,000 €
I ₄	900,000 €	1,000,000 €	1,300,000 €
I ₅	7,200,000 €	8,000,000 €	11,200,000 €
I ₆	22,500,000 €	25,000,000 €	32,500,000 €

Utilizando estos datos se ejecutan 100,000 simulaciones de Monte Carlo, método incorporado en el propio SEPIP. Estas simulaciones generan valores aleatorios de coste económico que siguen una distribución triangular, que se introducen al cálculo del indicador CUA. Al combinar todos los indicadores siguiendo la metodología previamente explicada, se obtienen las distribuciones de los índices de sostenibilidad mostradas en la Figura 8.18.

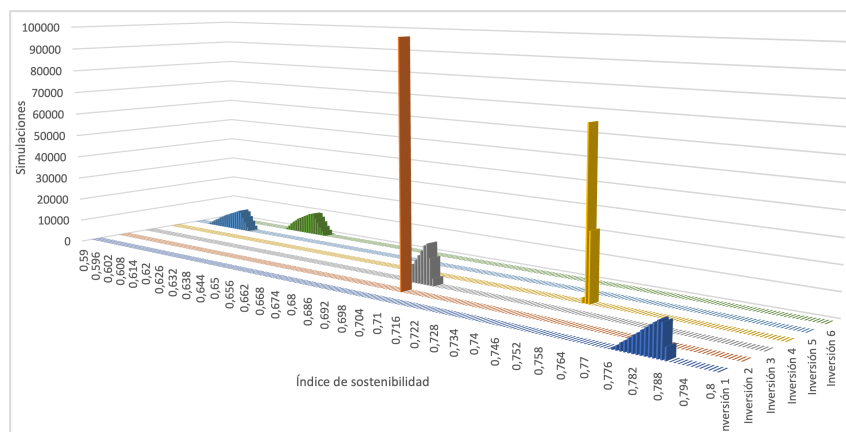


Figura 8.18 –Distribuciones de probabilidad de los índices de sostenibilidad.

Como puede observarse, la separación existente en las distribuciones de probabilidad de las inversiones I_1 (“Anónima”, de 0.775 a 0.789 de IS), I_5 (“Nuevo Congost”, de 0.597 a 0.616 de IS) e I_6 (“Pont Nou II”, de 0.622 a 0.640 de IS) asegura que no existen conflictos en su posición por riesgo. Similar es el caso de la I_4 (“Torre Lluvià”, de 0.748 a 0.749 de IS), también aislada pero cuya distribución es notablemente distinta. Esta forma proviene de una baja fluctuación económica, que añadido al bajo coste de la inversión provoca una baja oscilación del indicador CUA, que se enmarca únicamente en tres posibles valores.

Por el contrario, sí que se denota una superposición de distribuciones en las inversiones I_3 (“Calle Guimerà”) e I_2 (“Fábrica Nueva”), que ocupan el tercer y cuarto lugar en la lista de priorización con valores extremadamente similares, respectivamente. Si bien la I_3 tiene una distribución con el mínimo en 0.697 de IS y el máximo en 0.708 de IS, la I_2 tiene todas sus probabilidades enmarcadas en 0.706 de IS. Este suceso proviene del alto coste asociado a esta inversión, pues todo su rango de posibles en valores genera un índice CUA de 0. Por tanto, en cualquier situación posible, la agregación final de los indicadores compone un valor exacto.

Ante este hecho, debe mostrarse el riesgo asociado a seguir el orden de priorización propuesto, que anticipa I_3 a I_2 . Analizando las distribuciones obtenidas, existe el 17.07% de probabilidad que I_3 sea igual a I_2 (17,066 simulaciones, con un valor de 0.706) y el 14.49% de probabilidad que I_3 sea superior a I_2 (14,491 simulaciones, con un valor superior a 0.706). Por tanto, aunque la lista anticipe I_3 a I_2 , hay que considerar que I_2 tiene una probabilidad del 68.44% (68,443 simulaciones de 100,000) de superar a I_3 , lo que puede promover que los decisores opten por intercambiar sus posiciones.

8.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

A lo largo de este capítulo se ha presentado el SEPIP, demostrando cómo se agregan las contribuciones desarrolladas y los métodos seleccionados en capítulos anteriores para generar su algoritmo. Además, el SEPIP se ha aplicado a un caso estudio, adaptándolo a las necesidades reales de una administración pública con el fin de analizar y validar su rendimiento. Durante este proceso de adaptación y aplicación, se han identificado varios puntos remarcables:

- En primer lugar, es importante destacar que el uso de los Factores determinantes ha sido esencial para informar y contextualizar a los responsables de la entidad solicitante sobre los aspectos críticos que debían considerarse, ayudando a seleccionar los criterios e indicadores adecuados para el modelo de cálculo.
- En segundo lugar, la capacidad del SEPIP para considerar indicadores con sistemas de atributos ha sido muy apreciada y agradecida por la entidad solicitante. Dado que todas las inversiones del caso de estudio se encuentran en la fase de conceptualización, se ha generado un escenario de incertidumbre. Sin embargo, gracias al sistema de atributos y su capacidad para aproximar valores, se ha evitado que el representante evada el uso de ciertos indicadores. Es importante destacar que, en en fases más avanzadas, estas aproximaciones serán redefinidas con valores más precisos, utilizando el sistema de membresía de atributos, simulaciones de Monte Carlo o datos exactos.
- En tercer lugar, ha quedado manifiesta la importancia del uso de funciones de valor negativas. Al conocer su existencia y utilidad, la entidad solicitante solicitó explícitamente la implementación de estas funciones en ciertos indicadores, provocando un impacto significativo en la priorización de inversiones.

9. CONCLUSIONES

9.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen las principales conclusiones que se derivan de los diferentes estudios realizados a lo largo de esta Tesis Doctoral. Estas conclusiones responden al cumplimiento de los objetivos, tanto generales como específicos, presentados en el Capítulo 1 (§ 1.2), que han guiado el desarrollo del presente estudio.

Dichos objetivos consisten en el diseño y aplicación de un método de priorización de inversiones especialmente planteado para la administración pública, adaptable a cualquier escenario y capaz de cubrir todas sus necesidades. En este sentido, se han abordado aspectos de gran interés en relación con la consideración de múltiples partes interesadas en la toma de decisiones, los métodos más adecuados para la consideración de incertidumbre en los valores de cálculo, las técnicas de gestión de resultados para su optimización o clasificación, y la introducción de funciones de valor negativas que permitieran representar con mayor exactitud las preferencias de la administración. Con ello se pretende superar las barreras de adopción e implementación de sistemas de priorización de inversiones públicas que existen en la actualidad.

Por último, se presentan algunas sugerencias para trabajos futuros con los que dar continuidad a las líneas de investigación abiertas en esta Tesis Doctoral.

9.2. CONCLUSIONES

A lo largo de esta Tesis Doctoral, se ha desarrollado y aplicado el "Sistema de Evaluación y Priorización de Inversiones Públicas" (SEPIP). Este sistema se ha generado al combinar tres bloques de desarrollo científico diseñados para abordar las necesidades de la administración pública. Posteriormente, se ha aplicado el SEPIP a un caso de estudio real. Este proceso ha permitido alcanzar tanto los objetivos generales como los específicos delineados en el Capítulo 1 (§ 1.2). A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas de este proceso, organizadas por bloques y capítulo por capítulo.

Los errores administrativos recurrentes en la selección de inversiones mostrados en el Bloque I (**Capítulo 2**), han demostrado la necesidad de desarrollar un sistema de evaluación y priorización de inversiones que cubra todas las necesidades de la administración pública. En este mismo capítulo, y tras la exposición de los principales procesos de obtención y asignación de fondos públicos utilizados por la administración, se ha seleccionado el método MCDM MIVES como base de cálculo para el SEPIP. Sin embargo, tras el análisis de las necesidades de la administración, se ha llegado a la conclusión de que MIVES no posee todas las características necesarias para abordarlas. Consecuentemente, se han definido 5 propiedades que deben desarrollarse e implementarse en el SEPIP:

- El SEPIP debe analizar las técnicas que su método directriz, MIVES, utiliza en la consideración de múltiples actores en el proceso de decisión. El uso prácticamente unánime del método AHP no asegura que no existan decisiones unilaterales o injustas con el conjunto de actores.
- El SEPIP debe contener un procedimiento de gestión de incertidumbre que cubra todo el espectro de incerteza ligado a la inversión pública, así como sus posibles limitaciones de información. Paralelamente, se debe considerar la incertidumbre en la opinión de los actores del proceso de decisión.
- El SEPIP debe generar resultados tanto en forma de un ranking numérico de priorización que ordene las inversiones, como en forma de grupos clasificados según su nivel de impacto.
- El SEPIP debe ser capaz de generar una combinación óptima de inversiones ligada a un presupuesto cerrado, permitiendo así que la administración maximice el impacto generado con los recursos de los que dispone.
- El SEPIP debe ser capaz de considerar efectos adversos en sus indicadores, dando así herramientas a la administración para sancionar aquellas inversiones que muestren impactos negativos significativos.

La primera de estas propiedades se desarrolla en el Bloque II. El **Capítulo 3** presenta un nuevo esquema de clasificación de métodos de toma de decisión en grupo, el cual utiliza para comparar y seleccionar la tipología de técnica idónea para el SEPIP. Sin embargo, mediante una revisión literaria exhaustiva de las técnicas elegidas (asignación de peso a los decisores), se concluye que ningún método existente es implementable al SEPIP por las siguientes razones:

- Los métodos existentes carecen de un fundamento social y teórico en sociología, lo que puede dar lugar a decisiones injustas que no garantizan la equidad, la igualdad y la imparcialidad entre los tomadores de decisiones. Dado que el SEPIP se propone como un método para la administración pública, esta deficiencia es de suma importancia.
- La mayoría de los métodos existentes no tienen la capacidad de considerar la influencia previa de los actores partícipes de la decisión. En el contexto de la administración pública, donde deben coordinarse tanto la propia administración como agentes menores (por ejemplo, asociaciones empresariales o ciudadanas), esta carencia es de gran relevancia.
- La mayoría de los métodos existentes necesita el conocimiento de las inversiones que se deben analizar. Sin embargo, el SEPIP aspira a ser un método capaz de ser aplicado tanto en fases avanzadas de inversiones como en fases de concepción, dónde existe ausencia de conocimiento de inversiones.

Estas conclusiones, son la base del **Capítulo 4**, que desarrolla y presenta la metodología “Integración Jerárquica de Valores y Evaluaciones bajo Restricciones Sociales” (HIVES, por sus siglas en inglés). Este nuevo método, basado en teorías sociales y matemáticas estadísticas, ha demostrado maximizar la satisfacción de las partes interesadas respecto a métodos similares, a los que supera en rendimiento por más de un 20%. Además, HIVES obtiene una solución objetiva, justa y ética, pues dos de sus características internas, los axiomas sociales y la división de componentes, aseguran la equidad, imparcialidad y neutralidad en el proceso de decisión.

El Bloque III desarrolla la segunda, tercera y cuarta propiedad, referentes a la gestión de incertidumbre y a la gestión resultados mediante su clasificación y optimización, respectivamente. El **Capítulo 5** expone los principales métodos de gestión de incertidumbre que se utilizan en los procesos de análisis multicriterio, comparándolos con los escenarios que debe afrontar la administración pública. Esta comparación permite generar el proceso de gestión de incertidumbre mostrado en la Figura 9.1, el cual está formado por 3 métodos que se eligen en base al nivel de conocimiento de las inversiones. Cuando se dispone de conocimiento completo, se emplean datos precisos. No obstante, a medida que aumenta la incertidumbre en los valores de los indicadores, se pueden utilizar el método de Monte Carlo, el método de atributos con base lingüística y membresía, y el método de atributos con base lingüística, en ese orden.

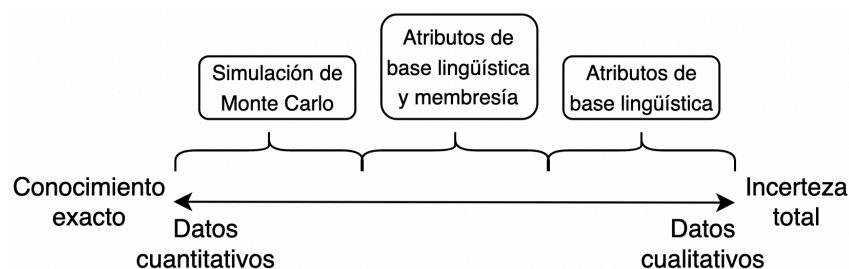


Figura 9.1 –Proceso de gestión de incertidumbre en indicadores del SEPIP y sus 3 métodos.

Además, la incertidumbre referida a evaluaciones conlleva a que en este capítulo se desarrolle HIVES Intervalos, la extensión del método HIVES para situaciones en la que los actores de decisión quieran evaluar los elementos mediante intervalos. El uso de esta tipología de datos asegura que el SEPIP mantenga un nivel óptimo de comprensibilidad y accesibilidad para todos los actores que participan en el proceso de toma de decisión, evitando situaciones en las que sea necesario requerir de conocimiento experto.

Por otro lado, el **Capítulo 6** resuelve la gestión de resultados, tanto en su clasificación como optimización, desarrollando e implementando técnicas que persiguen unos objetivos opuestos. En el caso de la clasificación, se pretende catalogar las inversiones no por un orden numérico exacto, sino asignarles una categoría, asegurando un cierto margen de maniobra a la administración pública. Por el contrario, la optimización busca detallar la combinación exacta de inversiones para maximizar el índice de inversiones agregado, por lo que la administración no cuenta con margen de maniobra en su selección.

En la sección de clasificación, una introducción a los principales sistemas de categorización de inversiones destaca la necesidad de desarrollar una nueva técnica que pueda complementar el método directriz de evaluación utilizado por el SEPIP. Para abordar esta necesidad, se presenta MIVES Sorting, que se integra al uso y la aplicación de MIVES. Este nuevo método no solo asigna una categoría a cada inversión basada en su índice final, sino que también permite la creación de un sistema de umbrales que funcionan como etiquetas. Estas etiquetas resaltan características de especial interés en cada inversión, ya sea de forma positiva o negativa, mejorando la comunicación de resultados para el público no experto.

De manera similar, la sección de optimización inicia con una introducción a los principales métodos de optimización de resultados. Sin embargo, dado que la principal necesidad de la administración pública en este contexto es la optimización en función de un presupuesto cerrado o limitado, se concluye que el método Knapsack sea implementado en el SEPIP.

Debe destacarse que, en ambos tipos de gestión de resultados, la incertidumbre referente a la aplicación de Monte Carlo se ha obviado. El principal motivo de esta decisión ha sido la consideración que la información de probabilidades de superación y riesgos de selección de inversiones no tienen un componente esencial en la clasificación y optimización, siendo así informaciones complementarias al resultado final. En otras palabras, para facilitar la comunicación de resultados al público no experto, los resultados de clasificación u optimización se acompañarán con la información de riesgo obtenida mediante Monte Carlo.

Finalmente, el Bloque IV cierra el conjunto de propiedades de desarrollo científico del SEPIP mediante el **Capítulo 7**, que da solución a los efectos adversos en los indicadores. Una vez planteada la importancia de considerar los posibles impactos negativos en las inversiones, y tras examinar los procedimientos actuales para abordar este problema, se concluye que ninguna técnica o método existente es adecuado para su implementación en el SEPIP. Consecuentemente, se desarrolla MIVES Extendido, una extensión del método utilizado como base de cálculo del SEPIP que permite la

incorporación de funciones de valor negativas en sus indicadores y posibilita la reducción del índice agregado. Esta mejora amplía significativamente las opciones disponibles para los tomadores de decisiones en los métodos multicriterio, un avance fundamental que les permite representar sus necesidades y preferencias con mayor libertad y precisión. Además, se espera que la reducción del índice final tenga un efecto psicológico significativo en el SEPIP cuando este se aplique a procesos de selección de inversiones públicas con propuestas presentadas por empresas externas. Estas empresas, al ser conscientes de que sacrificar indicadores a favor de otros puede resultar en la disminución de su resultado final, pueden estar más motivadas para presentar inversiones más equilibradas y alineadas con los objetivos de la administración.

Una vez desarrollados y seleccionados todos los componentes que conforman el SEPIP, este es presentado y aplicado en el Bloque V. En el **Capítulo 8** se expone el esquema de aplicación del SEPIP (ver Figura 9.2) con todos sus elementos, detallando el Índice de necesidad, para homogeneizar conjuntos de inversión heterogéneos, y los Factores determinantes, sus características principales de evaluación.

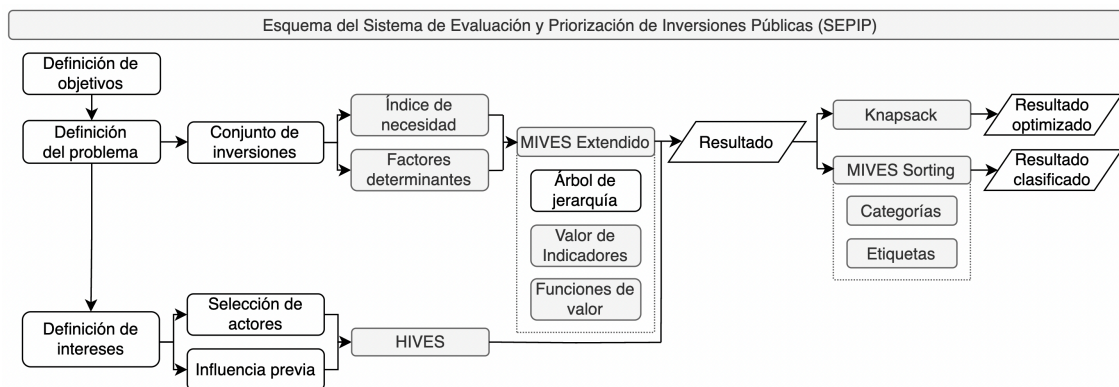


Figura 9.2 –Esquema del SEPIP.

Posteriormente, este capítulo presenta la adaptación y aplicación del SEPIP a un caso de estudio real en la ciudad de Manresa en colaboración con el Ayuntamiento local, logrando así una transferencia de conocimientos de la universidad a la sociedad. A través de una exposición detallada del proceso de adaptación y los resultados alcanzados, se ha obtenido información de gran relevancia para esta Tesis Doctoral. Esta información se relaciona directamente con las propiedades desarrolladas para el SEPIP y ha servido para validar los hallazgos presentados en cada capítulo:

- MIVES ha demostrado ser un método directriz eficaz. Gracias a la jerarquización de sus elementos y la capacidad de convertir los valores de los indicadores en índices de satisfacción, la administración ha comprendido fácilmente el proceso de cálculo multicriterio y los objetivos a plantear.
- El método HIVES, desarrollado en esta Tesis Doctoral, ha permitido no solo incorporar todas las opiniones de manera equitativa y justa, sino también aplicar un sistema de gestión de influencia previa que refleja la realidad política existente en la administración. Si bien HIVES Intervalos también se presentó como

posibilidad, los actores de decisión decidieron unánimemente utilizar valores exactos.

- El sistema de gestión de incertidumbre del SEPIP, que comprende Monte Carlo, atributos de base lingüística con membresía y atributos de base lingüística, ha sido largamente agradecido por la administración. Su existencia ha disipado múltiples dudas sobre la viabilidad de ciertos indicadores, incentivando evaluaciones que en otros casos hubieran sido desestimadas.
- Si bien sólo se ha utilizado el sistema de MIVES Sorting para la generación de etiquetas, la administración pública se ha mostrado muy interesada en el sistema de clasificación y el sistema de optimización. Se ha abierto la puerta a futuras aplicaciones del SEPIP aplicando estas características.
- Durante el proceso de adaptación del SEPIP, se ha demostrado la necesidad de contar con herramientas de penalización para aquellas inversiones que puedan tener efectos adversos en ciertos indicadores. En dos casos, la propia administración solicitó explícitamente el uso de funciones de valor negativas, validando el desarrollo de MIVES Extendido. La flexibilidad proporcionada por la función de valor negativa ha permitido que las necesidades y expectativas de la administración quedaran plenamente reflejadas en el SEPIP.
- Durante el proceso de adaptación del SEPIP, la administración ha resaltado la importancia del Índice de Necesidad, que ha permitido la comparación de inversiones heterogéneas, y de los Factores determinantes, utilizados como guía en la creación de un árbol jerárquico completamente representativo.

9.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El trabajo realizado en esta Tesis Doctoral y los resultados obtenidos representan un avance significativo para establecer las bases de una priorización más transparente, eficiente y coherente de las inversiones públicas, alineadas con los objetivos a largo plazo de la administración. A través de la creación del SEPIP y su aplicación en un caso de estudio real, se allana el camino para su uso recurrente no solo en la toma de decisiones de inversión en obras civiles, sino en cualquier escenario en el que sea necesario priorizar inversiones públicas. Sin embargo, aún existen varias cuestiones sobre las que se debe incidir en futuras investigaciones, por lo que se propone:

- Desarrollar nuevas extensiones de HIVES, permitiendo así su adaptación a otras tipologías de datos, como números borrosos o variables lingüísticas.
- Analizar y mejorar el sistema de gestión de incertidumbre, introduciendo, si fuese necesario, nuevas técnicas al mismo. Sin embargo, es de especial interés que se considere el punto de vista de la administración pública, evitando metodologías que pudieran abrumar a personal no experto.
- Siguiendo la misma línea, analizar y ampliar MIVES Sorting para abordar la incertidumbre, creando una guía de aplicación para situaciones en las que tanto las categorías generadas como las inversiones analizadas presentan incertidumbre.

- Proponer y analizar la viabilidad de introducir un sistema de Monte Carlo en las propias licitaciones, siendo necesario su uso en las propuestas emitidas por grupos empresariales externos y posibilitando así el uso de la optimización estocástica de Monte Carlo.
- Aplicar consecutivamente el SEPIP en otros casos reales, ampliando así la base de conocimiento de sus rendimientos y posibilidades.
- La exploración de otras tipologías de inversiones con el objetivo de ampliar los conjuntos de Criterios Fundamentales disponibles. Además, se propone estudiar la heterogeneidad en escenarios con múltiples tipologías, lo que permitirá desarrollar conjuntos de Criterios Fundamentales adaptados a situaciones específicas en las que se presenten diversas categorías de inversión.

10. FINAL CONCLUSIONS

10.1. INTRODUCTION

In this chapter, the main conclusions derived from the various studies conducted throughout this doctoral thesis are presented. These conclusions are in line with the fulfilment of both the general and specific objectives outlined in Chapter 1 (§ 1.2), which have guided the development of this study.

These objectives entail the design and implementation of a prioritization method for investments specifically tailored for the public administration, adaptable to any scenario, and capable of meeting all its needs. In this regard, aspects of great interest concerning the consideration of multiple stakeholders in decision-making, the most suitable methods for dealing with uncertainty in calculation values, techniques for managing results for optimization or classification, and the introduction of negative value functions to represent the administration's preferences more accurately have been addressed. The aim is to overcome the adoption and implementation barriers that currently exist in the field of public investment prioritization systems.

Finally, some suggestions for future work are provided to continue the lines of research opened up in this doctoral thesis.

10.2. CONCLUSIONS

Throughout this Doctoral Thesis, the "Public Investment Evaluation and Prioritization System" (SEPIP) has been developed and applied. This system has been generated by combining three blocks of scientific development designed to address the needs of the public administration. Subsequently, the SEPIP has been applied to a real case study. This process has allowed the achievement of both the general and specific objectives outlined in Chapter 1 (§ 1.2). Below, the conclusions obtained from this process are presented, organized by blocks and chapter by chapter.

The recurrent administrative errors in investment selection shown in Block I (**Chapter 2**) have demonstrated the need to develop an evaluation and prioritization system for investments that covers all the needs of the public administration. After presenting the main processes for obtaining and allocating public funds used by the administration, the MCDM MIVES method has been selected as the calculation basis for the SEPIP. However, after analysing the administration's needs, it has been concluded that MIVES does not possess all the necessary characteristics to address them. Consequently, five properties have been defined that must be developed and implemented in the SEPIP:

- SEPIP must scrutinize the techniques that its guiding method, MIVES, employs in considering multiple stakeholders in the decision-making process. The near-unanimous use of the AHP method does not guarantee the absence of unilateral or unfair decisions with respect to the ensemble of stakeholders.
- SEPIP must encompass an uncertainty management procedure that covers the entire spectrum of uncertainty linked to public investment, as well as potential information limitations. Simultaneously, uncertainty in the opinions of the decision process stakeholders must be considered.
- SEPIP must generate results in the form of both a numerical prioritization ranking that orders investments and groups classified according to their impact level.
- SEPIP must be capable of generating an optimal combination of investments linked to a finite budget, thereby enabling the administration to maximize the impact achieved with its available resources.
- SEPIP must be capable of considering adverse effects in its indicators, thereby providing the administration with tools to penalize investments showing significant negative impacts.

The first of these properties is developed in Block II. **Chapter 3** presents a new scheme for classifying group decision-making methods, which it uses to compare and select the appropriate type of technique for the SEPIP. However, through a comprehensive literature review of the selected techniques (assigning weights to decision-makers), it is concluded that no existing method is implementable in the SEPIP for the following reasons:

- Existing methods lack a social and theoretical foundation in sociology, which can lead to unfair decisions that do not guarantee equity, equality, and impartiality among decision-makers. Given that SEPIP is proposed as a method for public administration, this deficiency is of paramount importance.
- Most existing methods do not have the ability to consider the prior influence of decision-making participants. In the context of public administration, where coordination is necessary between the administration itself and smaller entities such as business associations or citizens, this deficiency is highly relevant.
- Most existing methods require knowledge of the investments to be analysed. However, SEPIP aspires to be a method that can be applied in both advanced stages of investments and in conceptual phases, where there is a lack of investment knowledge.

These conclusions form the basis of **Chapter 4**, which develops and presents the "Hierarchical Integration of Values and Evaluations under Social Constraints" (HIVES) methodology. This new method, based on social and statistical mathematical theories, has been shown to maximize stakeholder satisfaction compared to similar methods, outperforming them by more than 20%. Additionally, HIVES provides an objective, fair, and ethical solution, as two of its internal characteristics, social axioms and component division, ensure fairness, impartiality, and neutrality in the decision-making process.

Block III addresses the second, third, and fourth properties related to uncertainty management and result management through classification and optimisation, respectively. **Chapter 5** outlines the main uncertainty management methods used in multicriteria analysis processes, comparing them with the scenarios that public administration must face. This comparison leads to the development of the uncertainty management process shown in Figure 10.1, consisting of three methods chosen depending on the level of knowledge about the investments. When complete knowledge is available, precise data is used. However, as uncertainty in indicator values increases, the Monte Carlo method, the linguistic attribute and membership-based method, and the linguistic attribute-based method can be employed, in that order.

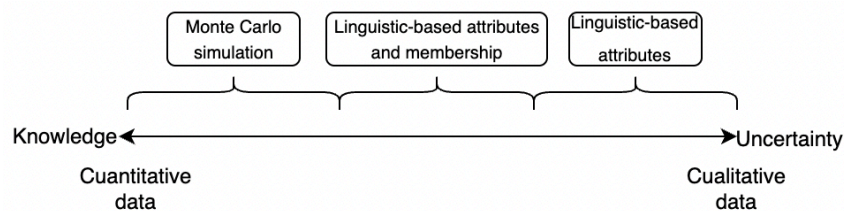


Figure 10.1 –SEPIP uncertainty management process.

In addition, uncertainty in evaluations leads to the development of HIVES Intervals in this chapter, an extension of the HIVES method for situations in which decision-makers want to evaluate elements using intervals. The use of this data type ensures that SEPIP maintains an optimal level of comprehensibility and accessibility for all participants in the decision-making process, avoiding the need for expert knowledge.

On the other hand, **Chapter 6** addresses result management, both in terms of classification and optimisation, by developing and implementing techniques that pursue opposing objectives. In the case of classification, the goal is not to rank investments with precise numerical orders but to assign them to categories, providing a certain degree of flexibility to the public administration. In contrast, optimisation aims to detail the exact combination of investments to maximise the aggregated investment index, leaving no room for discretion in selection by the administration.

In the classification section, an introduction to the main investment categorisation systems highlights the need to develop a new technique to complement the SEPIP's direct evaluation method. To address this need, MIVES Sorting is introduced, which integrates with the use and application of MIVES. This new method not only assigns a category to each investment based on its final index but also allows for the creation of a threshold system that functions as labels. These labels emphasise characteristics of particular interest in each investment, either positively or negatively, enhancing result communication for non-expert audiences.

Similarly, the optimisation section begins with an introduction to the main result optimisation methods. However, given that the primary need of the public administration in this context is optimisation based on a closed or limited budget, the Knapsack method is implemented in SEPIP.

It's worth noting that in both types of result management, uncertainty related to the application of Monte Carlo has been omitted. The main reason for this decision is the consideration that probability of surpassing and investment selection risk information does not have an essential component in classification and optimisation. Instead, to facilitate result communication to non-expert audiences, the classification or optimization results will be accompanied by risk information obtained through Monte Carlo.

Finally, Block IV completes the set of scientific development properties of SEPIP through **Chapter 7**, which addresses adverse effects on the indicators. After emphasising the importance of considering potential negative impacts on investments and examining current procedures for addressing this issue, it is concluded that no existing technique or method is suitable for implementation in SEPIP. Consequently, MIVES Extended is developed, an extension of the method used as the calculation basis for SEPIP, allowing the incorporation of negative value functions into its indicators and enables the reduction of the aggregate index. This enhancement significantly expands the options available to decision-makers in multi-criteria methods, a fundamental advancement that allows them to represent their needs and preferences with greater freedom and precision. Moreover, it is expected that the reduction in the final index will have a significant psychological impact on SEPIP when applied to public investment selection processes with proposals submitted by external companies. These companies, being aware that sacrificing indicators in favour of others may result in a decrease in their final outcome, may be more motivated to present investments that are more balanced and aligned with the administration's objectives.

Once all the components that make up SEPIP have been developed and selected, it is presented and applied in Block V. **Chapter 8** outlines the SEPIP application scheme (see

Figure 10.2) with all its elements, detailing the Need Index to homogenize heterogeneous investment sets and the Determining factors, their main evaluation characteristics.

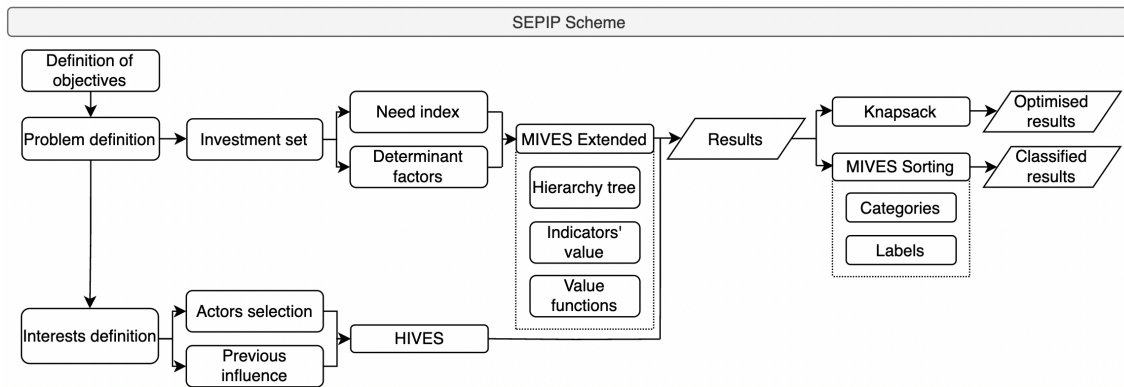


Figure 10.2 –SEPIP scheme with its elements.

Subsequently, this chapter introduces the adaptation and application of SEPIP to a real case study in the city of Manresa in collaboration with the local City Council, thereby achieving knowledge transfer from the university to society. Through a detailed exposition of the adaptation process and the results achieved, valuable information has been obtained for this Doctoral Thesis. This information is directly related to the properties developed for SEPIP and has been instrumental in validating the findings presented in each chapter:

- MIVES has proven to be an efficient guiding method. Through the hierarchy of its elements and the capability to transform indicator values into satisfaction indices, the administration has readily comprehended the multicriteria calculation process and its objectives.
- The HIVES method, developed in this Doctoral Thesis, has not only allowed for the equitable and fair incorporation of all opinions but has also applied a prior influence management system that reflects the existing political reality within the administration. While HIVES Intervals was also presented as an option, decision-makers unanimously chose to use exact values.
- The SEPIP's uncertainty management system, which encompasses Monte Carlo, linguistic attribute membership, and linguistic attribute base, has received extensive appreciation from the administration. Its existence has dispelled numerous doubts regarding the feasibility of certain indicators, encouraging assessments that might have been dismissed in other cases.
- Although only the MIVES Sorting system has been used for label generation, the public administration has shown a keen interest in both the classification and optimization systems. This has opened the door to future SEPIP applications incorporating these features.
- During the SEPIP adaptation process, the need for penalty tools for investments that may have adverse effects on certain indicators has been demonstrated. In two cases, the administration explicitly requested the use of negative value functions,

validating the development of MIVES Extended. The flexibility provided by the negative value function has allowed the administration's needs and expectations to be fully reflected in SEPIP.

- During the SEPIP adaptation process, the administration has highlighted the importance of the Index of Necessity, which has enabled the comparison of heterogeneous investments, and the Determining Factors, used as a guide in creating a fully representative hierarchical tree.

10.3. FUTURE PERSPECTIVES

The work carried out in this Doctoral Thesis and the results obtained represent a significant step forward in establishing the foundations for a more transparent, efficient, and coherent prioritization of public investments aligned with the administration's long-term objectives. Through the creation of SEPIP and its application in a real case study, the path is paved for its recurring use not only in investment decision-making for civil works but in any scenario where prioritizing public investments is necessary. However, there are still several issues that should be addressed in future research, and therefore, the following is proposed:

- Develop new extensions for HIVES, thereby allowing its adaptation to other data typologies such as fuzzy numbers or linguistic variables.
- Analyse and enhance the uncertainty management system, introducing new techniques if necessary. However, it is of particular interest to consider the perspective of the public administration, avoiding methodologies that might overwhelm non-expert personnel.
- In line with this procedure, analyse and expand MIVES Sorting to address uncertainty, creating a guide for situations where both the generated categories and analysed investments exhibit uncertainty.
- Propose and assess the feasibility of introducing a Monte Carlo system into procurement processes, making its use mandatory in proposals submitted by external business groups, thereby enabling the use of Monte Carlo stochastic optimization.
- Sequentially apply SEPIP in other real-life cases, thereby expanding the knowledge base regarding its performance and possibilities.
- Explore other typologies of investments with the goal of expanding the sets of Fundamental Criteria available. Furthermore, consider investigating heterogeneity in scenarios featuring multiple typologies, allowing for the development of Fundamental Criteria sets tailored to specific situations where diverse investment categories are involved.

BIBLIOGRAFÍA

- Abootalebi, S., Hadi-Vencheh, A., & Jamshidi, A. (2018).** An Improvement to Determining Expert Weights in Group Multiple Attribute Decision Making Problem. *Group Decision and Negotiation*, 27(2), 215–221. <https://doi.org/10.1007/s10726-018-9555-0>
- Adalsteinsson, E., & Toumi, M. (2013).** Benefits of probabilistic sensitivity analysis – a review of NICE decisions. *Journal of Market Access & Health Policy*, 1(1). <https://doi.org/10.3402/JMAHP.V1I0.21240>
- Aguado, A., Caño, A. del, de la Cruz, M. P., Gómez, D., & Josa, A. (2012).** Sustainability Assessment of Concrete Structures within the Spanish Structural Concrete Code. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(2), 268–276. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000419](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000419)
- AICCP-IC. (2019).** *Las obras y servicios públicos a examen.*
- Ajmal, M. M., Khan, M., Hussain, M., & Helo, P. (2017).** Conceptualizing and incorporating social sustainability in the business world. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 25(4), 327–339. <https://doi.org/10.1080/13504509.2017.1408714>
- Akadiri, Peter O. & Olomolaiye, P. O. (2012).** Development of sustainable assessment criteria for building materials selection. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 19(6), 666–687. <https://doi.org/10.1108/09699981211277568>
- Akram, M., Dudek, W. A., & Ilyas, F. (2019).** Group decision-making based on pythagorean fuzzy TOPSIS method. *International Journal of Intelligent Systems*, 34(7), 1455–1475. <https://doi.org/10.1002/int.22103>
- Alarcon, B., Aguado, A., Manga, R., & Josa, A. (2011).** A value function for assessing sustainability: Application to industrial buildings. *Sustainability*, 3(1), 35–50. <https://doi.org/10.3390/su3010035>
- Alberti, M. G., Galvez, J. C., Enfedaque, A., Carmona, A., Valverde, C., & Pardo, G. (2018).** Use of Steel and Polyolefin Fibres in the La Canda Tunnels: Applying MIVES for Assessing Sustainability Evaluation. *Sustainability*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/su10124765>

- Allahdadi, M., & Golestane, A. K. (2016).** Monte Carlo Simulation for Computing the Worst Value of the Objective Function in the Interval Linear Programming. *International Journal of Applied and Computational Mathematics*, 2(4), 509–518. <https://doi.org/10.1007/S40819-015-0074-2>
- Aloqeili, M. (2005).** On the characterization of excess demand functions. *Economic Theory*, 26(1), 217–225. <https://doi.org/10.1007/s00199-004-0507-3>
- Aly, S., & Vrana, I. (2008).** Evaluating the knowledge, relevance and experience of expert decision makers utilizing the Fuzzy-AHP. *Agricultural Economics*, 54(11), 529–535. <https://doi.org/10.17221/264-agricecon>
- American Society of Civil Engineers. (1998).** 1998 Report Card for America's Infrastructure.
- American Society of Civil Engineers. (2001).** 2001 Report Card for America's Infrastructure.
- American Society of Civil Engineers. (2005).** 2005 Report Card for America's Infrastructure.
- American Society of Civil Engineers. (2009).** 2009 Report Card for America's Infrastructure.
- American Society of Civil Engineers. (2013).** 2013 Report Card for America's Infrastructure (Issue March).
- American Society of Civil Engineers. (2017).** 2017 Infrastructure Report Card. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13296-9_12
- American Society of Civil Engineers. (2021).** Report Card for America's Infrastructure. www.infrastructurereportcard.org
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017).** bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Arrow, K. J. (1963).** Social Choice and individual values. *Yale Univ. Press*.
- Asamoah, R. O., Baiden, B. K., Nani, G., & Kissi, E. (2019).** Review of exogenous economic indicators influencing construction industry. *Advances in Civil Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6073289>
- Ashtiani, M., & Azgomi, M. A. (2016).** A hesitant fuzzy model of computational trust considering hesitancy, vagueness and uncertainty. *Applied Soft Computing Journal*, 42, 18–37. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2016.01.023>
- Aslam, J. A., & Montague, M. (2001).** Models for metasearch. *SIGIR Forum (ACM Special Interest Group on Information Retrieval)*, 276–284. <https://doi.org/10.1145/383952.384007>
- Atanassov, K. T. (1986).** Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 20(1), 87–96. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(86\)80034-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(86)80034-3)

- Aydođdu, E., Güner, E., Aldemir, B., & Aygün, H. (2023).** Complex spherical fuzzy TOPSIS based on entropy. *Expert Systems with Applications*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119331>
- Bai, L., Zhang, K., Shi, H., An, M., & Han, X. (2020).** Project Portfolio Resource Risk Assessment considering Project Interdependency by the Fuzzy Bayesian Network. *Complexity*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5410978>
- Bai, Y. T., Zhang, B. H., Wang, X. Y., Jin, X. B., Xu, J. P., & Wang, Z. Y. (2017).** Expert decision support technique for algal bloom governance in urban lakes based on text analysis. *Water (Switzerland)*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/w9050308>
- Bana E Costa, C. A. (1996).** Les problématiques de l'alde à la décision: Vers l'enrichissement de la trilogie choix-tri-rangement. *RAIRO Recherche Operationnelle*, 30(2), 191–216. <https://doi.org/10.1051/RO/1996300201911>
- Banirazi, S. H., Pons, O., & Hosseini, S. M. A. (2021).** Sustainability model to assess the suitability of green roof alternatives for urban air pollution reduction applied in Tehran. *Building and Environment*, 194, 107683. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107683>
- Banzhaf, J. F. (1965).** Weighted Voting Doesn't Work: A Mathematical Analysis. *Rutgers Law Review*, 19(2), 317–343.
- Baumgartner, U., Magele, C., & Renhart, W. (2004).** Pareto optimality and particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(2-II), 1172–1175. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.825430>
- Belton, V., & Gear, T. (1983).** On a short-coming of Saaty's method of analytic hierarchies. *Omega*, 11(3), 228–230. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(83\)90047-6](https://doi.org/10.1016/0305-0483(83)90047-6)
- Belton, V. & Stewart, T.J. (2002).** *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Springer Science & Business Media.
- Ben-Arieh, D., & Chen, Z. (2006).** Linguistic-labels aggregation and consensus measure for autocratic decision making using group recommendations. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, 36(3), 558–568. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2005.853488>
- Biswas, A., & Sarkar, B. (2019).** Pythagorean fuzzy TOPSIS for multicriteria group decision-making with unknown weight information through entropy measure. *International Journal of Intelligent Systems*, 34(6), 1108–1128. <https://doi.org/10.1002/int.22088>
- Black, D. (1958).** *Theory Committees and Elections*. Cambridge Univ. Press.
- Bodily, S. E. (1979).** Note—A Delegation Process for Combining Individual Utility Functions. *Management Science*, 25(10), 1035–1041. <https://doi.org/10.1287/mnsc.25.10.1035>
- Bolis, I., Morioka, S.N. & Sznclwar, L.I. (2017).** Are we making decisions in a sustainable way? A comprehensive literature review about rationalities for sustainable development. *Journal of cleaner production* 145, 310-322.

- Borissova, D. (2018).** A group decision making model considering experts competency: An application in personnel selection. *Comptes Rendus de L'Academie Bulgare Des Sciences*, 71(11), 1520–1527. <https://doi.org/10.7546/CRABS.2018.11.11>
- Bornholt, G. (2007).** Extending the capital asset pricing model: The reward beta approach. *Accounting and Finance*, 47(1), 69–83. <https://doi.org/10.1111/J.1467-629X.2007.00202.X>
- Bui, T., & Jarke, M. (1984).** Dss for Cooperative Multiple Criteria Group Decision Making. *Proceedings of the International Conference on Information Systems*, 101–113.
- Cabrerizo, F. J., Heradio, R., Pérez, I. J., & Herrera-Viedma, E. (2010).** A selection process based on additive consistency to deal with incomplete fuzzy linguistic information. *Journal of Universal Computer Science*, 16(1), 62–81.
- Cafiso, S., Di Graziano, A., Kerali, H. R., & Odoki, J. B. (2002).** Multicriteria Analysis Method for Pavement Maintenance Management. *Transport. Res. Rec.*, 1816, 73–84. <https://doi.org/10.3141/1816-09>
- Çalı, S., & Balaman, Ş. Y. (2019).** A novel outranking based multi criteria group decision making methodology integrating ELECTRE and VIKOR under intuitionistic fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 119, 36–50. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.10.039>
- Campioni, L., Scardovelli, R., & Vestrucci, P. (2005).** Biased Monte Carlo optimization: The basic approach. *Reliability Engineering and System Safety*, 87(3), 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2004.06.008>
- Carassus, L., Rásonyi, M., & Rodrigues, A. M. (2015).** Non-concave utility maximisation on the positive real axis in discrete time. *Mathematics and Financial Economics*, 9(4), 325–349. <https://doi.org/10.1007/s11579-015-0146-4>
- Cardenas-Gomez, J. C., Bosch Gonzales, M., & Damiani Lazo, C. A. (2021).** Evaluation of Reinforced Adobe Techniques for Sustainable Reconstruction in Andean Seismic Zones. *Sustainability*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/su13094955>
- Carrillo, M., & Jorge, J. M. (2017).** Multidimensional Analysis of Regional Tourism Sustainability in Spain. *Ecological Economics*, 140, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.05.004>
- Cartelle, J. J., Lara, M., de la Cruz, M. P., & del Caño, A. (2015).** Assessing the global sustainability of different electricity generation systems. *Energy*, 89, 473–489. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.110>
- Cartelle, J. J., Lara, M., de la Cruz, M. P., & del Caño, A. (2018).** Sustainability optimization of shell and tube heat exchanger, using a new integrated methodology. *Journal of Cleaner Production*, 200, 552–567. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.266>
- Casanovas-Rubio, M.M., Pujadas, P., Pardo-Bosch, F., Blanco, A., & Aguado, A. (2019).** Sustainability assessment of trenches including the new eco-trench: A multi-criteria decision-making tool. *Journal of Cleaner Production*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117957>

- Chaffin, B. C., Garmestani, A. S., Gunderson, L. H., Benson, M. H., Angeler, D. G., Tony, C. A., Cosens, B., Craig, R. K., Ruhl, J. B., & Allen, C. R. (2016).** Transformative Environmental Governance. *Annual Review of Environment and Resources*, 41, 399–423. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085817>
- Chai, J., Liu, J. N. K., & Xu, Z. (2013).** A rule-based group decision model for warehouse evaluation under interval-valued Intuitionistic fuzzy environments. *Expert Systems with Applications*, 40(6), 1959–1970. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.10.003>
- Chakhar, S., Ishizaka, A., Labib, A., & Saad, I. (2016).** Dominance-based rough set approach for group decisions. *European Journal of Operational Research*, 251(1), 206–224. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.10.060>
- Chakraborty, S., & Chakraborty, S. (2022).** A Scoping Review on the Applications of MCDM Techniques for Parametric Optimization of Machining Processes. In *Archives of Computational Methods in Engineering*. Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09731-w>
- Chatterjee, S., & Bhattacharyya, M. (2017).** A probabilistic approach to group decision making. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings, Part F1276*, 2445–2451. <https://doi.org/10.1145/3027063.3053226>
- Chen, L., Luo, N., & Gou, X. (2021).** A novel q-rung orthopair fuzzy TODIM approach for multi-criteria group decision making based on Shapley value and relative entropy. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 40(1), 235–250. <https://doi.org/10.3233/JIFS-191374>
- Chen, M., Wan, Z., & Chen, X. (2015).** New Min-Max approach to optimal choice of the weights in multi-criteria group decision-making problems. *Applied Sciences (Switzerland)*, 5(4), 998–1015. <https://doi.org/10.3390/app5040998>
- Chen, S. M., Cheng, S. H., & Lin, T. E. (2015).** Group decision making systems using group recommendations based on interval fuzzy preference relations and consistency matrices. *Information Sciences*, 298, 555–567. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.11.027>
- Chen, W., & Zou, Y. (2020).** Group decision making under generalized fuzzy soft sets and limited cognition of decision makers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87(November 2019), 103344. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103344>
- Chen, X., Zhao, L., & Liang, H. (2018).** A novel multi-attribute group decision-making method based on the MULTIMOORA with linguistic evaluations. *Soft Computing*, 22(16), 5347–5361. <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3030-3>
- Chen, X., Zhao, L., Özdemir, M. S., & Liang, H. (2018).** Mixed strategy to allocate resources with air pollution treatment in China: based on the analytic network process and large-group decision-making method. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(17), 16885–16899. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1826-4>
- Chen, Z. hui, Wan, S., & Dong, J. ying. (2022).** An efficiency-based interval type-2 fuzzy multi-criteria group decision making for makeshift hospital selection. *Applied Soft Computing*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108243>

- Chen, Z. S., Zhang, X., Govindan, K., Wang, X. J., & Chin, K. S. (2021).** Third-party reverse logistics provider selection: A computational semantic analysis-based multi-perspective multi-attribute decision-making approach. *Expert Systems with Applications*, 166, 114051. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114051>
- Chen, Z., Wan, S., & Dong, J. (2023).** An integrated interval-valued intuitionistic fuzzy technique for resumption risk assessment amid COVID-19 prevention. *Information Sciences*, 619, 695–721. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.11.028>
- Chen, Z., Zhang, H., & Liao, M. (2019).** Integration multi-model to evaluate the impact of surfacewater quality on city sustainability: A case from Maanshan city in China. *Processes*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/pr7010025>
- Cheng, D., Cheng, F., Zhou, Z., & Wang, J. (2017).** Group prioritisation with unknown expert weights in incomplete linguistic context. *International Journal of Systems Science*, 48(12), 2633–2643. <https://doi.org/10.1080/00207721.2017.1337947>
- Cheng, D., Zhou, Z., Cheng, F., & Wang, J. (2018).** Deriving heterogeneous experts weights from incomplete linguistic preference relations based on uninorm consistency. *Knowledge-Based Systems*, 150, 150–165. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.03.013>
- Chunhua, F., Shi, H., & Guozhen, B. (2020).** A group decision making method for sustainable design using intuitionistic fuzzy preference relations in the conceptual design stage. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118640. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118640>
- Cinelli, M., Coles, S. R., & Kirwan, K. (2014).** Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological Indicators*, 46, 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.011>
- Clark, R., Reed, J. & Sunderland, T. (2018).** Bridging funding gaps for climate and sustainable development: Pitfalls, progress and potential of private finance. *Land Use Policy* 71, 335–346. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.12.013>
- Colapinto, C., Raja J., Abdelaziz, F. B. & La Torre., D. (2020).** Environmental sustainability and multifaceted development: multi-criteria decision models with applications. *Annals of Operations Research* 293(2), 405–432. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03403-y>
- Cooper, H. (1998).** Synthesizing research: a guide for literature reviews. In *Sage* (3rd ed., Vol. 2). Sage.
- Crott, H. W., Szilvas, K., & Zuber, J. A. (1991).** Group decision, choice shift, and polarization in consulting, political, and local political scenarios: An experimental investigation and theoretical analysis. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 49(1), 22–41. [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90040-Z](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90040-Z)
- Cuadrado, J., Zubizarreta, M., Roji, E., Larrauri, M., & Alvarez, I. (2016).** Sustainability assessment methodology for industrial buildings: three case studies. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 33(2), 106–124. <https://doi.org/10.1080/10286608.2016.1148143>

- Dabla-Norris, E., Brumby, J., Kyobe, A., Mills, Z., & Papageorgiou, C. (2012).** Investing in public investment: An index of public investment efficiency. *Journal of Economic Growth*, 17(3), 235–266. <https://doi.org/10.1007/s10887-012-9078-5>
- Dai, L., Liu, Y., & Zhang, Z. (2008).** Supplier selection with multiple criteria under fuzzy environment. *2008 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2008*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/WiCom.2008.1652>
- Damians, I. P., Bathurst, R. J., Adroguer, E. G., Josa, A., & Lloret, A. (2016).** Sustainability assessment of earth-retaining wall structures. *Environmental Geotechnics*, 5(4), 187–203. <https://doi.org/10.1680/jenge.16.00004>
- Dang, C. D., & Lan, G. (2013).** Stochastic Block Mirror Descent Methods for Nonsmooth and Stochastic Optimization. *SIAM Journal on Optimization*, 25(2), 856–881. <http://arxiv.org/abs/1309.2249>
- Davis, J. (1973).** Group decision and social interaction: a theory of social decision schemes. *Psychological Review*, 80(2), 97–125.
- Davis, J. H., Hulbert, L., Au, W. T., Chen, X. P., & Zarnoth, P. (1997).** Effects of group size and procedural influence on consensual judgments of quantity: The example of damage awards and mock civil juries. *Journal of Personality and Social Psychology*, 73(4), 703–718. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.73.4.703>
- Davoudabadi, R., Mousavi, S. M., & Mohagheghi, V. (2020).** A new last aggregation method of multi-attributes group decision making based on concepts of TODIM, WASPAS and TOPSIS under interval-valued intuitionistic fuzzy uncertainty. *Knowledge and Information Systems*, 62(4), 1371–1391. <https://doi.org/10.1007/s10115-019-01390-x>
- de la Cruz, M.P., Castro, A., del Caño, A., Gómez, D., Lara, M., & Cartelle, J. J. (2015a).** Comprehensive Methods for Dealing with Uncertainty in Assessing Sustainability Part 1: The MIVES - Monte Carlo Method. In *Soft Computing Applications for Renewable Energy and Energy Efficiency*, 69–106. IGI GLOBAL. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-6631-3.ch004>
- de la Cruz, M.P., Castro, A., del Caño, A., Gómez, D., Lara, M., & Gradaille, G. (2015b).** Comprehensive Methods for Dealing with Uncertainty in Assessing Sustainability Part 2: The Fuzzy-MIVES Method. In *Soft Computing Applications for Renewable Energy and Energy Efficiency* (pp. 107–140). IGI GLOBAL. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-6631-3.ch005>
- de la Cruz, M. P., Cartelle, J. J., del Caño, A., Garaboa, M. C., & Blanco, J. (2021).** Assessing the risk of robbery in bank branches to reduce impact on personnel. *Risk Analysis*, 42(2). <https://doi.org/10.1111/risa.13761>
- de la Fuente, A., Pons, O., Josa, A., & Aguado, A. (2016).** Multi-criteria decision making in the sustainability assessment of sewerage pipe systems. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4762–4770. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.002>
- de la Fuente, A., Armengou, J., Pons, O., & Aguado, A. (2017a).** Multi-criteria decision-making model for assessing the sustainability index of wind-turbine support systems: application to a new precast concrete alternative. *Journal of Civil*

- Engineering and Management*, 23(2), 194–203.
<https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1023347>
- de la Fuente, A., Blanco, A., Armengou, J., & Aguado, A. (2017b).** Sustainability based-approach to determine the concrete type and reinforcement configuration of TBM tunnels linings. Case study: Extension line to Barcelona Airport T1. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 61, 179–188.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.10.008>
- de La Fuente, A., & Fernández-Ordóñez, D. (2018).** A multi-criteria decision-making based approach to assess the sustainability of concrete structures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 442(1), 0–13.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/442/1/012008>
- de la Fuente, A., Casanovas-Rubio, M. del M., Pons, O., & Armengou, J. (2019).** Sustainability of Column-Supported RC Slabs: Fiber Reinforcement as an Alternative. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(7), 04019042.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001667](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001667)
- del Caño, A., de la Cruz, M., Gómez, D., & Pérez, M. (2016).** Fuzzy method for analyzing uncertainty in the sustainable design of concrete structures. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(7), 924–935.
<https://doi.org/10.3846/13923730.2014.928361>
- de Pascale, A., Arbolino, R., Szopik-Depczyńska, K., Limosani, M., & Ioppolo, G. (2021).** A systematic review for measuring circular economy: The 61 indicators. *Journal of Cleaner Production*, 281, 124942.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124942>
- Deconde, R. P., Health, P., Division, S., Clegg, N., Biology, H., Hutchinson, F., Knudsen, B., Hutchinson, F., Etzioni, R., Health, P., Division, S., Deconde, R. P., Hawley, S., Falcon, S., Clegg, N., & Knudsen, B. (2006).** *Combining Results of Microarray Experiments: A Rank Aggregation Approach*. 5(1), 5–15.
<https://doi.org/10.2202/1544-6115.1204>
- Deegan, J., & Packel, E. W. (1978).** A new index of power for simple n-person games. *International Journal of Game Theory*, 7(2), 113–123.
<https://doi.org/10.1007/BF01753239>
- Dehghanian, F., Mansoor, S., & Nazari, M. (2011).** A framework for integrated assessment of sustainable supply chain management. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 279–283.
<https://doi.org/10.1109/IEEM.2011.6117922>
- Dempster, A. P. (1967).** Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *Annals Mathematics Statistics*, 38, 325–339.
- Díaz-Sarachaga, J. M., Jato-Espino, D., & Castro-Fresno, D. (2017a).** Application of the Sustainable Infrastructure Rating System for Developing Countries (SIRSDEC) to a case study. *Environmental Science and Policy*, 69, 73–80.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.011>
- Díaz-Sarachaga, J. M., Jato-Espino, D., & Castro-Fresno, D. (2017b).** Methodology for the development of a new Sustainable Infrastructure Rating System for Developing

- Countries (SIRSDEC). *Environmental Science and Policy*, 69, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.010>
- Dong, Q., & Cooper, O. (2016).** A peer-to-peer dynamic adaptive consensus reaching model for the group AHP decision making. *European Journal of Operational Research*, 250(2), 521–530. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.016>
- Dong, Y., Xiao, J., Zhang, H., & Wang, T. (2016).** Managing consensus and weights in iterative multiple-attribute group decision making. *Applied Soft Computing Journal*, 48, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.06.029>
- Dong, Y., Zhang, H., & Herrera-Viedma, E. (2016).** Integrating experts' weights generated dynamically into the consensus reaching process and its applications in managing non-cooperative behaviors. *Decision Support Systems*, 84, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2016.01.002>
- Dorfeshan, Y., & Meysam Mousavi, S. (2019).** A group TOPSIS-COPRAS methodology with Pythagorean fuzzy sets considering weights of experts for project critical path problem. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 36(2), 1375–1387. <https://doi.org/10.3233/JIFS-172252>
- Dursun, M., & Karsak, E. E. (2010).** A fuzzy MCDM approach for personnel selection. *Expert Systems with Applications*, 37(6), 4324–4330. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.11.067>
- Dwork, C., Kumar, R., Naor, M., & Sivakumar, D. (2001).** Rank aggregation methods for the web. *Proceedings of the 10th International Conference on World Wide Web, WWW 2001*, 613–622. <https://doi.org/10.1145/371920.372165>
- Dymova, L., Sevastjanov, P., & Tikhonenko, A. (2013).** A direct interval extension of TOPSIS method. *Expert Systems with Applications*, 40(12), 4841–4847. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.02.022>
- Ebrahim, K. S., Omid, A. N., & Nasser, T. (2017).** Application of TOPSIS method in evaluation and prioritization of social stability in rural areas (Case Study: Zidasht Basin). *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 21(1), 49. <https://doi.org/10.4314/jasem.v21i1.6>
- EIZ. (2012).** *Infrastructure report card (IRC) framework.*
- EIZ. (2015).** *2014 Baseline report card for Zambia's infrastructure.*
- Elbarkouky, M. M. G., & Fayek, A. R. (2011).** Fuzzy Similarity Consensus Model for Early Alignment of Construction Project Teams on the Extent of Their Roles and Responsibilities. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(6), 432–440. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000310](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000310)
- Emerson, P. (2007).** Designing an all-inclusive democracy: Consensual voting procedures for use in parliaments, councils and committees. *Springer Berlin Heidelberg*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-33164-3>
- Enfedaque, A., Alberti, M. G., Galvez, J. C., Rivera, M., & Simón-Talero, J. M. (2018).** Can polyolefin fibre reinforced concrete improve the sustainability of a flyover bridge? *Sustainability (Switzerland)*, 10(12), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su10124583>

- ESMA. (2021).** *Final Report on draft Regulatory Technical Standards* (Vol. 4, Issue February). <https://www.esma.europa.eu/press-news/esma-news/three-european-supervisory-authorities-publish-final-report-and-draft-rts>
- Fahmi, A., Amin, F., Abdullah, S., Aslam, M., & Ul Amin, N. (2019).** Cubic Fuzzy multi-attribute group decision-making with an application to plant location selected based on a new extended Vikor method. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 37(1), 583–596. <https://doi.org/10.3233/JIFS-171049>
- Fei, L., Xia, J., Feng, Y., & Liu, L. (2019).** An ELECTRE-Based Multiple Criteria Decision Making Method for Supplier Selection Using Dempster-Shafer Theory. *IEEE Access*, 7, 84701–84716. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924945>
- Feillet, D., Dejax, P., & Gendreau, M. (2005).** Traveling salesman problems with profits. *Transportation Science*, 39(2), 188–205. <https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0079>
- Felsenthal, D. S. (2016).** A Well-Behaved Index of a Priori P-Power for Simple N-Person Games. *Homo Oeconomicus*, 33(4), 367–381. <https://doi.org/10.1007/s41412-016-0031-2>
- Fiege, J., McCurdy, B., Potrebko, P., Champion, H., & Cull, A. (2011).** PARETO: A novel evolutionary optimization approach to multiobjective IMRT planning. *Medical Physics*, 38(9), 5217–5229. <https://doi.org/10.1118/1.3615622>
- French, J. R. P. (1956).** A formal theory of social power. *Psychological Review*, 63(3), 181–194. <https://doi.org/10.1037/h0046123>
- Fu, C., Yang, J. B., & Yang, S. L. (2015).** A group evidential reasoning approach based on expert reliability. *European Journal of Operational Research*, 246(3), 886–893. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.042>
- Gandini, A., Egusquiza, A., Garmendia, L., & San-José, J.T. (2018).** Vulnerability assessment of cultural heritage sites towards flooding events. Florence Heri-tech - The Future of Heritage Science and Technologies, 364. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/364/1/012028>
- Gandini, A., Garmendia, L., Prieto, I., Alvarez, I., & San-Jose, J.T. (2020).** A holistic and multi-stakeholder methodology for vulnerability assessment of cities to flooding and extreme precipitation events. *Sustainable cities and society*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102437>
- Gandini, A., Quesada, L., Prieto, I., & Garmendia, L. (2021).** Climate change risk assessment: A holistic multi-stakeholder methodology for the sustainable development of cities. *Sustainable Cities and Society*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102641>
- Garber, A. M., & Phelps, C. E. (1997).** Economic foundations of cost-effectiveness analysis. *Journal of Health Economics*, 16(1), 1–31. [https://doi.org/10.1016/S0167-6296\(96\)00506-1](https://doi.org/10.1016/S0167-6296(96)00506-1)
- Garg, H., & Kaur, G. (2020).** Extended TOPSIS method for multi-criteria group decision-making problems under cubic intuitionistic fuzzy environment. *Scientia Iranica*, 27(1 E), 396–410. <https://doi.org/10.24200/SCI.2018.5307.1194>

- Gaudioso, M., Moccia, L., & Monaco, M. F. (2010).** Repulsive assignment problem. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 144(2), 255–273. <https://doi.org/10.1007/s10957-009-9601-9>
- Geng, X., Zhang, D., Li, C., Li, Y., Huang, J., & Wang, X. (2021).** Application and comparison of multiple models on agricultural sustainability assessments: A case study of the yangtze river delta urban agglomeration, China. *Sustainability (Switzerland)*, 13(1), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su13010121>
- Gero, J. S., & Kazakov, V. (2001).** A genetic engineering approach to genetic algorithms. *Evolutionary Computation*, 9(1), 71–92. <https://doi.org/10.1162/10636560151075121>
- Ghana Institution of Engineers. (2016).** *GhIE Ghana Infrastructure Report Card 2016*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27160.70409>
- Ghate, A. (2020).** Robust continuous linear programs. *Optimization Letters*, 14(7), 1627–1642. <https://doi.org/10.1007/s11590-020-01539-6>
- Giannetti, B. F., Sevegnani, F., Almeida, C. M. V. B., Agostinho, F., Moreno García, R. R., & Liu, G. (2019).** Five sector sustainability model: A proposal for assessing sustainability of production systems. *Ecological Modelling*, 406(April), 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.06.004>
- Gilani, G., Blanco, A., & de la Fuente, A. (2017).** A New Sustainability Assessment Approach Based on Stakeholder's Satisfaction for Building Façades. *Energy Procedia*, 115, 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.006>
- Gitinavard, H., Ghaderi, H., & Pishvae, M. S. (2018).** Green supplier evaluation in manufacturing systems: a novel interval-valued hesitant fuzzy group outranking approach. *Soft Computing*, 22(19), 6441–6460. <https://doi.org/10.1007/s00500-017-2697-1>
- Gitinavard, H., Mousavi, S. M., Vahdani, B., & Siadat, A. (2016).** A distance-based decision model in interval-valued hesitant fuzzy setting for industrial selection problems. *Scientia Iranica*, 23(4), 1928–1940. <https://doi.org/10.24200/sci.2016.3938>
- Gómez-López, D., de la Cruz-López, M. P., del Caño-Gochi, A., & Arroyo-Cunha, I. (2012).** Computer tool for assessing sustainability of concrete structures according to the spanish EHE-08 Code. *DYNA*, 87(2), 180–189. <https://doi.org/10.6036/4391>
- Gong, C., Li, W., & Yi, P. (2019).** Rank-based analysis method to determine OWA weights and its application in group decision making. *International Journal of Intelligent Systems*, 34(7), 1685–1699. <https://doi.org/10.1002/int.22116>
- Greator, J., & Dexter, T. (2000).** An accessible analytical approach for investigating what happens between the rounds of a Delphi study. *Journal of Advanced Nursing*, 32(4), 1016–1024. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2648.2000.t01-1-01569.x>
- Greco, S., Matarazzo, B. & Roman S. (2004).** Axiomatic characterization of a general utility function and its particular cases in terms of conjoint measurement and rough-set decision rules. *European Journal of Operational Research* 158(2), 271–292. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.06.004>

- Greco, S., Ishizaka, A., Tasiou, M., & Torrisi, G. (2019).** On the Methodological Framework of Composite Indices: A Review of the Issues of Weighting, Aggregation, and Robustness. *Social Indicators Research*, 141(1), 61–94. <https://doi.org/10.1007/s11205-017-1832-9>
- Guiver, J., & Snelson, E. (2009).** Bayesian inference for Plackett-Luce ranking models. *Proceedings of the 26th International Conference On Machine Learning, ICML 2009*, 377–384.
- Gunnarsdottir, I., Davidsdottir, B., Worrell, E., & Sigurgeirsdottir, S. (2020).** Review of indicators for sustainable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133(November 2019), 110294. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110294>
- Guo, H., Chen, J., & Pan, C. (2021).** Assessment on agricultural drought vulnerability and spatial heterogeneity study in china. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9). <https://doi.org/10.3390/ijerph18094449>
- Gupta, P., Mehlawat, M. K., & Grover, N. (2016).** Intuitionistic fuzzy multi-attribute group decision-making with an application to plant location selection based on a new extended VIKOR method. *Information Sciences*, 370–371(01), 184–203. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.07.058>
- Gupta, P., Mehlawat, M. K., & Grover, N. (2019).** A Generalized TOPSIS Method for Intuitionistic Fuzzy Multiple Attribute Group Decision Making Considering Different Scenarios of Attributes Weight Information. *International Journal of Fuzzy Systems*, 21(2), 369–387. <https://doi.org/10.1007/s40815-018-0563-7>
- Gupta, P., Mehlawat, M. K., Grover, N., & Pedrycz, W. (2018).** Multi-attribute group decision making based on extended TOPSIS method under interval-valued intuitionistic fuzzy environment. *Applied Soft Computing Journal*, 69, 554–567. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.04.032>
- Habibi, S., Pons, O., & Peña, D. (2020).** New sustainability assessment model for Intelligent Façade Layers when applied to refurbish school buildings skins. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100839>
- Hafezalkotob, A., & Hafezalkotob, A. (2017).** A novel approach for combination of individual and group decisions based on fuzzy best-worst method. *Applied Soft Computing Journal*, 59, 316–325. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.05.036>
- Hageman, J. A., Streppel, M., Wehrens, R., & Buydens, L. M. C. (2003).** Wavelength selection with Tabu Search. *Journal of Chemometrics*, 17(8–9), 427–437. <https://doi.org/10.1002/CEM.782>
- Hamdani, H., Wardoyo, R., & Mustofa, K. (2017).** A method of weight update in group decision-making to accommodate the interests of all the decision makers. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 9(8), 1–10. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2017.08.01>
- Han, S., Peng, Z., & Wang, S. (2014).** The maximum flow problem of uncertain network. *Information Sciences*, 265, 167–175. <https://doi.org/10.1016/J.INS.2013.11.029>

- Hashemi, H., Mousavi, S. M., Zavadskas, E. K., Chalekaee, A., & Turskis, Z. (2018).** A new group decision model based on Grey-Intuitionistic Fuzzy-ELECTRE and VIKOR for contractor assessment problem. *Sustainability*, 10(5).
<https://doi.org/10.3390/su10051635>
- Hassan, M. M., Lmghlin, K. F., & Biswas, M. E. (1996).** Optimization of continuous countercurrent adsorption systems. In *Separations Technology* (Vol. 6).
- Hendrix, E. M. T., & Olieman, N. J. (2008).** The smoothed Monte Carlo method in robustness optimization. *Optimization Methods and Software*, 23(5), 717–729.
<https://doi.org/10.1080/10556780802079958>
- Hernández-Morcillo, M., Plieninger, T., & Bieling, C. (2013).** An empirical review of cultural ecosystem service indicators. *Ecological Indicators*, 29, 434–444.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.01.013>
- Herowati, E., Ciptomulyono, U., & Parung, J. (2014).** Expertise-based experts importance weights in adverse judgment. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(9), 1428–1435.
- Herowati, E., Ciptomulyono, U., Parung, J., & Suparno. (2017).** Expertise-based ranking of experts: An assessment level approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 315, 44–56.
<https://doi.org/10.1016/j.fss.2016.09.016>
- Herrera, F., Herrera-Viedma, E., & Verdegay, J. L. (1996).** A model of consensus in group decision making under linguistic assessments. *Fuzzy Sets and Systems*, 78(1), 73–87. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(95\)00107-7](https://doi.org/10.1016/0165-0114(95)00107-7)
- Herva, M., Franco, A., Carrasco, E. F., & Roca, E. (2011).** Review of corporate environmental indicators. *Journal of Cleaner Production*, 19(15), 1687–1699.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.05.019>
- Herva, M., & Roca, E. (2013).** Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 39, 355–371.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.058>
- Hihn, J., & Lum, K. T. (2004).** Improving software size estimates by using probabilistic pairwise comparison matrices. *International Software Metrics Symposium*, 140–150.
<https://doi.org/10.1109/METRIC.2004.1357898>
- Hinsz, V. B. (1999).** Group Decision Making with Responses of a Quantitative Nature: The Theory of Social Decision Schemes for Quantities. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 80(1), 28–49. <https://doi.org/10.1006/obhd.1999.2853>
- Hosseini, S. M. A., de La Fuente, A., & Pons, O. (2016a).** Multi-criteria decision-making method for assessing the sustainability of post-disaster temporary housing units technologies: A case study in Bam, 2003. *Sustainable Cities and Society*, 20, 38–51.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.09.012>
- Hosseini, S. M. A., de la Fuente, A., & Pons, O. (2016b).** Multicriteria Decision-Making Method for Sustainable Site Location of Post-Disaster Temporary Housing in Urban Areas. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(9), 04016036.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001137](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001137)

- Hosseini, S. M. A., Pons, O., & de la Fuente, A. (2018).** A combination of the Knapsack algorithm and MIVES for choosing optimal temporary housing site locations: A case study in Tehran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 27(October 2017), 265–277. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.10.013>
- Hosseini, S. M. A., Yazdani, R., & de la Fuente, A. (2020).** Multi-objective interior design optimization method based on sustainability concepts for post-disaster temporary housing units. *Building and environment*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106742>
- Hu, X., Ma, C., Huang, P., & Guo, X. (2021).** Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection – A case of Weifang City, China. *Ecological Indicators*, 125, 107464. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107464>
- Huang, I.B., Keisler, J. and Linkov, I. (2011).** Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of the total environment* 409(19), 3578-3594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.022>
- Institution of Civil Engineers. (2010).** *The State of the Nation: Infrastructure 2010.*
- Institution of Civil Engineers. (2014).** *The State of The Nation: Infrastructure 2014.*
- Institution of Engineers Australia. (2010).** *Infrastructure report card 2010 Australia.*
- Ishizaka, A., Pearman, C., & Nemery, P. (2012).** AHPSort: An AHP-based method for sorting problems. *International Journal of Production Research*, 50(17), 4767–4784. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.657966>
- Ivlev, I., Kneppo, P., & Barták, M. (2015).** Method for selecting expert groups and determining the importance of experts' judgments for the purpose of managerial decision-making tasks in health system. *E a M: Ekonomie a Management*, 18(2), 57–72. <https://doi.org/10.15240/tul/001/2015-2-005>
- Jabeur, K., Martel, J. M., & Khélifa, S. ben. (2004).** A distance-based collective preorder integrating the relative importance of the group's members. *Group Decision and Negotiation*, 13(4), 327–349. <https://doi.org/10.1023/B:GRUP.0000042894.00775.75>
- Jahanshahloo, G. R., Hosseinzadeh Lotfi, F., & Davoodi, A. R. (2009).** Extension of TOPSIS for decision-making problems with interval data: Interval efficiency. *Mathematical and Computer Modelling*, 49(5–6), 1137–1142. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2008.07.009>
- Jang, J., & Seong, N. Y. (2023).** Deep reinforcement learning for stock portfolio optimization by connecting with modern portfolio theory. *Expert Systems with Applications*, 218. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119556>
- Jato-Espino, D., Rodriguez-Hernandez, J., Andrés-Valeri, V. C., & Ballester-Muñoz, F. (2014).** A fuzzy stochastic multi-criteria model for the selection of urban pervious pavements. *Expert Systems with Applications*, 41(15), 6807–6817. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.05.008>

- Ji, Y., Li, P., Wu, Z., & Qu, D. (2021).** Reaching Consensus Based on the Opinion Dynamics in Social Networks. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(2), 1677–1690. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04891-y>
- Jia, Z., & Zhang, Y. (2019).** Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Multiple Attribute Group Decision Making with Uncertain Weights. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019(3). <https://doi.org/10.1155/2019/5092147>
- Jiang, X., Lu, Z., Hu, Y., & Lei, J. (2021).** Time-dependent performance measure approach for time-dependent failure possibility-based design optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 63(3), 1029–1044. <https://doi.org/10.1007/S00158-020-02795-X>
- Jiang, Z., & Wang, Y. (2014).** Multiattribute Group Decision Making with Unknown Decision Expert Weights Information in the Framework of Interval Intuitionistic Trapezoidal Fuzzy Numbers. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/635476>
- Jin, L., Mesiar, R., & Qian, G. (2018).** Weighting models to generate weights and capacities in multicriteria group decision making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 26(4), 2225–2236. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2017.2769041>
- Jodrá, P. (2008).** On a connection between the polylogarithm function and the Bass diffusion model. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 464(2099), 3081–3088. <https://doi.org/10.1098/RSPA.2008.0196>
- Joglekar, S. N., Kharkar, R. A., Mandavgane, S. A., & Kulkarni, B. D. (2018).** Sustainability assessment of brick work for low-cost housing: A comparison between waste based bricks and burnt clay bricks. *Sustainable Cities and Society*, 37 (November 2017), 396–406. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.025>
- Joglekar, S. N., Darwai, V., Mandavgane, S. A., & Kulkarni, B. D. (2020).** A methodology of evaluating sustainability index of a biomass processing enterprise: a case study of native cow dung-urine biorefinery. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(22,SI),27435–27448. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06309-1>
- Josa, I., Pons, O., Fuente, A. de la, & Aguado, A. (2020).** Multi-criteria decision-making model to assess the sustainability of girders and trusses: Case study for roofs of sports halls. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119312. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119312>
- Josa, I., de la Fuente, A., Casanovas-Rubio, M. D. M., Armengou, J., & Aguado, A. (2021a).** Sustainability-oriented model to decide on concrete pipeline reinforcement. *Sustainability* (Switzerland), 13(6), 1–25. <https://doi.org/10.3390/su13063026>
- Josa, I., Tošić, N., Marinkovic, S., de La Fuente, A., & Aguado, A. (2021b).** Sustainability-oriented multi-criteria analysis of different continuous flight auger piles. *Sustainability* (Switzerland), 13(14), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su13147552>
- Kabak, Ö., & Ervural, B. (2017).** Multiple attribute group decision making: A generic conceptual framework and a classification scheme. *Knowledge-Based Systems*, 123, 13–30. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.02.011>

- Kabir, G., Sadiq, R. & Tesfamariam, S. (2014).** A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management. *Structure and infrastructure engineering* 10(9), 1176-1210. <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.795978>
- Kacprzak, D. (2019).** A doubly extended TOPSIS method for group decision making based on ordered fuzzy numbers. *Expert Systems with Applications*, 116, 243–254. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.09.023>
- Kannan, D., de Sousa Jabbour, A. B. L., & Jabbour, C. J. C. (2014).** Selecting green suppliers based on GSCM practices: Using Fuzzy TOPSIS applied to a Brazilian electronics company. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 432–447. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.07.023>
- Keeney, R. L. (1992).** Value-Focused Thinking: A Path to Creative Decision making. In *Value-Focused Thinking*. Harvard University Press. <https://doi.org/10.2307/J.CTV322V4G7>
- Keeney, R. L., & Kirkwood, C. W. (1974).** Group decision making using cardinal social welfare functions. *Management Science*, 22(4), 430–437. <https://doi.org/10.1287/mnsc.22.4.430>
- Kelemenis, A., Ergazakis, K., & Askounis, D. (2011).** Support managers' selection using an extension of fuzzy TOPSIS. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 2774–2782. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.08.068>
- Kemeny, J. (1959).** Mathematics Without Numbers. *Daedalus*, 571–591. <https://doi.org/https://www.jstor.org/stable/20026529>
- Kendall, M. G., & Smith, B. B. (1939).** The Problem of “m” Rankings. *The Annals of Mathematical Statistics*, 10(3), 275–287. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177732186>
- Kerr, N. L., & Tindale, R. S. (2004).** Group performance and decision making. *Annual Review of Psychology*, 55, 623–655. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.55.090902.142009>
- Keyghobadi, M., Reza, H., Haghghi, S., & Seif, M. S. (2020).** Application of MCDM methods in managerial decisions for identifying and evaluating future options: A real case study in shipbuilding industry. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 13(1), 262–286.
- Khademolqorani, S. (2018).** A hybrid model for the prioritization of municipal projects in Iran. 1(1), 1–10.
- Kiker, G. A., Bridges, T. S., Varghese, A., Seager, P. T. P., & Linkov, I. (2005).** Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 1(2), 95–108. https://doi.org/10.1897/IEAM_2004A-015.1
- Kimball, M. S. (1993).** Standard Risk Aversion. *Econometrica*, 61(3), 589. <https://doi.org/10.2307/2951719>
- Koksalmis, E., & Kabak, Ö. (2019).** Deriving decision makers' weights in group decision making: An overview of objective methods. *Information Fusion*, 49(May 2018), 146–160. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.11.009>

- Krishankumar, R., Gowtham, Y., Ahmed, I., Ravichandran, K. S., & Kar, S. (2020).** Solving green supplier selection problem using q-rung orthopair fuzzy-based decision framework with unknown weight information. *Applied Soft Computing Journal*, 94, 106431. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106431>
- Krishankumar, R., Ravichandran, K. S., Liao, H., & Kar, S. (2020).** An integrated decision framework for group decision-making with double hierarchy hesitant fuzzy linguistic information and unknown weights. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 13(1), 624–637. <https://doi.org/10.2991/ijcis.d.200527.002>
- Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017).** A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69(October 2016), 596–609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>
- Kunsch, P. L., & Ishizaka, A. (2018).** Multiple-criteria performance ranking based on profile distributions: An application to university research evaluations. *Mathematics and Computers in Simulation*, 154, 48–64. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.05.021>
- la Rosa, D., Spyra, M., & Inostroza, L. (2016).** Indicators of Cultural Ecosystem Services for urban planning: A review. *Ecological Indicators*, 61, 74–89. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.04.028>
- Larson, N. (2012).** *Infrastructure Report Cards – A Comparison of Canadian and International Experiences*.
- Lee, H. S. (2002).** Optimal consensus of fuzzy opinions under group decision making environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 132(3), 303–315. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(02\)00056-8](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(02)00056-8)
- Lemus-Esquivel, J. S., Quicazán-Moreno, C. A., Hurtado-Guarín, J. L., & Lizarazo-Cuellar, A. M. (2015).** Financial soundness index for the private corporate sector in Colombia. *Temas de Estabilidad Financiera; No. 82*. <http://repositorio.banrep.gov.co/handle/20.500.12134/2142>
- Li, J., Dong, X., Jiang, Q., & Dong, K. (2021).** Analytical approach to quantitative country risk assessment for the belt and road initiative. *Sustainability (Switzerland)*, 13(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su13010423>
- Li, J., & Wang, Z. X. (2019).** Deriving priority weights from hesitant fuzzy preference relations in view of additive consistency and consensus. *Soft Computing*, 23(24), 13691–13707. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-03908-5>
- Li, W., Guo, G., & Zhou, X. (2015).** Generalizing and integrating TOPSIS and cook-seiford method for multicriteria group decision-making with both cardinal and ordinal data. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 13–15. <https://doi.org/10.1155/2015/154848>
- Li, X., & Chen, X. (2014).** Extension of the TOPSIS method based on prospect theory and trapezoidal intuitionistic fuzzy numbers for group decision making. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 23(2), 231–247. <https://doi.org/10.1007/s11518-014-5244-y>

- Li, X., Song, L., Xie, Z., Gao, T., Wang, T., Zheng, X., Liu, J., & Liu, L. (2021).** Assessment of ecological vulnerability on northern sand prevention belt of china based on the ecological pressure–sensitivity–resilience model. *Sustainability (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/su13116078>
- Li, Y., Cheng, Y., Mou, Q., & Xian, S. (2020).** Novel cross-entropy based on multi-attribute group decision-making with unknown experts' weights under interval-valued intuitionistic fuzzy environment. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 13(1), 1295–1304. <https://doi.org/10.2991/ijcis.d.200817.001>
- Li, Y., Lian, X., Lu, C., & Wang, Z. (2017).** A Large group decision making approach based on TOPSIS framework with unknown weights information. *MATEC Web of Conferences*, 100(7), 1561–1570. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710002013>
- Li, Y., Shan, Y., & Liu, P. (2015).** An extended TODIM method for group decision making with the interval intuitionistic fuzzy sets. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/672140>
- Li, Y., Wang, X. kang, Wang, J. qiang, Li, J. bo, & Li, L. (2021).** Probability Distribution-Based Processing Model of Probabilistic Linguistic Term Set and Its Application in Automatic Environment Evaluation. *International Journal of Fuzzy Systems*, 23(6), 1697–1713. <https://doi.org/10.1007/S40815-021-01060-7>
- Li, Z., Zhang, Q., Du, X., Qian, X., & Lev, B. (2019).** A hesitant fuzzy multi-criteria group decision making method for college applicants' learning potential evaluation. *Journal of Data, Information and Management*, 1(1–2), 65–75. <https://doi.org/10.1007/s42488-019-00006-x>
- Li, Z., Zhao, T., Wang, J., & Cui, X. (2021).** Two-step allocation of CO2 emission quotas in China based on multi-principles: Going regional to provincial. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127173>
- Liao, H., Qin, R., Gao, C., Wu, X., Hafezalkotob, A., & Herrera, F. (2019).** Score-HeDLiSF: A score function of hesitant fuzzy linguistic term set based on hesitant degrees and linguistic scale functions: An application to unbalanced hesitant fuzzy linguistic MULTIMOORA. *Information Fusion*, 48(May 2018), 39–54. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.08.006>
- Liao, H., Tan, R., & Tang, M. (2020).** An overlap graph model for large-scale group decision making with social trust information considering the multiple roles of experts. *Expert Systems*, 38 (3), 1–20. <https://doi.org/10.1111/exsy.12659>
- Liao, H., Zhang, C., & Luo, L. (2018).** A multiple attribute group decision making method based on two novel intuitionistic multiplicative distance measures. *Information Sciences*, 467, 766–783. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.05.023>
- Lin, M., Zhan, Q., Xu, Z., & Chen, R. (2018).** Group Decision-Making Model with Hesitant Multiplicative Preference Relations Based on Regression Method and Feedback Mechanism. *IEEE Access*, 6, 61130–61150. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2875400>
- Lin, S., & Ding, J. (2009).** Integration of ranked lists via cross entropy Monte Carlo with applications to mRNA and microRNA studies. *Biometrics*, 65(1), 9–18. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2008.01044.x>

- Lin, Y., & Wang, Y. (2018).** Group Decision Making with Consistency of Intuitionistic Fuzzy Preference Relations under Uncertainty. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 5(3), 741–748. <https://doi.org/10.1109/JAS.2016.7510037>
- Lindfors, A. (2021).** Assessing sustainability with multi-criteria methods: A methodologically focused literature review. *Environmental and Sustainability Indicators*, 12, 100–149. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100149>
- Linkov, I., Varghese, A., Jamil, S., Seager, T. P., Kiker, G., & Bridges, T. (2006).** Multi-Criteria Decision Analysis: A Framework for Structuring Remedial Decisions at Contaminated Sites. In *Comparative Risk Assessment and Environmental Decision Making. Nato Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences*, 38. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-2243-3_2
- Liu, A. H., Wan, S., & Dong, J. Y. (2021).** An axiomatic design-based mathematical programming method for heterogeneous multi-criteria group decision making with linguistic fuzzy truth degrees. *Information Sciences*, 571, 649–675. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.04.091>
- Liu, B., Guo, S., Yan, K., Li, L., & Wang, X. (2017).** Double weight determination method for experts of complex multi-attribute large-group decision-making in interval-valued intuitionistic fuzzy environment. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 28(1), 88–96. <https://doi.org/10.21629/JSEE.2017.01.11>
- Liu, B., Huo, T., Wang, X., Shen, Q., & Chen, Y. (2013).** The decision model of the intuitionistic fuzzy group bid evaluation for urban infrastructure projects considering social costs. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(3), 263–273. <https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0283>
- Liu, B., Shen, Y., Chen, Y., Chen, X., & Wang, Y. (2015).** A two-layer weight determination method for complex multi-attribute large-group decision-making experts in a linguistic environment. *Information Fusion*, 23, 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2014.05.001>
- Liu, G. (2014).** Development of a general sustainability indicator for renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 611–621. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.038>
- Liu, G., Rasul, M. G., Amanullah, M. T. O., & Khan, M. M. K. (2012).** Sustainability indicator of renewable energy system based on fuzzy multi-criteria decision making methods. *Advanced Materials Research*, 361–363, 1263–1273. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.361-363.1263>
- Liu, H. C., Wang, L. E., Li, Z., & Hu, Y. P. (2019).** Improving risk evaluation in FMEA with cloud model and hierarchical TOPSIS method. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 27(1), 84–95. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2018.2861719>
- Liu, P., & Cheng, S. (2020).** An Improved MABAC Group Decision-Making Method Using Regret Theory and Likelihood in Probability Multi-Valued Neutrosophic Sets. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 19(5), 1353–1387. <https://doi.org/10.1142/S0219622020500303>
- Liu, P., Liu, P., Wang, P., & Zhu, B. (2019).** An Extended Multiple Attribute Group Decision Making Method Based on q-Rung Orthopair Fuzzy Numbers. *IEEE Access*, 7, 162050–162061. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951357>

- Liu, S., Chan, F. T. S., & Ran, W. (2013).** Multi-attribute group decision-making with multi-granularity linguistic assessment information: An improved approach based on deviation and TOPSIS. *Applied Mathematical Modelling*, 37(24), 10129–10140. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.05.051>
- Liu, S., Chan, F. T. S., & Ran, W. (2016).** Decision making for the selection of cloud vendor: An improved approach under group decision-making with integrated weights and objective/subjective attributes. *Expert Systems with Applications*, 55(2016), 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.01.059>
- Liu, W., & Li, L. (2015).** An approach to determining the integrated weights of decision makers based on interval number group decision matrices. *Knowledge-Based Systems*, 90, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2015.09.029>
- Liu, W., Lin, Z., Wen, F., & Ledwich, G. (2013).** Analysis and optimisation of the preferences of decision-makers in black-start group decision-making. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 7(1), 14–23. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2012.0093>
- Liu, W. Y., Lin, C. C., Chiu, C. R., Tsao, Y. S., & Wang, Q. (2014).** Minimizing the carbon footprint for the time-dependent heterogeneous-fleet vehicle routing problem with alternative paths. *Sustainability (Switzerland)*, 6(7), 4658–4684. <https://doi.org/10.3390/SU6074658>
- Liu, X., Xu, Y., Ge, Y., Zhang, W., & Herrera, F. (2019).** A group decision making approach considering self-confidence behaviors and its application in environmental pollution emergency management. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph16030385>
- Liu, X., Xu, Y., Montes, R., & Herrera, F. (2019).** Social network group decision making: Managing self-confidence-based consensus model with the dynamic importance degree of experts and trust-based feedback mechanism. *Information Sciences*, 505, 215–232. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.07.050>
- Liu, Y., Xu, J., & Luo, H. (2014).** An integrated approach to modelling the economy-society-ecology system in urbanization process. *Sustainability (Switzerland)*, 6(4), 1946–1972. <https://doi.org/10.3390/su6041946>
- Lixin, D., Ying, L., & Zhiguang, Z. (2008).** Selection of logistics service provider based on analytic network process and VIKOR algorithm. *Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC*, 1207–1210. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2008.4525400>
- Lizarralde, R., & Ganzarain, J. (2019).** A Multicriteria Decision Model for the Evaluation and Selection of Technologies in a R&D Centre. *International Journal of Production Management and Engineering*, 7, 101. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2019.11458>
- Lizarralde, R., Ganzarain, J., & Zubizarreta, M. (2020).** Assessment and selection of technologies for the sustainable development of an R&D center. *Sustainability (Switzerland)*, 12(23), 1–23. <https://doi.org/10.3390/su122310087>
- Lopez, A., & Aguilar, J. (2023).** A Data Analysis Smart System for the Optimal Deployment of Nanosensors in the Context of an eHealth Application. *Algorithms 2023, Vol. 16, Page 81*, 16(2), 81. <https://doi.org/10.3390/A16020081>

- López-Casasnovas, G., & Pellisé-Urquiza, L. (2015).** *Resource allocation and priority setting in health care systems* (04; Health Policy Papers).
- Lopez-de Abajo, L., Pérez-Fortes, A. P., Alberti, M. G., Gálvez, J. C., & Ripa, T. (2020).** Sustainability Analysis of the M-30 Madrid Tunnels and Madrid Rio after 14 years of Service Life. *Applied Sciences-Basel*, 10(20). <https://doi.org/10.3390/app10207368>
- Lorge, I., & Solomon, H. (1955).** Two models of group behavior in the solution of eureka-type problems. *Psychometrika*, 20(2), 139–148. <https://doi.org/10.1007/BF02288986>
- Lozano-Oyola, M., Blancas, F. J., González, M., & Caballero, R. (2012).** Sustainable tourism indicators as planning tools in cultural destinations. *Ecological Indicators*, 18, 659–675. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.01.014>
- Lu, W., Liang, C., & Ding, Y. (2008).** A method for determining the objective weights of experts based on evidence similarity in group decision-making. *2008 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2008*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/WiCom.2008.2764>
- Luo, J., Bi, M., & Kuang, H. (2021).** Design of evaluation scheme for social responsibility of china's transportation enterprises from the perspective of green supply chain management. *Sustainability (Switzerland)*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/su13063390>
- Luo, L., Zhang, C., & Liao, H. (2019).** Distance-based intuitionistic multiplicative MULTIMOORA method integrating a novel weight-determining method for multiple criteria group decision making. *Computers and Industrial Engineering*, 131, 82–98. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.03.038>
- Ma, G. (2019).** Analysis of Economic Transformation Capacity and Convergence of Resource-Regenerative Cities—Based on Entropy Weight TOPSIS Method. *American Journal of Industrial and Business Management*, 09(08), 1682–1698. <https://doi.org/10.4236/ajibm.2019.98110>
- Ma, Z., Zhu, J., & Chen, Y. (2020).** A Probabilistic Linguistic Group Decision-Making Method from a Reliability Perspective Based on Evidential Reasoning. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 50(7), 2421–2435. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2018.2815716>
- Ma, Z., Zhu, J., Ponnambalam, K., Chen, Y., & Zhang, S. (2019).** Group Decision-Making with Linguistic Cognition from a Reliability Perspective. *Cognitive Computation*, 11(2), 172–192. <https://doi.org/10.1007/s12559-019-9622-0>
- Malczewski, J., & Ogryczak, W. (1996).** The multiple criteria location problem: 2. Preference-based techniques and interactive decision support. *Environment and Planning A*, 28(1), 69–98. <https://doi.org/10.1068/a280069>
- Mao, X., Wu, H., & Wan, S. (2022).** A Personalized Comprehensive Cloud-Based Method for Heterogeneous MAGDM and Application in COVID-19. *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 131(1). <https://doi.org/10.32604/cmcs.2022.019501>
- Mardani, A., Jusoh, A., & Zavadskas, E. K. (2015).** Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications – Two decades review from 1994 to 2014.

- Expert Systems with Applications*, 42(8), 4126–4148.
<https://doi.org/10.1016/j.ESWA.2015.01.003>
- Mel, J., Gómez, D., de la Cruz, P., & del Caño, A. (2015).** Análisis de sensibilidad y estudio crítico del modelo de evaluación de la sostenibilidad de la Instrucción Española de Hormigón Estructural. *Informes de La Construcción*, 67(539).
<https://doi.org/10.3989/ic.14.126>
- Mendel, J. M., & John, R. I. B. (2002).** Type-2 fuzzy sets made simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 10(2), 117–127. <https://doi.org/10.1109/91.995115>
- Meng, F., An, Q., & Chen, X. (2016).** A consistency and consensus-based method to group decision making with interval linguistic preference relations. *Journal of the Operational Research Society*, 67(11), 1419–1437.
<https://doi.org/10.1057/jors.2016.28>
- Meng, F., Chen, S. M., & Yuan, R. (2020).** Group decision making with heterogeneous intuitionistic fuzzy preference relations. *Information Sciences*, 523, 197–219.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.03.010>
- Meng, F., Tan, C., & Chen, X. (2017).** Multiplicative consistency analysis for interval fuzzy preference relations: A comparative study. *Omega (United Kingdom)*, 68(932), 17–38. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.05.006>
- Meng-Tsung, L., Kuo-Huan, T., Kun-Lung, L., Wen-Hong, L., & Hao-Tang, J. (2015).** Assessment of Social Vulnerability to Climate Change and Its Disaster Prevention in Pingtung County. *Proceedings of the 2015 AASRI International Conference on Circuits and Systems*, 9(Cas), 85–91. <https://doi.org/10.2991/cas-15.2015.21>
- Mianabadi, H., & Afshar, A. (2008).** A new method to evaluate weights of decision makers and its application in water resource management. *The 13th IWRA World Water Congress*, 1–10. <http://196.36.166.88/iwra/Proceedings/Details.aspx?id=5>
- Mohagheghi, V., Mousavi, S. M., Aghamohagheghi, M., & Vahdani, B. (2017).** A new approach of multi-criteria analysis for the evaluation and selection of sustainable transport investment projects under uncertainty: A case study. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 10(1), 605–626.
<https://doi.org/10.2991/ijcis.2017.10.1.41>
- Munier, N. (2011).** Methodology to select a set of urban sustainability indicators to measure the state of the city, and performance assessment. *Ecological Indicators*, 11(5), 1020–1026. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.006>
- Murat, D. (2020).** The Analysis of the Well-Being Levels of OECD Countries With Grey Relational Analysis. *Pamukkale University Journal of Social Sciences Institute*.
- Naji-Azimi, Z., Salari, M., Golden, B., Raghavan, S., & Toth, P. (2010).** Variable neighborhood search for the cost constrained minimum label spanning tree and label constrained minimum spanning tree problems. *Computers and Operations Research*, 37(11), 1952–1964. <https://doi.org/10.1016/j.COR.2009.12.013>
- Nalbantoğlu, Ö. U. (2014).** Dynamic programming. *Methods in Molecular Biology*, 1079, 3–27. https://doi.org/10.1007/978-1-62703-646-7_1

- Nam, S.-Y., Roh, J.-H., Yang, Y.-J., Um, N.-I., Ahn, J.-W., & Kim, J. (2014).** A Study on the Economic Evaluation for a Feasibility Study in Molybdenum Mineral Processing. *Resources Processing*, 61(1), 10–20. <https://doi.org/10.4144/RPSJ.61.10>
- National Council on Public Works Improvement. (1988).** *Fragile Foundations: A Report on America's Public Works*.
- Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., Anderberg, S., & Olsson, L. (2007).** Categorizing tools for sustainability assessment. *Ecological Economics*, 60(3), 498–508. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.023>
- Neumaier, A. (2004).** Complete search in continuous global optimization and constraint satisfaction. In *Acta Numerica* (Vol. 13, pp. 271–369). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/S0962492904000194>
- Niu, S., Lan, Y., Guo, J., & Cheng, X. (2013).** Stochastic rank aggregation. *Uncertainty in Artificial Intelligence - Proceedings of the 29th Conference, UAI 2013*, 478–487.
- Noll, H. H. (2013).** Subjective Social Indicators: Benefits and Limitations for Policy Making—An Introduction to this Special Issue. *Social Indicators Research*, 114(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11205-013-0379-7>
- Oakley, J. E., & O'Hagan, A. (2004).** Probabilistic Sensitivity Analysis of Complex Models: A Bayesian Approach. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 66(3), 751–769. <https://doi.org/10.1111/J.1467-9868.2004.05304.X>
- O'Brien, A. J. (2008).** *FLIHI: Fuzzy Logic Implemented Hill-based Muscle Model*. The George Washington University.
- Okoli, C., & Pawlowski, S. D. (2004).** The Delphi method as a research tool: An example, design considerations and applications. *Information and Management*, 42(1), 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.im.2003.11.002>
- Ölçer, A. I., & Odabaşı, A. Y. (2005).** A new fuzzy multiple attributive group decision making methodology and its application to propulsion/manoeuvring system selection problem. *European Journal of Operational Research*, 166(1 SPEC. ISS.), 93–114. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.02.010>
- Onat, N. C., Kucukvar, M., Halog, A., & Cloutier, S. (2017).** Systems thinking for life cycle sustainability assessment: A review of recent developments, applications, and future perspectives. *Sustainability (Switzerland)*, 9(5), 1–25. <https://doi.org/10.3390/su9050706>
- Orbe, A., Rojí, E., Cuadrado, J., Losada, R., & Zubizarreta, M. (2018).** Sustainable alternative of structural concrete retaining tanks. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 171(3), 133–150. <https://doi.org/10.1680/jensu.15.00062>
- Ormazabal, G., Viñolas, B., & Aguado, A. (2008).** Enhancing Value in Crucial Decisions: Line 9 of the Barcelona Subway. *Journal of Management in Engineering*, 24(4), 265–272. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0742-597x\(2008\)24:4\(265\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0742-597x(2008)24:4(265))
- O'Neill, B. (2001).** Risk aversion in international relations theory. *International Studies Quarterly*, 45(4), 617–640. <https://doi.org/10.1111/0020-8833.00217>

- Palomares, I., & Martínez, L. (2014).** A semisupervised multiagent system model to support consensus-reaching processes. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 22(4), 762–777. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2013.2272588>
- Pang, J., Guan, X., Liang, J., Wang, B., & Song, P. (2020).** Multi-attribute group decision-making method based on multi-granulation weights and three-way decisions. *International Journal of Approximate Reasoning*, 117, 122–147. <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2019.11.008>
- Pang, J., Liang, J., & Song, P. (2017).** An adaptive consensus method for multi-attribute group decision making under uncertain linguistic environment. *Applied Soft Computing Journal*, 58, 339–353. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.04.039>
- Pardo-Bosch, F., Aguado, A., (2015).** Investment priorities for the management of hydraulic structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(10), 1338–1351. <https://doi.org/10.1080/15732479.2014.964267>
- Pardo-Bosch, F., & Aguado, A. (2016).** Sustainability as the key to prioritize investments in public infrastructures. *Environmental Impact Assessment Review*, 60, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.03.007>
- Pardo-Bosch, F., Aguado, A., & Pino, M. (2019).** Holistic model to analyze and prioritize urban sustainable buildings for public services. *Sustainable Cities and Society*, 44, 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.028>
- Parliament of the Republic of South Africa. (1994).** White Paper on Reconstruction and Development Programme. In *Government Gazette No. 16085 Notice No. 1954 of 1994* (Vol. 353, Issue 16085).
- Parreiras, R. O., Ekel, P. Y., Martini, J. S. C., & Palhares, R. M. (2010).** A flexible consensus scheme for multicriteria group decision making under linguistic assessments. *Information Sciences*, 180(7), 1075–1089. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2009.11.046>
- Pawlak, Z. (1982).** Rough sets. *International Journal of Computer & Information Sciences*, 11(5), 341–356. <https://doi.org/10.1007/BF01001956/METRCS>
- Pelissari, R., Oliveira, M. C., Abackerli, A. J., Ben-Amor, S., & Assumpção, M. R. P. (2021).** Techniques to model uncertain input data of multi-criteria decision-making problems: a literature review. *International Transactions in Operational Research*, 28(2), 523–559. <https://doi.org/10.1111/ITOR.12598>
- Pérez, L. G., Mata, F., Chiclana, F., Kou, G., & Herrera-Viedma, E. (2016).** Modelling influence in group decision making. *Soft Computing*, 20(4), 1653–1665. <https://doi.org/10.1007/s00500-015-2002-0>
- Pérez, V. E., Santoyo, A. H., Guerrero, F., León, M. A., da Silva, C. L., & Caballero, R. (2017).** Measuring the sustainability of Cuban tourism destinations considering stakeholders' perceptions. *International Journal of Tourism Research*, 19(3), 318–328. <https://doi.org/10.1002/jtr.2114>
- Pérez, V., Hernández, A., Guerrero, F., León, M. A., da Silva, C. L., & Caballero, R. (2016).** Sustainability Ranking for Cuban Tourist Destinations Based on Composite Indexes. *Social Indicators Research*, 129(1), 425–444. <https://doi.org/10.1007/s11205-015-1110-7>

- Piasecki, M., & Kostyrko, K. (2020).** Development of weighting scheme for indoor air quality model using a multi-attribute decision making method. *Energies*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/en13123120>
- Piñero, I., San-José, J. T., Rodríguez, P., & Losáñez, M. M. (2017).** Multi-criteria decision-making for grading the rehabilitation of heritage sites. Application in the historic center of La Habana. *Journal of Cultural Heritage*, 26, 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.01.012>
- Pons, O., & Aguado, A. (2012).** Integrated value model for sustainable assessment applied to technologies used to build schools in Catalonia, Spain. *Building and Environment*, 53, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.007>
- Pramanik, S., Dalapati, S., Alam, S., Smarandache, F., & Roy, T. K. (2018).** NS-cross entropy-based MAGDM under single-valued neutrosophic set environment. *Information (Switzerland)*, 9(2), 1–21. <https://doi.org/10.3390/info9020037>
- Pons, O., & de La Fuente, A. (2013).** Integrated sustainability assessment method applied to structural concrete columns. *Construction and Building Materials*, 49, 882–893. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.009>
- Pons, O. (2014).** Assessing the sustainability of prefabricated buildings. In Pacheco Torgal, F and Cabeza, LF and Labrincha, J and De Magalhaes, A (Ed. 1), *Eco-Efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), eco-labelling and case studies*. Woodhead PUBL LTD. <https://doi.org/10.1533/9780857097729.3.434>
- Pons, O., Nadal, A., Sanyé-Mengual, E., Llorach-Massana, P., Cuerva, E., Sanjuan-Delmàs, D., Muñoz, P., Oliver-Solà, J., Planas, C., & Rovira, M. R. (2015).** Roofs of the Future: Rooftop Greenhouses to Improve Buildings Metabolism. *Procedia Engineering*, 123, 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.084>
- Pons, O., de la Fuente, A., & Aguado, A. (2016).** The Use of MIVES as a Sustainability Assessment MCDM Method for Architecture and Civil Engineering Applications. *Sustainability*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/su8050460>
- Pons, O., de La Fuente, A., Armengou, J., & Aguado, A. (2017).** Towards the sustainability in the design of wind towers. *Energy Procedia*, 115, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.005>
- Pons, O., Habibi, S., & Peña, D. (2018).** Sustainability assessment of household waste based solar control devices for workshops in primary schools. *Sustainability (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/su10114071>
- Pons, O., Franquesa, J., & Hosseini, S. M. A. (2019).** Integrated Value Model to assess the sustainability of active learning activities and strategies in architecture lectures for large groups. *Sustainability (Switzerland)*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/su11102917>
- Pons, O., Casanovas-Rubio, M. M., Armengou, J., & de la Fuente, A. (2021).** Sustainability-Driven Decision-Making Model: Case Study of Fiber-Reinforced Concrete Foundation Piles. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(10), 04021116. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0002073](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0002073)
- PSC. (2012).** *Canadian Infrastructure Report Card, Volume 1: 2012 - Municipal Roads and Water Systems*. Canadian Infrastructure Report Card.

- PSC. (2016). *Informing the Future*.
- PSC. (2019). *The 2019 Canada Infrastructure Report Card*.
- Pujadas, P., Cavalaro, S. H. P., & Aguado, A. (2019). Mives multicriteria assessment of urban-pavement conditions: application to a case study in Barcelona. *Road Materials and Pavement Design*, 20(8), 1827–1843.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1474788>
- Pujadas, P., Pardo-Bosch, F., Aguado-Renter, A., & Aguado, A. (2017). MIVES multi-criteria approach for the evaluation, prioritization, and selection of public investment projects. A case study in the city of Barcelona. *Land Use Policy*, 64, 29–37.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.02.014>
- Qi, X., Liang, C., & Zhang, J. (2015). Generalized cross-entropy based group decision making with unknown expert and attribute weights under interval-valued intuitionistic fuzzy environment. *Computers and Industrial Engineering*, 79, 52–64.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.10.017>
- Qi, X. W., Zhang, J. L., & Liang, C. Y. (2018). Multiple attributes group decision-making under interval-valued dual hesitant fuzzy unbalanced linguistic environment with prioritized attributes and unknown decision-makers' weights. *Information (Switzerland)*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/info9060145>
- Qin, Q., Liang, F., Li, L., Chen, Y. W., & Yu, G. F. (2017). A TODIM-based multi-criteria group decision making with triangular intuitionistic fuzzy numbers. *Applied Soft Computing Journal*, 55, 93–107. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.01.041>
- Rădulescu, R. Mannion, P., Diederik M. & Nowé, A. (2020). Multi-objective multi-agent decision making: a utility-based analysis and survey. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 34(1), 1-52. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.02964>
- Rahdari, A. H., & Anvary Rostamy, A. A. (2015). Designing a general set of sustainability indicators at the corporate level. *Journal of Cleaner Production*, 108(April 2018), 757–771. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.108>
- Ramanathan, R., & Ganesh, L. S. (1994). Group preference aggregation methods employed in AHP: An evaluation and an intrinsic process for deriving members' weightages. *European Journal of Operational Research*, 79(2), 249–265.
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90356-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90356-5)
- Ramaswamy, R., Orlin, J. B., & Chakravarti, N. (2005). Sensitivity analysis for shortest path problems and maximum capacity path problems in undirected graphs. *Mathematical Programming*, 102(2), 355–369. <https://doi.org/10.1007/s10107-004-0517-8>
- Ran, L., Tan, X., Xu, Y., Zhang, K., Chen, X., Zhang, Y., Li, M., & Zhang, Y. (2021). The application of subjective and objective method in the evaluation of healthy cities: A case study in Central China. *Sustainable Cities and Society*, 65(July 2019).
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102581>
- Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P. (2012). Teaching-Learning-Based Optimization: An optimization method for continuous non-linear large scale problems. *Information Sciences*, 183(1), 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.08.006>

- RazaviToosi, S. L., & Samani, J. M. V. (2019).** A Fuzzy Group Decision Making Framework Based on ISM-FANP-FTOPSIS for Evaluating Watershed Management Strategies. *Water Resources Management*, 33(15), 5169–5190. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02423-4>
- Regan, H. M., Colyvan, M., & Markovchick-Nicholls, L. (2006).** A formal model for consensus and negotiation in environmental management. *Journal of Environmental Management*, 80(2), 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.09.004>
- Ren, Z., Xu, Z., & Wang, H. (2018).** Multi-criteria group decision-making based on quasi-order for dual hesitant fuzzy sets and professional degrees of decision makers. *Applied Soft Computing Journal*, 71, 20–35. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.06.027>
- Reuters, T. (2017).** *Web of Science*. <https://web.archive.org/web/20170224013916/http://wokinfo.com/citationconnection/realfacts>
- Rodríguez, R. M., Labella, Á., Tré, G. de, & Martínez, L. (2018).** A large scale consensus reaching process managing group hesitation. *Knowledge-Based Systems*, 159, 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.06.009>
- Rowley, Hazel V., Gregory M., Lundie S. & Moored S. J. (2012).** Aggregating sustainability indicators: Beyond the weighted sum. *Journal of environmental management* 111, 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.004>
- Roy, B. (1981).** The Optimisation Problem Formulation: Criticism and Overstepping. *The Journal of the Operational Research Society*, 32(6), 427. <https://doi.org/10.2307/2581530>
- Rutgers, M. (2008).** Sorting Out Public Values? On the Contingency of Value Classification in Public Administration. *Administrative Theory & Praxis*, 92–113.
- Saaty, T. L. (1980).** *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill.
- Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J.E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R. & Doré (2008).** Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(1), 163-174. <https://doi.org/10.1051/agro:2007043>
- Saffarzadeh, S., Hadi-Vencheh, A., & Jamshidi, A. (2019).** Weight determination and ranking priority in interval group MCDM. *Scientia Iranica*, 27(6), 3242-3252. <https://doi.org/10.24200/sci.2019.51133.2022>
- SAICE. (2006).** *The SAICE Infrastructure Report Card for South Africa: 2006*.
- SAICE. (2011).** *SAICE Infrastructure Report Card for South Africa 2011*.
- SAICE. (2017).** *SAICE 2017 Infrastructure report card for South Africa*.
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., & Kendall, A. (2019).** A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, 207, 542–559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014>

- Samanlioglu, F., Taskaya, Y. E., Gulen, U. C., & Cokcan, O. (2018).** A Fuzzy AHP-TOPSIS-Based Group Decision-Making Approach to IT Personnel Selection. *International Journal of Fuzzy Systems*, 20(5), 1576–1591. <https://doi.org/10.1007/s40815-018-0474-7>
- Sánchez-Garrido, A. J., & Yepes, V. (2020).** Multi-criteria assessment of alternative sustainable structures for a self-promoted, single-family home. *Journal of Cleaner Production*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120556>
- San-José, J. T., & Cuadrado, J. (2010).** Industrial building design stage based on a system approach to their environmental sustainability. *Construction and Building Materials*, 24(4), 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.019>
- San-José, J. T., & Garrucho, I. (2010).** A system approach to the environmental analysis of industrial buildings. *Building and Environment*, 45(3), 673–683. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.012>
- Sanaei, S., Chambost, V., & Stuart, P. R. (2018).** Systematic assessment of triticale-based biorefinery strategies: sustainability assessment using multi-criteria decision-making (MCDM). *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 12, 73–86. <https://doi.org/10.1002/BBB.1482>
- Scherer, A.G., & Voegtlin, C. (2020).** Corporate governance for responsible innovation: Approaches to corporate governance and their implications for sustainable development. *Academy of Management Perspectives*, 34(2), 182–208. <https://doi.org/10.5465/amp.2017.0175>
- Schielke, H. J., Fishman, J. L., Osatuke, K., & Stiles, W. B. (2009).** Creative consensus on interpretations of qualitative data: The ward method. *Psychotherapy Research*, 19(4–5), 558–565. <https://doi.org/10.1080/10503300802621180>
- Schwenk R., C., & Cosier, R. (1993).** Effects of Consensus and Devil’s Advocacy on Strategic Decision-Making. *Journal of applied social psychology*, 23(2) 126–139.
- Seixas, B. V., Dionne, F., & Mitton, C. (2021).** Practices of decision making in priority setting and resource allocation: a scoping review and narrative synthesis of existing frameworks. In *Health Economics Review*, 11(1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s13561-020-00300-0>
- Sellak, H., Ouhbi, B., Frikh, B., & Ikken, B. (2019).** Expertise-based consensus building for MCGDM with hesitant fuzzy linguistic information. *Information Fusion*, 50, 54–70. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.10.003>
- Seraj, S., Nikravan, M., Ramezani pour, A. A., & Zendehdel, P. (2020).** Evaluation of the application of municipal solid waste incinerator (MSWI) ash in civil engineering using a sustainability approach. *Detritus*, 9, 113–124. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13922>
- Shafer, G. (1976).** A Mathematical Theory of Evidence. Princeton University Press.
- Shapley, L. S., & Shubik, M. (1954).** A Method for Evaluating the Distribution of Power in a Committee System. *American Political Science Review*, 48(3), 787–792. <https://doi.org/10.2307/1951053>

- Shi, Y., Lu, Z., Xu, L., & Zhou, Y. (2020).** Novel decoupling method for time-dependent reliability-based design optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 61(2), 507–524. <https://doi.org/10.1007/S00158-019-02371-Y>
- Shih, H. S., Shyur, H. J., & Lee, E. S. (2007).** An extension of TOPSIS for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(7–8), 801–813. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.03.023>
- Silva, L. G. de O., & de Almeida-Filho, A. T. (2018).** A new PROMETHEE-based approach applied within a framework for conflict analysis in Evidence Theory integrating three conflict measures. *Expert Systems with Applications*, 113, 223–232. <https://doi.org/10.1016/j.ESWA.2018.07.002>
- Slevin, D. P., Boone, L. W., Russo, E. M., & Allen, R. S. (1998).** CONFIDE: A Collective Decision-Making Procedure Using Confidence Estimates of Individual Judgements. *Group Decision and Negotiation*, 7(2), 179–194. <https://doi.org/10.1023/A:1008650524782>
- Słowiński, R., Greco, S. & Matarazzo, B. (2002).** Axiomatization of utility, outranking and decision rule preference models for multiple-criteria classification problems under partial inconsistency with the dominance principle. *Control and Cybernetics* 31(4), 1005-1035.
- Smol, M., Kulczycka, J., & Avdiushchenko, A. (2017).** Circular economy indicators in relation to eco-innovation in European regions. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(3), 669–678. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1323-8>
- Song, J., Li, K., Ren, J., Yang, W., & Liu, X. (2020).** Holistic suitability for regional biomass power generation development in China: An application of matter-element extension model. *Journal of Environmental Management*, 276, 111294. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111294>
- Song, M., Hao, X., Zhang, L., Song, M., Cheng, J., Li, D., Zhang, W., & Wu, J. (2021).** Transformation Performance and Subsystem Coupling of Resource-based Cities in China: An Analysis Based on the Support-pressure Framework. *Integrated Environmental Assessment and Management*. <https://doi.org/10.1002/ieam.4502>
- Srdjevic, B., Srdjevic, Z., Blagojevic, B., & Suvocarev, K. (2013).** A two-phase algorithm for consensus building in AHP-group decision making. *Applied Mathematical Modelling*, 37(10–11), 6670–6682. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.01.028>
- Stanitsas, M., Kirytopoulos, K., & Leopoulos, V. (2021).** Integrating sustainability indicators into project management: The case of construction industry. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123774. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123774>
- Sun, G. (2015).** A Group Decision Making Method Based on Projection Method and Score Function under IVIFS Environment. *British Journal of Mathematics & Computer Science*, 9(1), 62–72. <https://doi.org/10.9734/bjmcs/2015/9549>
- Sun, P., Chen, S., & Zhi, Y. (2021).** Multiple Attribute Variable Weight Fuzzy Decision-Making Based on Optimistic Coefficient Method. *International Journal of Fuzzy Systems*, 23(2), 573–583. <https://doi.org/10.1007/s40815-020-01020-7>
- Sun, Y., & Huang, H. F. (2013).** Algorithm of adjusting weights of decision-makers and attribute in multi-attribute group decision-making. *2013 25th Chinese Control and*

Decision Conference, CCDC 2013, 4144–4148.
<https://doi.org/10.1109/CCDC.2013.6561677>

- Tabatabaei, M. H., Amiri, M., Khatami Firouzabadi, S. M. A., Ghahremanloo, M., Keshavarz-Ghorabae, M., & Saparauskas, J. (2019).** A new group decision-making model based on bwm and its application to managerial problems. *Transformations in Business and Economics*, 18(2), 197–214.
- Tan, X., Zhu, J., & Zhang, Y. (2020).** A consensus reaching process with quantum subjective adjustment in linguistic group decision making. *Information Sciences*, 533, 150–168. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.05.003>
- Tan, Z., Ju, L., Yu, X., Zhang, H., & Yu, C. (2014).** Selection ideal coal suppliers of thermal power plants using the matter-element extension model with integrated empowerment method for sustainability. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/302748>
- Tang, M., Liao, H., Xu, J., Streimikiene, D., & Zheng, X. (2020).** Adaptive consensus reaching process with hybrid strategies for large-scale group decision making. *European Journal of Operational Research*, 282(3), 957–971. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.10.006>
- Tarrago-Garay, N., Royo-Abancens, F.-J., & Torreira-de-la-Hera, I. (2020).** Vulnerability of infrastructures to climate events. Road flooding. *DYNA*, 95(6), 661–667. <https://doi.org/10.6036/9650>
- Thaler, R. H. (2015).** *Misbehaving: the making of behavioral economics*. W.W. Norton & Company.
- Theil, H. (1963).** On the Symmetry Approach to the Committee Decision Problem. *Management Science*, 9(3), 380–393. <https://doi.org/10.1287/mnsc.9.3.380>
- Thong, N. T., Lan, L. T. H., Chou, S. Y., Son, L. H., Dong, D. D., & Ngan, T. T. (2020).** An extended TOPSIS method with unknown weight information in dynamic neutrosophic environment. *Mathematics*, 8(3), 1–15. <https://doi.org/10.3390/math8030401>
- Thorpe, D. S., & Kumar, A. (2002).** A life cycle model for asset investment decision making. *Proceedings of the International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering*, 576–583. [https://doi.org/10.1061/40632\(245\)73](https://doi.org/10.1061/40632(245)73)
- Thurstone, L. L. (1927a).** A law of comparative judgment. *Psychological Review*, 34(4), 273–286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1037/h0070288>
- Thurstone, L. L. (1927b).** The method of paired comparisons for social values. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, 21(4), 384–400. <https://doi.org/10.1037/h0065439>
- Tian, Z. peng, Nie, R. xin, & Wang, J. qiang. (2019).** Social network analysis-based consensus-supporting framework for large-scale group decision-making with incomplete interval type-2 fuzzy information. *Information Sciences*, 502, 446–471. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.06.053>

- Toloie-Eshlaghy, A., & Farokhi, E. N. (2011).** Measuring the Importance and the Weight of Decision Makers in the Criteria Weighting Activities of Group Decision Making Process. *American Journal of Scientific Research*, 24(24), 6–12.
- Tong, X., & Wang, Z. J. (2016).** A group decision framework with intuitionistic preference relations and its application to low carbon supplier selection. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(9).
<https://doi.org/10.3390/ijerph13090923>
- Torra, V., & Narukawa, Y. (2009).** On hesitant fuzzy sets and decision. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 1378–1382.
<https://doi.org/10.1109/FUZZY.2009.5276884>
- Trentin, A. W. da S., Reddy, K. R., Kumar, G., Chetri, J. K., & Thome, A. (2019).** Quantitative Assessment of Life Cycle Sustainability (QUALICS): Framework and its application to assess electrokinetic remediation. *CHEMOSPHERE*, 230, 92–106.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.200>
- Tuan, N. A., Hue, T. T., Lien, L. T., Thao, T. D., Quyet, N. D., Van, L. H., & Anh, L. T. (2020).** A new integrated MCDM approach for lecturers' research productivity evaluation. *Decision Science Letters*, 9(3), 355–364.
<https://doi.org/10.5267/J.DSL.2020.5.001>
- United Nations Environment Programme. (2022).** *International good practice principles for sustainable infrastructure.*
- Vadrevu, K. P., Eaturu, A., & Badarinath, K. V. S. (2010).** Fire risk evaluation using multicriteria analysis-a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 166(1–4), 223–239. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0997-3>
- Vahdani, B., Mousavi, S. M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2011).** Group decision making based on novel fuzzy modified TOPSIS method. *Applied Mathematical Modelling*, 35(9), 4257–4269. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.02.040>
- van den Honert, R. C. (2001).** Decisional Power in Group Decision Making: A Note on the Allocation of Group Members' Weights in the Multiplicative AHP and SMART. *Group Decision and Negotiation*, 10(3), 275–286.
<https://doi.org/10.1023/A:1011201501379>
- Van Zanten, Jan Anton, and & Van Tulder (2018).** Multinational enterprises and the Sustainable Development Goals: An institutional approach to corporate engagement. *Journal of International Business Policy*, 1(3), 208–233.
- Vasant, P., & Bhattacharya, A. (2007).** Sensing degree of fuzziness in MCDM model using modified flexible S-curve MF. *International Journal of Systems Science*, 38(4), 279–291. <https://doi.org/10.1080/00207720601117108>
- Villegas, N., Cruz Salvador, L. C., dos Santos, A.C.P., & Madero, Y. S. (2021).** A proposal to compare urban infrastructure using multi-criteria analysis. *Land Use Policy*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105173>
- Viñolas B., Aguado A., Josa, A., Villegas N., Fernández M. A. (2009).** Application of the value analysis for the integral and objective assessment of university professors. *Revista de universidad y sociedad del conocimiento*, 6(1), 22–37.

- Viñolas, B., Cortés, F., Marques, A., Josa, A., & Aguado, A. (2009).** Mives: Modelo Integrado De Valor Para Evaluaciones De Sostenibilidad-Icsmm 2009. *II Congrès Internacional de Mesura i Modelitzaci  de La Sostenibilitat*, 24. <https://core.ac.uk/download/pdf/41762288.pdf>
- von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1944).** *Theory of games and economic behavior*. Princeton University Press.
- Voorbraak, F. (1989).** A computationally efficient approximation of Dempster-Shafer theory. *International Journal of Man-Machine Studies*, 30(5), 525–536. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(89\)80032-X](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(89)80032-X)
- Waas, T., Hug , J., Block, T., Wright, T., Benitez-Capistros, F., & Verbruggen, A. (2014).** Sustainability assessment and indicators: Tools in a decision-making strategy for sustainable development. *Sustainability (Switzerland)*, 6(9), 5512–5534. <https://doi.org/10.3390/su6095512>
- Wan, S., Cheng, X., Chen, C., & Dong, J. (2021).** L-R geometric consistency definition of triangular multiplicative preference relation in group decision making. *Fuzzy Sets and Systems*, 409, 85–113. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2020.07.006>
- Wan, S., Huang Cheng, W. B., & Dong, J. Y. (2021).** Interactive multi-criteria group decision-making with probabilistic linguistic information for emergency assistance of COVID-19. *Applied Soft Computing*, 107. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107383>
- Wan, S. P., Wang, F., Lin, L. L., & Dong, J. Y. (2015).** An intuitionistic fuzzy linear programming method for logistics outsourcing provider selection. *Knowledge-Based Systems*, 82, 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2015.02.027>
- Wan, S. P., Wang, Q. Y., & Dong, J. Y. (2013).** The extended VIKOR method for multi-attribute group decision making with triangular intuitionistic fuzzy numbers. *Knowledge-Based Systems*, 52, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2013.06.019>
- Wan, S. P., Xu, G. L., Wang, F., & Dong, J. Y. (2015).** A new method for Atanassov's interval-valued intuitionistic fuzzy MAGDM with incomplete attribute weight information. *Information Sciences*, 316(168), 329–347. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.04.019>
- Wan, S. ping, Xu, G. li, & Dong, J. ying. (2016).** A novel method for group decision making with interval-valued Atanassov intuitionistic fuzzy preference relations. *Information Sciences*, 372, 53-71. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.08.019>
- Wan, S., Wang, F., & Dong, J. (2017).** Additive consistent interval-valued Atanassov intuitionistic fuzzy preference relation and likelihood comparison algorithm based group decision making. *European Journal of Operational Research*, 263(2), 571–582. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.05.022>
- Wan, S., Wang, F., & Dong, J. (2018).** A group decision-making method considering both the group consensus and multiplicative consistency of interval-valued intuitionistic fuzzy preference relations. *Information Sciences*, 466, 109–128. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.07.031>
- Wan, S., Xu, G. li, & Dong, J. ying. (2020).** An Atanassov intuitionistic fuzzy programming method for group decision making with interval-valued Atanassov intuitionistic

- fuzzy preference relations. *Applied Soft Computing Journal*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106556>
- Wan, S., Yan, J., & Dong, J. Y. (2022a).** Personalized individual semantics based consensus reaching process for large-scale group decision making with probabilistic linguistic preference relations and application to COVID-19 surveillance. *Expert Systems with Applications*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116328>
- Wan, S., Yan, J., & Dong, J. Y. (2022b).** Trust and personalized individual semantics based fusion method for heterogeneous multi-criteria group decision making and application to live streaming commerce. *Expert Systems with Applications*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118151>
- Wan, S., Yuan, H., & Dong, J. (2021).** Decision making with incomplete interval multiplicative preference relations based on stochastic program and interval category. *Information Sciences*, 570, 403–427. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.03.005>
- Wan, S., Zhong, L., & Dong, J. (2020).** A New Method for Group Decision Making with Hesitant Fuzzy Preference Relations Based on Multiplicative Consistency. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 28(7), 1449–1463. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2019.2914008>
- Wan, S., Zou, W. C., Dong, J. Y., & Martínez, L. (2021).** A probabilistic linguistic dominance score method considering individual semantics and psychological behavior of decision makers. *Expert Systems with Applications*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115372>
- Wan, S., Zou, W. C., Dong, J. Y., & Martínez, L. (2022).** A consensual method for multi-criteria group decision-making with linguistic intuitionistic information. *Information Sciences*, 582, 797–832. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.10.030>
- Wang, B., Liang, J., & Qian, Y. (2015).** Determining decision makers' weights in group ranking: a granular computing method. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 6(3), 511–521. <https://doi.org/10.1007/s13042-014-0278-5>
- Wang, F., & Mao, J. (2019).** Approach to Multicriteria Group Decision Making with Z-Numbers Based on TOPSIS and Power Aggregation Operators. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3014387>
- Wang, J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F. and Zhao, J.H. (2009).** Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(9), 2263–2278.
- Wang, M., Zhou, T., & Wang, D. (2020).** Tracking the evolution processes of smart cities in China by assessing performance and efficiency. *Technology in Society*, 63(March), 101353. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101353>
- Wang, P., Xu, X., & Huang, S. (2019).** An Improved Consensus-Based Model for Large Group Decision Making Problems Considering Experts with Linguistic Weighted Information. *Group Decision and Negotiation*, 28(3), 619–640. <https://doi.org/10.1007/s10726-019-09615-8>

- Wang, Q., Dai, H. N., & Wang, H. (2017).** A smart MCDM framework to evaluate the impact of air pollution on city sustainability: A case study from China. *Sustainability*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/su9060911>
- Wang, X., Geng, Y., Yao, P., & Yang, M. (2019).** Multiple attribute group decision making approach based on extended VIKOR and linguistic neutrosophic Set. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 36(1), 149–160. <https://doi.org/10.3233/JIFS-181066>
- Wang, Y., Chen, H., & Zhou, L. (2013).** Logarithm Compatibility of Interval Multiplicative Preference Relations with an Application to Determining the Optimal Weights of Experts in the Group Decision Making. *Group Decision and Negotiation*, 22(4), 759–772. <https://doi.org/10.1007/s10726-012-9291-9>
- Wang, Z., Gao, J. M., Wang, R. X., Chen, K., Gao, Z. Y., & Jiang, Y. (2018).** Failure mode and effects analysis using Dempster-Shafer theory and TOPSIS method: Application to the gas insulated metal enclosed transmission line (GIL). *Applied Soft Computing*, 70, 633–647. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2018.06.015>
- Ward, F. A. (2012).** Cost-benefit and water resources policy: a survey. *Water Policy*, 14(2), 250–280. <https://doi.org/10.2166/WP.2011.021>
- Wei, C., & Wu, J. (2019).** TODIM method for probabilistic linguistic multiple attribute group decision making based on the similarity measures and entropy. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 37(5), 7025–7037. <https://doi.org/10.3233/JIFS-191164>
- Wu, B., Zong, L., Yan, X., & Guedes Soares, C. (2018).** Incorporating evidential reasoning and TOPSIS into group decision-making under uncertainty for handling ship without command. *Ocean Engineering*, 164, 590–603. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.06.054>
- Wu, C., Zhang, Z., & Zhong, W. (2019).** A Group Decision-Making Approach Based on DST and AHP for New Product Selection under Epistemic Uncertainty. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4635374>
- Wu, J., Chiclana, F., & Herrera-Viedma, E. (2015).** Trust based consensus model for social network in an incomplete linguistic information context. *Applied Soft Computing Journal*, 35, 827–839. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.02.023>
- Wu, P., Liu, J., Zhou, L., & Chen, H. (2020).** Algorithm for improving additive consistency of linguistic preference relations with an integer optimization model. *Applied Soft Computing Journal*, 86, 105955. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105955>
- Wu, Q., Zhou, L., Chen, Y., & Chen, H. (2019).** An integrated approach to green supplier selection based on the interval type-2 fuzzy best-worst and extended VIKOR methods. *Information Sciences*, 502, 394–417. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.06.049>
- Wu, R., Yang, D., & Chen, J. (2014).** Social life cycle assessment revisited. *Sustainability (Switzerland)*, 6(7), 4200–4226. <https://doi.org/10.3390/su6074200>
- Wu, W., Kou, G., & Peng, Y. (2018).** A consensus facilitation model based on experts' weights for investment strategy selection. *Journal of the Operational Research Society*, 69(9), 1435–1444. <https://doi.org/10.1080/01605682.2017.1398203>

- Wu, W., Kou, G., Peng, Y., & Ergu, D. (2012).** Improved AHP-group decision making for investment strategy selection. *Technological and Economic Development of Economy*, 18(2), 299–316. <https://doi.org/10.3846/20294913.2012.680520>
- Wu, Z., Xu, J., Jiang, X., & Zhong, L. (2019).** Two MAGDM models based on hesitant fuzzy linguistic term sets with possibility distributions: VIKOR and TOPSIS. *Information Sciences*, 473, 101–120. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.09.038>
- Xu, C., Wang, S., Zhou, Y., Wang, L., & Liu, W. (2016).** A comprehensive quantitative evaluation of new sustainable urbanization level in 20 Chinese urban agglomerations. *Sustainability (Switzerland)*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/su8020091>
- Xu, G. L. (2018).** A Consensus Reaching Model with Minimum Adjustments in Interval-Valued Intuitionistic MAGDM. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9070813>
- Xu, G. L., Wan, S. P., & Dong, J. Y. (2020).** An Entropy-Based Method for Probabilistic Linguistic Group Decision Making and its Application of Selecting Car Sharing Platforms. *Informatica (Netherlands)*, 31(3), 621–658. <https://doi.org/10.15388/20-INFOR423>
- Xu, G. li, & Liu, F. (2013).** An approach to group decision making based on interval multiplicative and fuzzy preference relations by using projection. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 3929–3943. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.08.007>
- Xu, J., & Wu, Z. (2013).** A maximizing consensus approach for alternative selection based on uncertain linguistic preference relations. *Computers and Industrial Engineering*, 64(4), 999–1008. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.01.009>
- Xu, Y., Gao, P., & Martínez, L. (2019).** An interindividual iterative consensus model for fuzzy preference relations. *International Journal of Intelligent Systems*, 34(8), 1864–1888. <https://doi.org/10.1002/int.22122>
- Xu, Y., Rui, D., & Wang, H. (2017).** A dynamically weight adjustment in the consensus reaching process for group decision-making with hesitant fuzzy preference relations. *International Journal of Systems Science*, 48(6), 1311–1321. <https://doi.org/10.1080/00207721.2016.1255803>
- Xu, Y., Sun, H., & Wang, H. (2016).** Optimal consensus models for group decision making under linguistic preference relations. *International Transactions in Operational Research*, 23(6), 1201–1228. <https://doi.org/10.1111/itor.12154>
- Xu, Z. (2005a).** An overview of methods for determining OWA weights. *International Journal of Intelligent Systems*, 20(8), 843–865. <https://doi.org/10.1002/int.20097>
- Xu, Z. (2005b).** On Method for Uncertain Multiple Attribute Decision Making Problems with Uncertain Multiplicative Preference Information on Alternatives. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 4, 131–139.
- Xu, Z. (2008).** Group decision making based on multiple types of linguistic preference relations. *Information Sciences*, 178(2), 452–467. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2007.05.018>

- Xu, Z., & Cai, X. (2012).** Minimizing Group Discordance Optimization Model for Deriving Expert Weights. *Group Decision and Negotiation*, 21(6), 863–875. <https://doi.org/10.1007/s10726-011-9253-7>
- Xu, Z., & Cai, X. (2014).** Deriving Weights from Interval Multiplicative Preference Relations in Group Decision Making. *Group Decision and Negotiation*, 23(4), 695–713. <https://doi.org/10.1007/s10726-012-9315-5>
- Xu, Z., & Zhou, W. (2017).** Consensus building with a group of decision makers under the hesitant probabilistic fuzzy environment. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 16(4), 481–503. <https://doi.org/10.1007/s10700-016-9257-5>
- Xue, M., Fu, C., & Yang, S. L. (2020).** Group consensus reaching based on a combination of expert weight and expert reliability. *Applied Mathematics and Computation*, 369, 124902. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.124902>
- Yager, R. R. (1991).** Connectives and quantifiers in fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 40(1), 39–75. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(91\)90046-S](https://doi.org/10.1016/0165-0114(91)90046-S)
- Yang, C., Wang, Q., Peng, W., & Zhu, J. (2020).** A multi-criteria group decision-making approach based on improved BWM and MULTIMOORA with normal wiggly hesitant fuzzy information. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 13(1), 366–381. <https://doi.org/10.2991/ijcis.d.200325.001>
- Yang, Q., & Du, P. (2015).** A Straightforward Approach for Determining the Weights of Decision Makers Based on Angle Cosine and Projection Method. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 9(10), 3328–3334.
- Yang, Q., Du, P. A., Wang, Y., & Liang, B. (2017).** A rough set approach for determining weights of decision makers in group decision making. *PLoS ONE*, 12(2), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172679>
- Yang, Q., Li, Y. L., & Chin, K. S. (2019).** Constructing novel operational laws and information measures for proportional hesitant fuzzy linguistic term sets with extension to PHFL-VIKOR for group decision making. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 12(2), 998–1018. <https://doi.org/10.2991/ijcis.d.190902.001>
- Yang, Y., & He, J. (2021).** A novel method based on fixed point iteration and improved topsis method for multi-attribute group decision making. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 17(1), 15–29. <https://doi.org/10.24507/ijic.17.01.15>
- Yaylaci, E. D., & Düzgün, H. Ş. (2017).** Evaluating the mine plan alternatives with respect to bottom-up and top-down sustainability criteria. *Journal of Cleaner Production*, 167, 837–849. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.248>
- Ye, J. (2013a).** Multiple Attribute Group Decision-Making Methods with Completely Unknown Weights in Intuitionistic Fuzzy Setting and Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Setting. *Group Decision and Negotiation*, 22(2), 173–188. <https://doi.org/10.1007/s10726-011-9255-5>
- Ye, J. (2013b).** Multiple attribute group decision-making methods with unknown weights in intuitionistic fuzzy setting and interval-valued intuitionistic fuzzy setting.

International Journal of General Systems, 42(5), 489–502
<https://doi.org/10.1080/03081079.2013.775127>

- Ye, J. (2014).** Multiple attribute group decision-making method with completely unknown weights based on similarity measures under single valued neutrosophic environment. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 27(6), 2927–2935. <https://doi.org/10.3233/IFS-141252>
- Yu, L., & Lai, K. K. (2011).** A distance-based group decision-making methodology for multi-person multi-criteria emergency decision support. *Decision Support Systems*, 51(2), 307–315. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2010.11.024>
- Yue, C. (2017).** Entropy-based weights on decision makers in group decision-making setting with hybrid preference representations. *Applied Soft Computing Journal*, 60, 737–749. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.07.033>
- Yue, Z. (2011a).** A method for group decision-making based on determining weights of decision makers using TOPSIS. *Applied Mathematical Modelling*, 35(4), 1926–1936. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.001>
- Yue, Z. (2011b).** An extended TOPSIS for determining weights of decision makers with interval numbers. *Knowledge-Based Systems*, 24(1), 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2010.07.014>
- Yue, Z. (2011c).** Deriving decision maker's weights based on distance measure for interval-valued intuitionistic fuzzy group decision making. *Expert Systems with Applications*, 38(9), 11665–11670. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.03.046>
- Yue, Z. (2012a).** Approach to group decision making based on determining the weights of experts by using projection method. *Applied Mathematical Modelling*, 36(7), 2900–2910. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.068>
- Yue, Z. (2012b).** Developing a straightforward approach for group decision making based on determining weights of decision makers. *Applied Mathematical Modelling*, 36(9), 4106–4117. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.11.041>
- Yue, Z. (2012c).** Extension of TOPSIS to determine weight of decision maker for group decision making problems with uncertain information. *Expert Systems with Applications*, 39(7), 6343–6350. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.12.016>
- Yue, Z. (2013).** An intuitionistic fuzzy projection-based approach for partner selection. *Applied Mathematical Modelling*, 37(23), 9538–9551. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.05.007>
- Yue, Z. (2014).** TOPSIS-based group decision-making methodology in intuitionistic fuzzy setting. *Information Sciences*, 277, 141–153. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.02.013>
- Yusoff, N. Y. M., & Bekhet, H. A. (2020).** Developing and evaluating the sustainable energy security index and its performance in Malaysia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(3), 444–455. <https://doi.org/10.32479/ijeep.8912>
- Zadeh, L. A. (1965).** Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

- Zardeini Hosein, Z., Yousefie, A., & Mohammad Tabatabaei Mehrizi, S. (2014).** Evaluating and ranking performance by combination model of balanced scorecard and ariadne uncertain estimate. *Asian Social Science*, 10(2), 70–83. <https://doi.org/10.5539/ass.v10n2p70>
- Zarook, Y., Javadian, N., & Rezaeian, J. (2015).** A hybrid method based on AHP and TOPSIS with uncertain data for MAGDM problem. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 19(1), 123–136. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2015.065956>
- Zeng, S., Palacios-Marqués, D., & Zhu, F. (2016).** A New Model for Interactive Group Decision Making with Intuitionistic Fuzzy Preference Relations. *Informatica (Netherlands)*, 27(4), 911–928. <https://doi.org/10.15388/Informatica.2016.117>
- Zhang, C. (2018).** Research of the Selection of Green Material Suppliers Based on Entropy-TOPSIS Model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 394(5). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/5/052063>
- Zhang, C., Liao, H., Luo, L., & Xu, Z. (2020).** Multiplicative consistency analysis for q-rung orthopair fuzzy preference relation. *International Journal of Intelligent Systems*, 35(1), 38–71. <https://doi.org/10.1002/int.22197>
- Zhang, G., Wang, J. qiang, & Wang, T. li. (2019).** Multi-criteria group decision-making method based on TODIM with probabilistic interval-valued hesitant fuzzy information. *Expert Systems*, 36(4), 1–27. <https://doi.org/10.1111/exsy.12424>
- Zhang, P., Tao, Z., Liu, J., Jin, F., & Zhang, J. (2020).** An ELECTRE TRI-based outranking approach for multi-attribute group decision making with picture fuzzy sets. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 38(4), 4855–4868. <https://doi.org/10.3233/jifs-191540>
- Zhang, W., Xu, Y., & Wang, H. (2016).** A consensus reaching model for 2-tuple linguistic multiple attribute group decision making with incomplete weight information. *International Journal of Systems Science*, 47(2), 389–405. <https://doi.org/10.1080/00207721.2015.1074761>
- Zhang, X. X., Ge, B. F., Jiang, J., & Yang, K. W. (2016).** A new consensus model for group decision making using fuzzy linguistic preference relations with heterogeneous experts. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 30(1), 171–182. <https://doi.org/10.3233/IFS-151744>
- Zhang, X., & Xu, Z. (2014).** Deriving experts' weights based on consistency maximization in intuitionistic fuzzy group decision making. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 27(1), 221–233. <https://doi.org/10.3233/IFS-130991>
- Zhang, X., & Xu, Z. (2015).** Soft computing based on maximizing consensus and fuzzy TOPSIS approach to interval-valued intuitionistic fuzzy group decision making. *Applied Soft Computing Journal*, 26, 42–56. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.08.073>
- Zhang, X. Y., & Wang, J. Q. (2017).** Consensus-based framework to MCGDM under multi-granular uncertain linguistic environment. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 33(2), 1263–1274. <https://doi.org/10.3233/JIFS-17202>

- Zhang, Z., & Chen, S. M. (2019).** A consistency and consensus-based method for group decision making with hesitant fuzzy linguistic preference relations. *Information Sciences*, 501, 317–336. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.05.086>
- Zhang, Z., & Chen, S. M. (2020).** Group decision making based on acceptable multiplicative consistency and consensus of hesitant fuzzy linguistic preference relations. *Information Sciences*, 541, 531–550. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.07.024>
- Zhang, Z., Chen, S. M., & Wang, C. (2020).** Group decision making based on multiplicative consistency and consensus of fuzzy linguistic preference relations. *Information Sciences*, 509, 71–86. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.09.002>
- Zhang, Z., & Guo, C. (2016).** A VIKOR-based approach to group decision making with uncertain preference ordinals and incomplete weight information. *Informatica (Netherlands)*, 27(3), 689–708. <https://doi.org/10.15388/Informatica.2016.106>
- Zhang, Z., Zhang, D., Tavasszy, L. A., & Li, Q. (2020).** Multicriteria intermodal freight network optimal problem with heterogeneous preferences under belt and road initiative. *Sustainability (Switzerland)*, 12(24), 1–24. <https://doi.org/10.3390/su122410265>
- Zhao, F., Zhang, W., & Wang, Y. (2016).** Quantifying the Coordination of Energy Development and Environmental Protection: A Case Study of China. *Energy Procedia*, 104, 520–525. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.088>
- Zheng, X., Easa, S. M., Ji, T., & Jiang, Z. (2020).** Incorporating uncertainty into life-cycle sustainability assessment of pavement alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121466. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121466>
- Zheng, X., Easa, S. M., Yang, Z., Ji, T., & Jiang, Z. (2019).** Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. *Journal of Cleaner Production*, 213, 659–672. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.227>
- Zhou, Q., Wu, Z., Altalhi, A. H., & Herrera, F. (2020).** A two-step communication opinion dynamics model with self-persistence and influence index for social networks based on the DeGroot model. *Information Sciences*, 519, 363–381. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.01.052>
- Zhou, X., Zhang, F., Hui, X., & Li, K. (2011).** Group decision-making method based on entropy and experts cluster analysis. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 22(3), 468–472. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-4132.2011.03.015>
- Zhou, Y., Li, W., Yi, P., & Gong, C. (2019).** Evaluation of city sustainability from the perspective of behavioral guidance. *Sustainability (Switzerland)*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/su11236808>
- Zhu, S., Li, D., Feng, H., Gu, T., & Zhu, J. (2019).** AHP-TOPSIS-based evaluation of the relative performance of multiple neighborhood renewal projects: A case study in Nanjing, China. *Sustainability (Switzerland)*, 11(17). <https://doi.org/10.3390/su11174545>
- Zindani, D., Maity, S. R., & Bhowmik, S. (2020).** Interval-valued intuitionistic fuzzy TODIM method based on Schweizer–Sklar power aggregation operators and their

applications to group decision making. *Soft Computing*, 24(18).
<https://doi.org/10.1007/s00500-020-04783-1>

Zionts, S. (1979). MCDM—If Not a Roman Numeral, Then What? *Interfaces*, 9(4), 94–101.
<https://doi.org/10.1287/inte.9.4.94>

Zou, W. C., Wan, S., & Chen, S. M. (2022). A fairness-concern-based LINMAP method for heterogeneous multi-criteria group decision making with hesitant fuzzy linguistic truth degrees. *Information Sciences*, 612, 1206–1225.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.08.111>

Zubizarreta, M., Cuadrado, J., Orbe, A., & García, H. (2019). Modeling the environmental sustainability of timber structures: A case study. *Environmental Impact Assessment Rev.* 78 (July), 106286.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106286>

Zubizarreta, M., Ganzarain, J., Cuadrado, J., & Lizarralde, R. (2021). Evaluating Disruptive Innovation Project Management Capabilities. *Sustainability*, 13(1).
<https://doi.org/10.3390/su13010001>

ANEJO 1 – FACTORES DETERMINANTES DEL CASO DE ESTUDIO

A1.1 INTRODUCCIÓN

Los Factores determinantes (FDs) son elementos que operan como directrices en el proceso de aplicación del SEPIP, guiando a los decisores en la generación de árboles jerárquicos de MIVES Extendido completamente representativos con la tipología de inversión.

Dado que todas las inversiones en el caso de estudio corresponden a actuaciones de obra civil, en este anejo se presenta el conjunto de FDs específico para inversiones relativas a obras civiles. Para hallar este conjunto, se exponen y analizan los criterios empleados en los informes de evaluación de infraestructuras, también conocidos como IRCs (del inglés, "*Infrastructure Report Cards*"). Estos informes contienen las principales características de evaluación de los principales sectores de infraestructura, permitiendo así obtener un conjunto de FDs completamente representativo.

En la sección A.1.2 se muestra un análisis de los criterios de evaluación de todas las IRCs disponibles hasta el momento, generando así el conjunto de FDs mostrado en la sección A.1.3.

A1.2 INFORMES DE EVALUACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS

Los informes de evaluación de infraestructuras (en adelante, IRCs) son evaluaciones integrales de la condición y el rendimiento de las infraestructuras de un país. Estos informes tienen como objetivo principal proporcionar un análisis objetivo y comprensible de la infraestructura existente por sectores, mediante el uso de criterios de evaluación calculados por expertos de forma cualitativa o cuantitativa. Por ello, representan una base de datos crucial en la identificación de los FDs en obra civil.

Si bien se realizó una búsqueda inicial de información a través de WoS para detectar las IRCs existentes, no se encontraron los resultados esperados debido a que estos documentos son informes elaborados por asociaciones de ingeniería civil. Por tanto, se procedió a utilizar el motor de búsqueda *Google* para localizar las asociaciones que han elaborado IRCs, así como otras fuentes potenciales de información. Tras revisar los resultados, se hallaron un total de 21 documentos de 8 países. Estos resultados son presentados a continuación, agrupados por países.

Estados Unidos de América

El formato inicial de la evaluación nacional de infraestructura mediante reportes de calificación fue introducido por los Estados Unidos de América en 1988 a través del documento “Fragile Foundations: A Report on America’s Public Works” publicado por el Consejo Nacional de Mejora de Obras Públicas (1988). Este informe tenía como objetivo proporcionar al gobierno recomendaciones de expertos sobre la asignación de fondos públicos. Sin embargo, después de una década, cuando quedó claro que no se actualizaría el documento, la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE, por sus siglas en inglés) tomó la iniciativa de publicar su primer IRC en 1998 (American Society of Civil Engineers, 1998). Desde entonces, el IRC ha pasado de ser un documento de calificación poco conciso que destacaba los problemas de infraestructura y proponía soluciones (American Society of Civil Engineers, 2001) a un formato con un análisis completo de cada sector (American Society of Civil Engineers, 2005, 2009, 2013, 2017, 2021). Aunque existen nueve IRCs federales, es interesante destacar que cada uno de los 50 estados de Estados Unidos de América, junto con el Distrito de Columbia y Puerto Rico, tiene su propio IRC realizado por las secciones estatales correspondientes de la ASCE. Los criterios empleados para evaluar estos sectores han experimentado desarrollos progresivos: mientras en 1988 no se delineó ningún criterio, las ediciones más recientes de los IRC han establecido un conjunto completo de criterios, como se muestra en la Tabla A1.1.

Tabla A1.1 – Criterios considerados en las IRCs de Estados Unidos de América.

1998-2001-2005	2009	2013-2017-2021
Condición y rendimiento	Capacidad	Capacidad
Capacidad vs Necesidad	Condición	Condición
Financiación vs Necesidad	Financiación	Financiación
	Necesidades futuras	Necesidades futuras
	Operación y Mantenimiento	Operación y Mantenimiento
	Seguridad pública	Seguridad pública
	Resiliencia	Resiliencia
		Innovación

Estos criterios se basan evaluar los distintos sectores infraestructurales en base a lo siguiente:

- **Capacidad:** Refiere a la capacidad actual de la infraestructura para satisfacer la demanda y necesidades de la sociedad, evaluando si está adecuadamente dimensionada para atender las demandas actuales y futuras.
- **Condición:** Se centra en el análisis del estado físico de la infraestructura, considerando el grado de deterioro, desgaste y envejecimiento de los componentes de la infraestructura y cómo esto puede afectar su funcionamiento y durabilidad.
- **Financiación:** Evalúa la disponibilidad y suficiencia de fondos para mantener, operar y mejorar la infraestructura, analizando si los recursos financieros son adecuados para abordar las necesidades actuales y futuras.
- **Necesidades futuras:** Refiere a la capacidad de la infraestructura para enfrentar los desafíos y demandas del futuro, analizando si se están considerando las tendencias demográficas, tecnológicas y económicas en la planificación y desarrollo de la infraestructura.
- **Operación y Mantenimiento:** Analiza cómo se opera y mantiene la infraestructura, según si se siguen prácticas de operación eficientes y si el mantenimiento se lleva a cabo de manera adecuada para garantizar un funcionamiento seguro y confiable.
- **Seguridad pública:** Evalúa el nivel de seguridad que proporciona la infraestructura a la población, analizando si esta cumple con los estándares de seguridad y si está protegida ante riesgos naturales y amenazas humanas.
- **Resiliencia:** Refiere a la capacidad de la infraestructura para resistir y recuperarse de eventos adversos, como desastres naturales o emergencias.
- **Innovación:** Estudia si se están aplicando enfoques innovadores en el diseño, construcción y operación de la infraestructura, buscando determinar si se están utilizando nuevas tecnologías y prácticas para mejorar la eficiencia y sostenibilidad.

Australia

La asociación de Ingenieros de Australia (EA, por sus siglas en inglés) publicó su primer IRC 2001. Desde 2001 hasta 2005, se publicaron IRCs por estado, que se agregaron para generar el segundo IRC nacional en 2005. El último IRC de EA se publicó en 2010 (Institution of Engineers Australia, 2010). Debido al impacto de la IRC de 2005, dónde la EA recomendó el establecimiento de un "Consejo Nacional de Infraestructura" para brindar asesoramiento independiente sobre políticas, planificación y ejecución de

infraestructuras en Australia, el gobierno fundó en 2008 “Infraestructuras Australia”, que publicó sus propios informes en 2015 y 2019. Sin embargo, no se consideran IRCs reales, ya que en vez de evaluar las infraestructuras con un sistema de calificación únicamente proporcionan declaraciones sobre los desafíos futuros en el sector y ofrecen recomendaciones en forma de mensajes clave, resultados para los usuarios, impacto en las comunidades, desafíos y oportunidades.

En lo referente a los criterios de evaluación, ninguna IRC de Australia establece claramente qué criterios se utilizaron para evaluar las infraestructuras, utilizando meramente la opinión general de cada experto que dio su opinión.

Sud África

La Asociación de Ingenieros Civiles de Sud África (SAICE, por sus siglas en inglés) presentó el "Informe de Infraestructura de Sudáfrica", su IRC, en 2006 (SAICE, 2006), coincidiendo con la etapa avanzada del Programa Nacional de Reconstrucción y Desarrollo (Parliament of the Republic of South Africa, 1994), que incluía inversión en infraestructura de propiedad pública. Posteriormente, se publicaron dos IRCs siguiendo la misma metodología para presentar una visión en evolución de la infraestructura en 2011 y 2017 (SAICE, 2011, 2017). Todas las IRCs se evalúan utilizando los cuatro criterios de Condición, Rendimiento, Capacidad y Necesidades futuras. Si bien tres de ellos ya han sido comentados en las IRCs de ASCE, la evaluación de rendimiento es la siguiente:

- **Rendimiento:** Refiere a cómo la infraestructura cumple con su propósito y objetivos. Se evalúa su eficiencia, eficacia y capacidad para proporcionar los servicios y beneficios esperados a los usuarios.

Reino Unido

El Reino Unido cuenta con una serie de informes anuales llamados Estado de la Nación, compilados por un panel de expertos de la Institución de Ingenieros Civiles (ICE, por sus siglas en inglés) desde el año 2000. A partir del 2008, estos informes se han centrado en temas específicos, resaltando puntos críticos en la infraestructura nacional para aumentar la conciencia civil y estimular el debate público. Dos de estos informes, los correspondientes a 2010 y 2014, se consideran IRCs. En el informe de 2010, los criterios utilizados fueron la condición y capacidad, la resiliencia, la sostenibilidad, el impacto de los recortes significativos y las necesidades futuras (Institution of Civil Engineers, 2010). Estos criterios se centraron en evaluar el estado actual de la infraestructura, su capacidad para satisfacer la demanda, su resiliencia ante factores externos, consideraciones de sostenibilidad y el impacto de los recortes presupuestarios en el desarrollo de la infraestructura. En el informe de 2014, los criterios se modificaron para incluir condición y capacidad, resiliencia, liderazgo y factores económicos y sociales (Institution of Civil Engineers, 2014). Considerando la última IRC como documento de análisis, los criterios que no se han definido anteriormente son:

- **Liderazgo:** Este criterio analiza la calidad del liderazgo y la planificación en la gestión de la infraestructura, considerando la eficiencia, la toma de decisiones y la implementación de proyectos.

- **Factores económicos y sociales:** Evalúa los impactos económicos y sociales de la infraestructura en la comunidad y la sociedad en general, incluyendo el empleo generado, el bienestar social y el impacto en la calidad de vida de las personas.

Canadá

En 2003, el Gobierno Federal de Canadá encargó una serie de documentos (conocidos como InfraGuide) para compilar las mejores prácticas para la gestión de infraestructuras y crear una guía integral para las operaciones de los gobiernos municipales (Larson, 2012). La última entrega de estas guías, publicada en 2004, se centró en abordar el proceso de toma de decisiones en infraestructura y los requisitos de planificación para los gobiernos y las partes interesadas en infraestructura. Posteriormente, la Asociación de Construcción de Canadá, la Asociación Canadiense de Obras Públicas, la Sociedad Canadiense de Ingenieros Civiles y la Federación de Municipios Canadienses se unieron para establecer el Comité Directivo del Proyecto (PSC, por sus siglas en inglés). El PSC desempeñó un papel fundamental en el lanzamiento de la primera IRC de Canadá (CIRC, por sus siglas en inglés) en 2016, y enlistó la participación de numerosas partes interesadas, formando la Junta Asesora del Informe (RCAB, por sus siglas en inglés). En la segunda edición de la IRC, en 2019, el RCAB experimentó un aumento en la representación de las partes interesadas debido a la cálida recepción que recibió el documento inicial (PSC, 2012, 2016, 2019).

En ambas IRCs, el único criterio de evaluación es la Condición, que se evalúa mediante la Encuesta Central de Infraestructura Pública de Canadá. Esta encuesta comprende un extenso conjunto de preguntas para cada sector, abarcando aspectos como inventario, capacidad y condición, aunque este último sea el único criterio de calificación empleado.

Zambia

En 2012, la Institución de Ingenieros de Zambia (EIZ, por sus siglas en inglés) tomó la decisión de desarrollar un marco de IRC inspirado en la ASCE, que incluía un grupo de subindicadores y nuevas metodologías. Este marco tenía como objetivo abordar la deficiencia cultural de inversión en mantenimiento y la errónea asignación de recursos que estaban obstaculizando el desarrollo del país, lo que se trasladaba a una gran dependencia de la ayuda extranjera (EIZ, 2012). Más adelante, en mayo de 2015, se lanzó la IRC de Zambia bajo el título "Informe Inicial de Evaluación del 2014 para la Infraestructura de Zambia". Esta IRC evalúa a los sectores con los criterios de condición, capacidad, operaciones y seguridad, que equivalen a un pequeño grupo de los utilizados por la ASCE (EIZ, 2015).

Ghana

En 2016, la Institución de Ingenieros Civiles de Ghana (GhIE, por sus siglas en inglés) presentó el Informe de Infraestructura de Ghana (GIRC) con el objetivo de evaluar la disponibilidad, calidad y desempeño de la infraestructura nacional. El desarrollo del GIRC fue motivado por dos problemas clave a nivel nacional: la disparidad en la

infraestructura entre áreas urbanas y rurales, lo que lleva a la migración de la población, y la insuficiente capacidad de la infraestructura para dar cabida al crecimiento de la población del país. Aunque la intención es producir múltiples ediciones del GIRC con el tiempo, actualmente solo se ha redactado un documento que utiliza los mismos criterios de evaluación que la ASCE: Capacidad, Condición, Financiamiento, Necesidades futuras, Operación y Mantenimiento, seguridad pública, Resiliencia e Innovación (Ghana Institution of Engineers, 2016).

España

En 2019, la Asociación de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de España (AICCP-IC) presentó su publicación titulada "Obras Públicas y Servicios Bajo Escrutinio", con el objetivo de proporcionar información sobre el estado de la infraestructura nacional y actuar como intermediario entre la sociedad y el gobierno. El Informe de Infraestructura de España (SIRC) emplea una metodología objetiva, cuantificable y creíble (AICCP-IC, 2019) y consta de varios documentos distintos, incluida una descripción completa de la metodología del SIRC, un resumen ejecutivo que abarca todos los resultados y un informe detallado para cada sector analizado, acompañado de una hoja de datos del sector.

El SIRC adopta casi los mismos criterios que la ASCE: Capacidad, Rendimiento, Financiamiento, Necesidades futuras, Operación y Mantenimiento, seguridad pública, Resiliencia e Innovación. Cabe destacar que el criterio de rendimiento reemplaza al criterio de condición y evalúa qué tan bien está funcionando o rindiendo la infraestructura en términos de lograr objetivos específicos o resultados deseados.

A1.3 FACTORES DETERMINANTES EN OBRA CIVIL

La Figura A1.1 muestra los criterios empleados en las evaluaciones de las IRC, utilizando un agrupamiento por analogía. Esta analogía ha sido realizada mediante similitud: dado que ciertos criterios tienen nombres distintos, pero se refieren al mismo concepto, se han agrupado según su propósito tomando como base la propuesta de la ASCE. Por ejemplo, el rendimiento de Sudáfrica se categoriza como operación, y el liderazgo y factores económicos y sociales del Reino Unido, se categorizan como necesidades futuras e innovación, respectivamente. Además, el criterio de seguridad de Zambia se divide en seguridad pública y resiliencia.

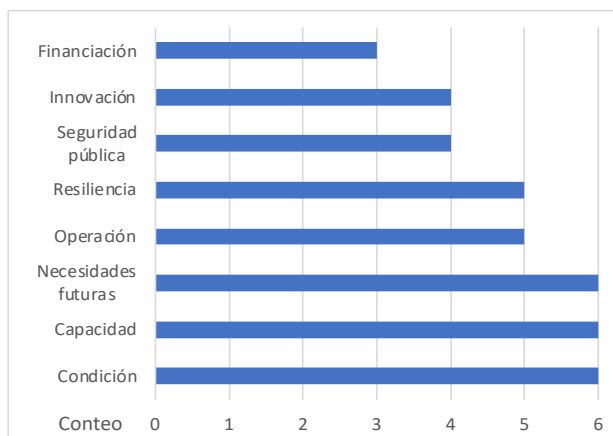


Figura A1.1 –Conteo de apariciones de los criterios en las evaluaciones de las IRCs.

La Condición y la Capacidad emergen como los criterios más predominantes en las IRC, ya que ofrecen una visión del estado actual de la infraestructura y su desempeño en satisfacer las demandas. Las necesidades futuras también reciben una atención significativa, extrapolando las evaluaciones de la condición y la capacidad para analizar la posibilidad de satisfacer las demandas proyectadas, proporcionando así recomendaciones y consejos a la administración. La Operación abarca criterios relacionados con las operaciones de mantenimiento y preservación, que están estrechamente vinculadas a su condición. Los criterios de Resiliencia y Seguridad Pública ofrecen información sobre las medidas necesarias para mantener la capacidad de resistencia de la infraestructura ante posibles desastres o fallos. Sin embargo, existe una notable necesidad de mayor énfasis en los criterios de Innovación y Financiación. Los países relacionados con las IRC de la ASCE ya incorporan la innovación, que incluye análisis sobre cuestiones y soluciones de sostenibilidad. Dada la creciente importancia de la sostenibilidad en la toma de decisiones gubernamentales, sería beneficioso considerar su inclusión como un criterio separado o incorporarlo bajo "Innovación y sostenibilidad", estructurándola según los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los Objetivos de la Infraestructura Sostenible (United Nations Environment Programme, 2022).

Por tanto, una vez analizados y discutidos los criterios que se consideran cruciales en el ámbito de la evaluación de infraestructuras, se presentan como FDs para la toma de decisiones en proyectos de Obra Civil aquellos que se exponen y definen en la Tabla A1.2. La utilización de estos criterios como referencia y guía en la selección de los criterios a incluir en el cálculo de MIVES Extendido garantiza que el árbol jerárquico sea completamente representativo. Además, considerando que las inversiones modifican el estado actual de las infraestructuras, los criterios del árbol pueden basarse en diferencias entre el estado actual y el estado proyectado.

Tabla A1.2 – FDs en la toma de decisión de Obra Civil.

nº	Factor determinante	Descripción
1	Condición	Factores referidos al estado físico de la infraestructura actual y su durabilidad, considerando la vida útil de la misma.
2	Capacidad y Calidad	Factores referidos a la capacidad de la infraestructura para satisfacer la demanda actual, considerando aspectos tales como la saturación a la que se ve sometida, y criterios pertinentes a la calidad ofrecida en el servicio ofrecido.
3	Necesidades futuras	Factores centrados en la comparación entre el estado actual de la infraestructura y las necesidades proyectadas en un futuro, como por ejemplo variaciones de Condición, Capacidad y Calidad. Este factor también puede considerar efectos socioeconómicos a largo plazo, incluyendo cómo la infraestructura contribuye al desarrollo y a las necesidades futuras de la sociedad en términos de empleo, crecimiento económico y bienestar, o alineaciones con estrategias políticas de largo enfoque no enmarcadas en el Factor determinante 8.
4	Operación y Mantenimiento	Factores referidos al análisis de rendimiento en la operación y mantenimiento de la infraestructura actual, ya sea con perspectiva económica, de eficiencia o de normativa.
5	Financiación	Factores referidos principalmente a la parte monetaria de la infraestructura o inversión, como su coste, retornos económicos o financiación externa no computable a la entidad solicitante, entre otros.
6	Seguridad pública	Factores alusivos a la seguridad proporcionada por la infraestructura ante riesgos naturales o humanos.
7	Resiliencia	Factores referentes a la capacidad de la infraestructura para resistir y recuperarse de eventos adversos a los que puede verse sometida, tales como desastres naturales o acciones humanas.
8	Innovación y Sostenibilidad	Factores referidos al estado innovativo de la infraestructura tales como nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia, y factores referentes a la sostenibilidad económica, social y ambiental que no hayan sido considerados en los anteriores Criterios Fundamentales.


ANEJO 2 – FICHAS DE INVERSIONES DE MANRESA

A2.1 INTRODUCCIÓN

En este anejo se presentan las fichas correspondientes a las seis inversiones de Manresa, además de la inversión "ideal" proporcionada por el representante de la entidad solicitante. Estas fichas contienen todos los datos necesarios para llevar a cabo una aplicación completa del SEPIP. En la mayoría de los casos, se ha empleado un sistema de listas desplegables que facilita el proceso de registro, conteniendo en cada punto informativo todos los atributos posibles.

Debe mencionarse que para rellenar estas fichas sin que existan sesgos en las evaluaciones, el representante de la entidad solicitante utilizó un informe simplificado, dónde cada atributo era descrito, pero no puntuado.


Ajuntament de Manresa		Barri _____	Inversió ideal
Descripció del projecte			
-			
Dades econòmiques			
Pressupost total estimat (€, IVA inclòs)	9.000.000		
Vida útil (anys)	Més de 50 anys	Probabilitat d'aconseguir finançament extern	Molt alta
Estat actual de l'actuació (% ja invertit)		Quantitat de finançament extern	Més del 80%
Despeses de manteniment	Gran estalvi	Rendiment econòmic directe a l'Ajuntament	Mitj
Despeses d'operació	Gran estalvi	Rendiment econòmic a la ciutadania	Molt alt
Dades de la necessitat de l'actuació			
Abast de l'actuació		Rellevància de l'actuació	
Porció de la població servida			
Avaluació situació prèvia		Obsoloscència tècnica del servei actual	
Estat de conservació del servei actual		Estat de saturació del servei actual	
Grau de proximitat del servei actual			
Dades ambientals			
Gestió de residus	Millora	Mitj	
Eficiència energètica	Millora	Mitj	
Ús d'energia neta	Millora	Mitj	
Eficiència en l'ús d'aigua	Millora	Mitj	
Qualitat de l'aire	Millora	Mitj	
Qualitat acústica	Millora	Baix	
Biodiversitat i espais verds	Millora	Baix	
Adequació del paisatge	Millora	Baix	
Dades socials			
Millores en la qualitat del servei			
Seguretat	Mitja	Salut, la higiene i la promoció de l'esport	Mitja
Accessibilitat, comoditat i mobilitat	Mitja	Perspectiva de gènere	Mitja
Cultura	Mitja	Cohesió social	Mitja
Educació i formació	Mitja		
Creació llocs de treball			
Directes execució del projecte	Molt significatiu	Directes explotació del projecte	Molt significatiu
		Indirectes execució del projecte	Molt significatiu
Acceptació social			
Grau d'impacte en la ciutadania	Acceptació		Unànime
Alineació amb l'estratègia de Manresa			
Ciutat verda i sostenible	Alta	Manresa i l'anella verda	Alta
Ciutat dinàmica i d'oportunitats	Alta	Manresa ciutat de 15 minuts	Alta
Ciutat de trobada i acollidora	Alta	Manresa i la mobilitat sostenible	Alta
Ciutat cívica, propera, i compromesa	Alta	Manresa i el Centre Històric	Alta
Ciutat capital	Alta		

 Ajuntament de Manresa		Barri Vic-Remei	Anònima
Descripció del projecte			
Rehabilitació de L'Anònima per a que pugui acollir activitat cultural i pugui disposar d'un espai dedicat a la cultura transformadora i a la promoció de les indústries creatives. L'edifici també acollirà la seu de ProManresa, que és l'agència de desenvolupament local de l'Ajuntament de Manresa			
Dades econòmiques			
Pressupost total estimat (€, IVA inclòs)	4.000.000	Probabilitat d'aconseguir finançament extern	Molt alta
Vida útil (anys)	Més de 50 anys	Quantitat de finançament extern	Del 60% al 80%
Estat actual de l'actuació (% ja invertit)	Entre 10% i 20%	Rendiment econòmic directe a l'Ajuntament	Alt
Despeses de manteniment	Gran augment	Rendiment econòmic a la ciutadania	Molt alt
Despeses d'operació	Gran augment		
Dades de la necessitat de l'actuació			
Abast de l'actuació		Rellevància de l'actuació	
Porció de la població servida	Ciutat		Important
Avaluació situació prèvia			
Estat de conservació del servei actual	Molt baix	Obsolescència tècnica del servei actual	Obsolet
Grau de proximitat del servei actual	Adequat	Estat de saturació del servei actual	Correcte
Dades ambientals			
Gestió de residus	No aplica		No aplica
Eficiència energètica	Millora		Alt
Ús d'energia neta	Millora		Alt
Eficiència en l'ús d'aigua	Millora		Alt
Qualitat de l'aire	No aplica		No aplica
Qualitat acústica	No aplica		No aplica
Biodiversitat i espais verds	No aplica		No aplica
Adequació del paisatge	No aplica		No aplica
Dades socials			
Millores en la qualitat del servei			
Seguretat	No aplica	Salut, la higiene i la promoció de l'esport	Baixa
Accessibilitat, comoditat i mobilitat	Alta	Perspectiva de gènere	Molt alta
Cultura	Molt alta	Cohesió social	Molt alta
Educació i formació	Molt alta		
Creació llocs de treball			
Directes execució del projecte	Molt significatiu	Directes explotació del projecte	Molt significatiu
		Indirectes execució del projecte	Molt significatiu
Acceptació social			
Grau d'impacte en la ciutadania	Acceptació		Unànime
Alineació amb l'estratègia de Manresa			
Ciutat verda i sostenible	Mitja	Manresa i l'anella verda	No aplica
Ciutat dinàmica i d'oportunitats	Molt alta	Manresa ciutat de 15 minuts	Molt alta
Ciutat de trobada i acollidora	Molt alta	Manresa i la mobilitat sostenible	Alta
Ciutat cívica, propera, i compromesa	Molt alta	Manresa i el Centre Històric	Molt alta
Ciutat capital	Molt alta		

Ajuntament de Manresa		Barri Vic-Remei	Fàbrica nova
Descripció del projecte			
Construcció a la Fàbrica Nova d'un espai basat en el coneixement, la tecnologia, l'empresa, la ciutat i el territori			
Dades econòmiques			
Pressupost total estimat (€, IVA inclòs)	47.000.000	Probabilitat d'aconseguir finançament extern	Molt alta
Vida útil (anys)	Més de 50 anys	Quantitat de finançament extern	Del 40% al 60%
Estat actual de l'actuació (% ja invertit)	Entre 10% i 20%	Rendiment econòmic directe a l'Ajuntament	Molt baix
Despeses de manteniment	Gran augment	Rendiment econòmic a la ciutadania	Molt baix
Despeses d'operació	Petit augment		
Dades de la necessitat de l'actuació			
Abast de l'actuació			
Porció de la població servida	Ciutat	Rellevància de l'actuació	Prioritària
Avaluació situació prèvia			
Estat de conservació del servei actual	Adequat	Obsolescència tècnica del servei actual	Adequat
Grau de proximitat del servei actual	Adequat	Estat de saturació del servei actual	Correcte
Dades ambientals			
Gestió de residus	No aplica		Baix
Eficiència energètica	Millora		Alt
Ús d'energia neta	Millora		Alt
Eficiència en l'ús d'aigua	Millora		Alt
Qualitat de l'aire	Millora		Mitj
Qualitat acústica	No aplica		No aplica
Biodiversitat i espais verds	Millora		Alt
Adequació del paisatge	Millora		Baix
Dades socials			
Millores en la qualitat del servei			
Seguretat	No aplica	Salut, la higiene i la promoció de l'esport	Baixa
Accessibilitat, comoditat i mobilitat	Molt alta	Perspectiva de gènere	Alta
Cultura	Molt alta	Cohesió social	Alta
Educació i formació	Molt alta		
Creació llocs de treball			
Directes execució del projecte	Molt significatiu	Directes explotació del projecte	Molt significatiu
		Indirectes execució del projecte	Molt significatiu
Acceptació social			
Grau d'impacte en la ciutadania	Acceptació		Unànime
Alineació amb l'estratègia de Manresa			
Ciutat verda i sostenible	Mitja	Manresa i l'anella verda	No aplica
Ciutat dinàmica i d'oportunitats	Molt alta	Manresa ciutat de 15 minuts	Molt alta
Ciutat de trobada i acollidora	Molt alta	Manresa i la mobilitat sostenible	Alta
Ciutat cívica, propera, i compromesa	Mitja	Manresa i el Centre Històric	Molt alta
Ciutat capital	Molt alta		

Ajuntament de Manresa		Barri Passeig i rodalies	Guimerà
Descripció del projecte			
Convertir l'entorn del carrer Àngel Guimerà en una illa de vianants			
Dades econòmiques			
Pressupost total estimat (€, IVA inclòs)	5.000.000	Probabilitat d'aconseguir finançament extern	Alta
Vida útil (anys)	De 20 a 50 anys	Quantitat de finançament extern	Del 10% al 40%
Estat actual de l'actuació (% ja invertit)	Sense inversió prèvia	Rendiment econòmic directe a l'Ajuntament	Molt baix
Despeses de manteniment	Nul/marginal	Rendiment econòmic a la ciutadania	Molt baix
Despeses d'operació	Nul/marginal		
Dades de la necessitat de l'actuació			
Abast de l'actuació		Rellevància de l'actuació	
Porció de la població servida	Ciutat		Prioritària
Avaluació situació prèvia			
Estat de conservació del servei actual	Adequat	Obsolescència tècnica del servei actual	Adequat
Grau de proximitat del servei actual	Adequat	Estat de saturació del servei actual	Correcte
Dades ambientals			
Gestió de residus	No aplica		No aplica
Eficiència energètica	Millora		Mitj
Ús d'energia neta	Millora		Mitj
Eficiència en l'ús d'aigua	Millora		Mitj
Qualitat de l'aire	Millora		Alt
Qualitat acústica	Millora		Molt alt
Biodiversitat i espais verds	Millora		Alt
Adequació del paisatge	Millora		Alt
Dades socials			
Millores en la qualitat del servei			
Seguretat	No aplica	Salut, la higiene i la promoció de l'esport	Alta
Accessibilitat, comoditat i mobilitat	Molt alta	Perspectiva de gènere	Mitja
Cultura	No aplica	Cohesió social	Molt alta
Educació i formació	Baixa		
Creació llocs de treball			
Directes execució del projecte	Reduït	Directes explotació del projecte	Reduït
		Indirectes execució del projecte	Significatiu
Acceptació social			
Grau d'impacte en la ciutadania	Acceptació		Elevada / Elevat
Alineació amb l'estratègia de Manresa			
Ciutat verda i sostenible	Alta	Manresa i l'anella verda	No aplica
Ciutat dinàmica i d'oportunitats	Alta	Manresa ciutat de 15 minuts	Molt alta
Ciutat de trobada i acollidora	Alta	Manresa i la mobilitat sostenible	Molt alta
Ciutat cívica, propera, i compromesa	Molt alta	Manresa i el Centre Històric	No aplica
Ciutat capital	Molt alta		

Ajuntament de Manresa		Barri Farreras, Suanya, Comtals, Santa Caterina i l'Oller	Lluvià
Descripció del projecte			
Rehabilitació de la Torre Lluvià			
Dades econòmiques			
Pressupost total estimat (€, IVA inclòs)	1.000.000	Probabilitat d'aconseguir finançament extern	Molt alta
Vida útil (anys)	Més de 50 anys	Quantitat de finançament extern	Més del 80%
Estat actual de l'actuació (% ja invertit)	Entre 1% i 10%	Rendiment econòmic directe a l'Ajuntament	Mitj
Despeses de manteniment	Petit augment	Rendiment econòmic a la ciutadania	Mitj
Despeses d'operació	Petit augment		
Dades de la necessitat de l'actuació			
Abast de l'actuació			
Porció de la població servida	Ciutat	Rellevància de l'actuació	Complementària
Avaluació situació prèvia			
Estat de conservació del servei actual	Baix	Obsolescència tècnica del servei actual	Obsolet
Grau de proximitat del servei actual	Molt baix	Estat de saturació del servei actual	No avalua
Dades ambientals			
Gestió de residus	No aplica		No aplica
Eficiència energètica	Millora		Alt
Ús d'energia neta	Millora		Alt
Eficiència en l'ús d'aigua	Millora		Alt
Qualitat de l'aire	No aplica		No aplica
Qualitat acústica	No aplica		No aplica
Biodiversitat i espais verds	Millora		Alt
Adequació del paisatge	Millora		Molt alt
Dades socials			
Milliores en la qualitat del servei			
Seguretat	No aplica	Salut, la higiene i la promoció de l'esport	Alta
Accessibilitat, comoditat i mobilitat	No aplica	Perspectiva de gènere	Mitja
Cultura	Molt alta	Cohesió social	Mitja
Educació i formació	Alta		
Creació llocs de treball			
Directes execució del projecte	Intermedi	Directes explotació del projecte	Intermedi
		Indirectes execució del projecte	Intermedi
Acceptació social			
Grau d'impacte en la ciutadania	Acceptació		Elevada / Elevat
Alineació amb l'estratègia de Manresa			
Ciutat verda i sostenible	Molt alta	Manresa i l'anella verda	Molt alta
Ciutat dinàmica i d'oportunitats	Mitja	Manresa ciutat de 15 minuts	Molt baixa
Ciutat de trobada i acollidora	Mitja	Manresa i la mobilitat sostenible	Molt baixa
Ciutat cívica, propera, i compromesa	Mitja	Manresa i el Centre Històric	Molt baixa
Ciutat capital	Molt alta		

 Ajuntament de Manresa		Barri Farreras, Suanya, Comtals, Santa Caterina i l'Oller	
Nou Congost			
Descripció del projecte			
Ampliació i modernització del pavelló de bàsquet Nou Congost			
Dades econòmiques			
Pressupost total estimat (€, IVA inclòs)	8.000.000	Probabilitat d'aconseguir finançament extern	Alta
Vida útil (anys)	De 20 a 50 anys	Quantitat de finançament extern	Del 10% al 40%
Estat actual de l'actuació (% ja invertit)	Entre 1% i 10%	Rendiment econòmic directe a l'Ajuntament	Molt baix
Despeses de manteniment	Petit augment	Rendiment econòmic a la ciutadania	Molt baix
Despeses d'operació	Petit augment		
Dades de la necessitat de l'actuació			
Abast de l'actuació			
Porció de la població servida	Ciutat	Rellevància de l'actuació	Complementària
Avaluació situació prèvia			
Estat de conservació del servei actual	Adequat	Obsolescència tècnica del servei actual	Adequat
Grau de proximitat del servei actual	Adequat	Estat de saturació del servei actual	Correcte
Dades ambientals			
Gestió de residus	No aplica		No aplica
Eficiència energètica	Millora		Alt
Ús d'energia neta	Millora		Alt
Eficiència en l'ús d'aigua	Millora		Alt
Qualitat de l'aire	No aplica		No aplica
Qualitat acústica	No aplica		No aplica
Biodiversitat i espais verds	No aplica		No aplica
Adequació del paisatge	No aplica		No aplica
Dades socials			
Millores en la qualitat del servei			
Seguretat	No aplica	Salut, la higiene i la promoció de l'esport	Molt alta
Accessibilitat, comoditat i mobilitat	Mitja	Perspectiva de gènere	Mitja
Cultura	Alta	Cohesió social	Alta
Educació i formació	Mitja		
Creació llocs de treball			
Directes execució del projecte	Molt significatiu	Directes explotació del projecte	Molt significatiu
		Indirectes execució del projecte	Significatiu
Acceptació social			
Grau d'impacte en la ciutadania	Acceptació		Elevada / Elevat
Alineació amb l'estratègia de Manresa			
Ciutat verda i sostenible	No aplica	Manresa i l'anella verda	No aplica
Ciutat dinàmica i d'oportunitats	Alta	Manresa ciutat de 15 minuts	Molt baixa
Ciutat de trobada i acollidora	Alta	Manresa i la mobilitat sostenible	No aplica
Ciutat cívica, propera, i compromesa	Mitja	Manresa i el Centre Històric	No aplica
Ciutat capital	Molt alta		

Ajuntament de Manresa		Barri	Farreras, Suanya, Comtals, Santa Caterina i l'Oller
			Pont Nou
Descripció del projecte			
Urbanització del polígon industrial Pont Nou II			
Dades econòmiques			
Pressupost total estimat (€, IVA inclòs)	25.000.000	Probabilitat d'aconseguir finançament extern	Molt alta
Vida útil (anys)	Més de 50 anys	Quantitat de finançament extern	Més del 80%
Estat actual de l'actuació (% ja invertit)	Entre 1% i 10%	Rendiment econòmic directe a l'Ajuntament	Molt alt
Despeses de manteniment	Petit augment	Rendiment econòmic a la ciutadania	Molt alt
Despeses d'operació	Nul/marginal		
Dades de la necessitat de l'actuació			
Abast de l'actuació			
Porció de la població servida	Ciutat	Rellevància de l'actuació	Prioritària
Avaluació situació prèvia			
Estat de conservació del servei actual	Nou / No avalua	Obsolescència tècnica del servei actual	Nou / No avalua
Grau de proximitat del servei actual	Nou / No avalua	Estat de saturació del servei actual	No avalua
Dades ambientals			
Gestió de residus	No aplica	Baix	
Eficiència energètica	Millora	Alt	
Ús d'energia neta	Millora	Alt	
Eficiència en l'ús d'aigua	Millora	Alt	
Qualitat de l'aire	Deteriorament	Mitj	
Qualitat acústica	Deteriorament	Baix	
Biodiversitat i espais verds	Deteriorament	Baix	
Adequació del paisatge	Deteriorament	Baix	
Dades socials			
Milliores en la qualitat del servei			
Seguretat	No aplica	Salut, la higiene i la promoció de l'esport	Baixa
Accessibilitat, comoditat i mobilitat	Alta	Perspectiva de gènere	Mitja
Cultura	Molt baixa	Cohesió social	Mitja
Educació i formació	Mitja		
Creació llocs de treball			
Directes execució del projecte	Molt significatiu	Directes explotació del projecte	Molt significatiu
		Indirectes execució del projecte	Molt significatiu
Acceptació social			
Grau d'impacte en la ciutadania	Acceptació	Unànime	
Alineació amb l'estratègia de Manresa			
Ciutat verda i sostenible	Molt baixa	Manresa i l'anella verda	Molt baixa
Ciutat dinàmica i d'oportunitats	Molt alta	Manresa ciutat de 15 minuts	Molt baixa
Ciutat de trobada i acollidora	Molt baixa	Manresa i la mobilitat sostenible	Baixa
Ciutat cívica, propera, i compromesa	Molt baixa	Manresa i el Centre Històric	Molt baixa
Ciutat capital	Molt alta		

LISTADO DE PUBLICACIONES

Artículos en Revistas

A systematic review on MIVES: a sustainability-oriented multi-criteria decision-making method (2022)

Autores: David Boix Cots, Pablo Pujadas, Francesc Pardo Bosch, Ana Blanco, Antonio Aguado

Revista: Building and Environment, 223, 1-11.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109515>

A systematic review on multi-criteria group decision-making methods based on weights: analysis and classification scheme (2023)

Autores: David Boix Cots, Pablo Pujadas, Francesc Pardo Bosch

Revista: Information Fusion, 96, 16-36.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.03.004>

A hierarchical integration method under social constraints to maximize satisfaction in multiple criteria group decision making systems (2023)

Autores: David Boix Cots, Pablo Pujadas, Francesc Pardo Bosch

Revista: Expert Systems with applications, 216, 1-13.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119471>

Analysis and Comparison of the Infrastructure Report Cards as a Decision-Making Tool for Sustainable Development (2023)

Autores: David Boix Cots, Pablo Pujadas, Francesc Pardo Bosch

Revista: Buildings, 13 (9).

DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13092166>

Comunicaciones en Congresos

VII Congreso de Dynamics of Socio Economic Systems (DYSES). Octubre de 2022.

TÍTULO: Analysing the Shopping mall's complex problems: Decision on customer's flow drivers and tenants' location optimisation.

Autores: David Boix Cots, Pablo Pujadas, Francesc Pardo Bosch